

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ

Луцького національного технічного університету

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Конспект лекцій
для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня «молодший спеціаліст»
освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
галузь знань 14 Електрична інженерія
спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
денної форми навчання

Луцьк 2020

УДК 621.397

О-47

До друку

Голова навчально-методичної ради Луцького НТУ _____ О.М. Ляшенко

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій Луцького НТУ

Директор бібліотеки _____ С.С. Бакуменко

Затверджено навчально-методичною радою Луцького НТУ,
протокол № ____ від « ____ » _____ 2020 року.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою ТК Луцького НТУ,
протокол № ____ від « ____ » _____ 2020 року.

Голова навчально-методичної ради ТК ЛНТУ _____ Т.П. Радіщук

Розглянуто і схвалено на засіданні випускаючої циклової комісії
«Електропостачання» ТК Луцького НТУ,

протокол № ____ від « ____ » _____ 2020 року.

Голова ВЦК _____ М.М. Євсюк

Укладачі: _____ В.В. Лишук, викладач Технічного коледжу Луцького НТУ
_____ С.П. Літковець, викладач Технічного коледжу Луцького НТУ

Рецензент: _____ Й.Р. Селепина, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій Луцького НТУ

Відповідальний за випуск: _____ М.М. Євсюк, голова випускаючої циклової комісії «Електропостачання» Технічного коледжу Луцького НТУ

Основи електроприводу [Текст]: конспект лекцій для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня «молодший спеціаліст» освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання / укл. В.В. Лишук, С.П.Літковець. – Луцьк : Технічний коледж Луцького НТУ, 2020. – 168 с.

Даний конспект лекцій складений на основі робочої програми з дисципліни „Основи електроприводу” і призначений для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання.

© В.В. Лишук, 2020

© С.П. Літковець, 2020

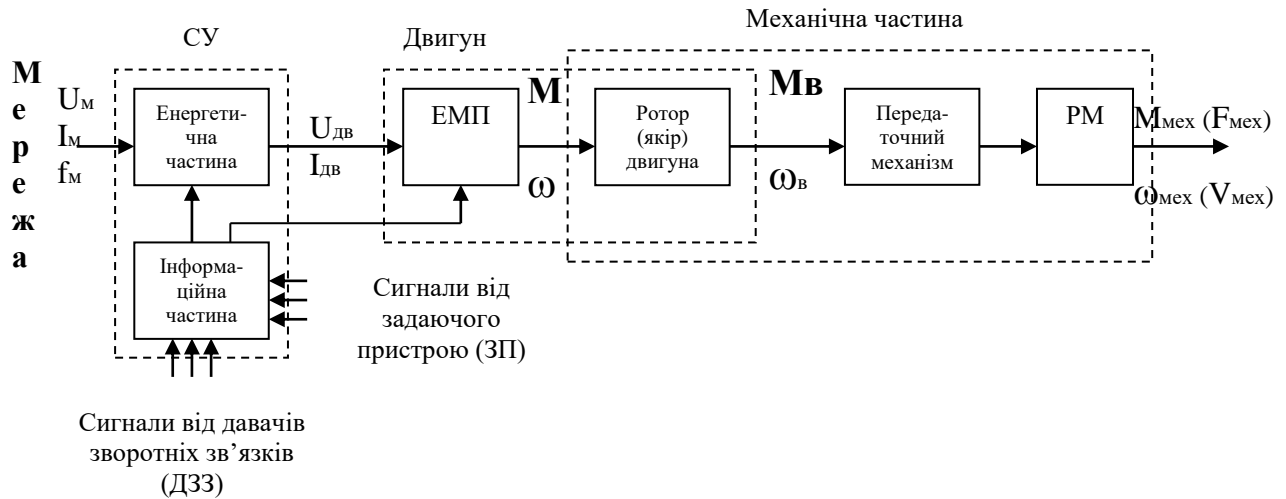
Зміст

Вступ.....	5
1. Лекція №1. Механіка електроприводу.....	8
2. Лекція №2. Приведення J , M_c , F_c , m і C -жорсткостей пружних елементів до розрахункової швидкості та розрахункові схеми механічної частини електропривода.....	12
3. Лекція №3. Механічні характеристики електроприводів. Усталені режими.....	17
4. Лекція №4. Поняття про електромеханічні і механічні характеристики і режими роботи двигунів.....	24
5. Лекція №5. Природні і штучні електромеханічні і механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження	27
6. Лекція №6. Гальмівні режими двигуна незалежного збудження.....	33
7. Лекція №7. Розрахунок механічних характеристик двигуна незалежного збудження.....	38
8. Лекція №8. Гальмівні режими двигунів послідовного збудження.....	43
9. Лекція №9. Розрахунок штучних електромеханічних і механічних характеристик ДПЗ.....	47
10. Лекція №10. Номінальний режим роботи електроприводів.....	51
11. Лекція №11. Електроприводи змінного струму.....	58
12. Лекція №12. Штучні механічні характеристики АД при зміні параметрів кола двигуна і живильної мережі.....	66
13. Лекція №13. Гальмівні режими асинхронного двигуна.....	69
14. Лекція №14. Розрахунок природних і штучних механічних характеристик АД.....	76
15. Лекція №15. Розрахунок опорів для роторного кола АД.....	78
16. Лекція №16. Електромеханічні властивості синхронного двигуна....	81
17. Лекція №17. Перехідні режими електроприводів.....	85
18. Лекція №18. Перехідний процес електроприводу з лінійною механічною характеристикою при одно- і багатоступінчастому пуску при $M_c = \text{const}$; $\omega_0 = \text{const}$	91
19. Лекція №19. Перехідні процеси електроприводу з лінійною механічною характеристикою при $M_c = \text{const}$; $\omega_0 = \text{const}$ в гальмівних режимах.	94
20. Лекція №20. Перехідні процеси електропривода з лінійною механічною характеристикою.....	98
21. Лекція №21. Регулювання координат електропривода.....	102
22. Лекція №22. Система генератор-двигун постійного струму (Г-Д).....	106
23. Лекція №23. Розрахунок статичних механічних характеристик в системі Г-Д.....	112
24. Лекція №24. Розрахунок статичних механічних характеристик в системі ТП-Д.....	118
25. Лекція №25. Закони частотного регулювання асинхронними двигунами.....	121

26.	Лекція №26. Нагрів електродвигунів та основи вибору їх потужності.....	126
	Лекція №27. Нагрівання і « я двигунів при тривалому	
27.	режимі роботи з постійним навантаженням.....	130
28.	Лекція №28. Попередній вибір двигунів за потужністю.....	138
28.	Лекція №29. Перевірка допустимого навантаження двигуна за методом еквівалентного середньоквадратичного струму.....	142
30.	Лекція №30. Вибір потужності двигуна для роботи з тривалим незмінним навантаженням.....	147
31.	Лекція №31. Енергетика електроприводів.....	153
32.	Лекція №32. Втрати енергії при перехідних процесах в регульованому електроприводі і способи зменшення втрат енергії. Використана література.....	159 165

Вступ

Електроприводом називається електромеханічна система, що служить для приведення в рух робочих органів механізмів і управління їх технологічним процесом. Блок схема електроприводу як об'єкта управління може бути представлена в наступному вигляді:



Система управління (СУ) електроприводом складається з енергетичної частини та інформаційної частини. Енергетична частина – це перетворювальний пристрій, призначення якого – управління потоком енергії, що надходить з мережі, з метою регулювання режимами роботи двигуна і механізму. Перетворювальний пристрій дозволяє розширити гнучкість управління, дозволяє надати характеристикам електроприводу потрібний вид, що досягається або шляхом перетворення змінної напруги промислової частоти в постійну (випрямлену) напругу, або в змінну напругу, але іншої частоти.

Інформаційна частина СУ призначена для фіксації та обробки інформації, що надходить від ЗП і ДЗЗ (порівняння сигналів від ЗП і ДЗЗ). На основі цієї інформації виробляються сигнали управління пристроєм і двигуном. Сама ж СУ забезпечує електроприводу необхідні статичні і динамічні властивості.

Передавальний пристрій (передавальний механізм) служить для зміни швидкості або виду руху (з обертального в поступальний або навпаки). До передавального пристрою відносяться: редуктори, кривошипно-шатунні механізми, зубчато-рейкові або клино-ремінні передачі, барабани з тросами і т.п.

Основною функцією простого неавтоматизованого електроприводу, що складається тільки з електродвигуна, що живиться безпосередньо від мережі, і система управління якого включає в себе пакетний вимикач, або магнітний пускач, є приведення в рух робочого механізму з постійною швидкістю.

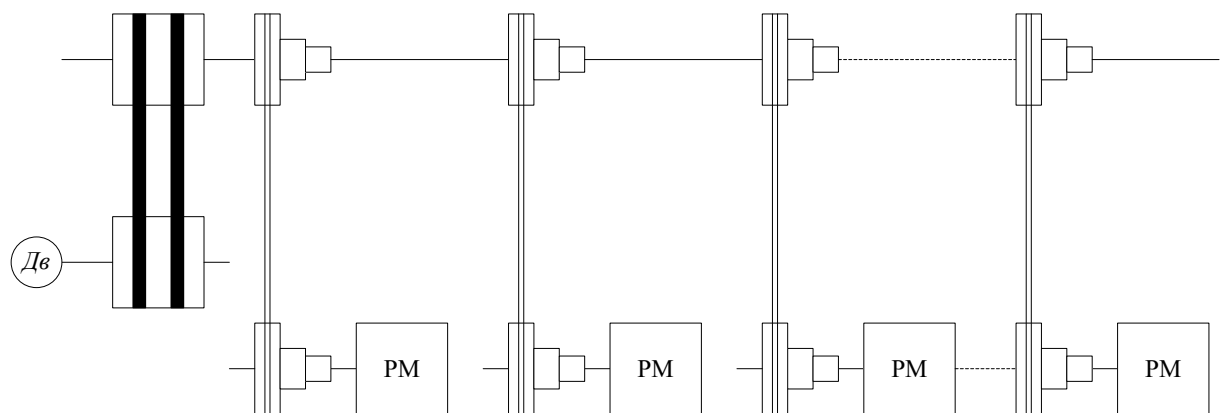
Автоматизовані електроприводи, що мають систему автоматичного управління, виконують більш широкі функції, забезпечуючи раціональний

перебіг технологічного процесу, більш високу продуктивність механізму при кращій якості продукції, що випускається.

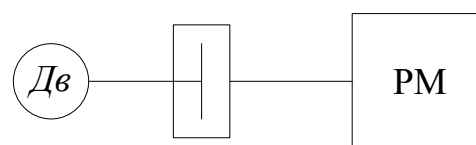
Залежно від схеми передачі енергії від мережі до робочих органів механізмів розрізняються три типи електроприводів:

1. Груповий (трансмісійний).
2. Однодвигунний або індивідуальний.
3. Багатодвигунний (теж індивідуальний).

Груповий електропривод являє собою систему, в якій один електродвигун за допомогою системи шківів і ременів (трансмісій) приводить в рух групу робочих машин або групу робочих органів однієї машини, як показано на наведеному рисунку. У такій системі неможливо регулювання окремих машин впливом на двигун. В даний час такий електропривод практично не застосовується і представляє інтерес лише з точки зору історії розвитку електроприводу.



Однодвигательный электропривод являє собою систему, в якій кожна робоча машина приводиться в рух окремим, пов'язаним тільки з нею електродвигуном, як зображено на рисунку.



Прикладом застосування однодвигунного електроприводу є прості металообробні верстати та інші нескладні механізми. У багатьох випадках привід здійснюється від електродвигуна спеціального виконання, що конструктивно представляє одне ціле з самим механізмом. Характерним прикладом повного суміщення двигуна з робочим органом механізму є торцювальна, електрична дріль. Можна назвати також електричну таль, двигун-ролик (рольганг), що застосовується в металургійній промисловості на прокатних станах. Тут нерухомий статор з обмоткою розташовується всередині рольганга, а сам ролик є ротором.

У разі застосування однодвигунного електроприводу є можливість електричними методами (впливом на електродвигун) регулювати швидкість

кожної з машин і автоматизувати їхню роботу. При цьому значно скорочується шлях передачі енергії від мережі до робочих органів, приміщення звільняються від важких трансмісій, шківів, ременів, різко знижується ймовірність нещасних випадків. Для механізмів з одним робочим органом можливий вибір для електроприводу двигуна з характеристиками, найбільш повно задовольняє вимогам виробничого процесу. Тому в даний час цей тип електроприводу є основним і має найбільше застосування.

Однак, при однодвигунному електроприводі машин з декількома робочими органами всередині машини ще зберігається система механічного розподілу енергії (за допомогою шестерень і т. п.) з притаманними їй втратами. Тому в сучасних машинах подібного роду широко застосовується багатодвигунний електропривод, при якому кожен робочий орган приводиться в рух окремим електродвигуном. Такі електроприводи застосовуються, наприклад, у складних металообробних верстатах, папероробних машинах, прокатних станах, електричних екскаваторах. При цьому значно спрощується кінематична схема машини.

Особливостями розвитку електропривода на сучасному етапі є розширення областей застосування частотно-регульованого електроприводу змінного струму, вентильного електропривода постійного струму, розширення та ускладнення його функцій, пов'язаних з управлінням технологічними процесами та відповідне ускладнення систем управління (САУ), підвищення вимог до динамічних і точнісних показників, збільшення швидкодії, надійності, економічності, зниження габаритів. Особливістю розвитку електроприводу є також уніфікація його елементної бази, створення уніфікованих комплектних тиристорних і транзисторних електроприводів, що задовольняють вимогам широкого кола механізмів.

Одним з проявів розвитку регульованого електроприводу є тенденція до спрощення кінематичних схем машин і механізмів, за рахунок створення безредукторного електроприводу з використанням спеціальних тихохідних двигунів, що мають номінальну швидкість обертання 18-120 обертів в хвилину. Область застосування – потужні електроприводи прокатних верстатів, шахтних підйомних машин, швидкісних ліфтів, основних механізмів екскаваторів.

Лекція №1. Механіка електроприводу.

1.1. Кінематична схема електроприводу. Сили і моменти, що діють в системі електроприводу.

Електропривод крім електричної частини включає в себе і механічну частину, яка передає механічну енергію від двигуна до виконавчого механізму. Конструктивно механічна частина може бути виконана по-різному. Проте, вона містить певні ланки з загальними для різних електроприводів функціями. Безпосереднє подання про рухомих масах установки електроприводу і механічних зв'язках між ними дає кінематична схема.

Кінематичні схеми конкретних електроприводів різноманітні, однак володіють загальними особливостями, які можна показати на прикладі схеми, зображеної на наступному рис. 1.1 і містить " n " обертових і " k " поступально рухомих мас.

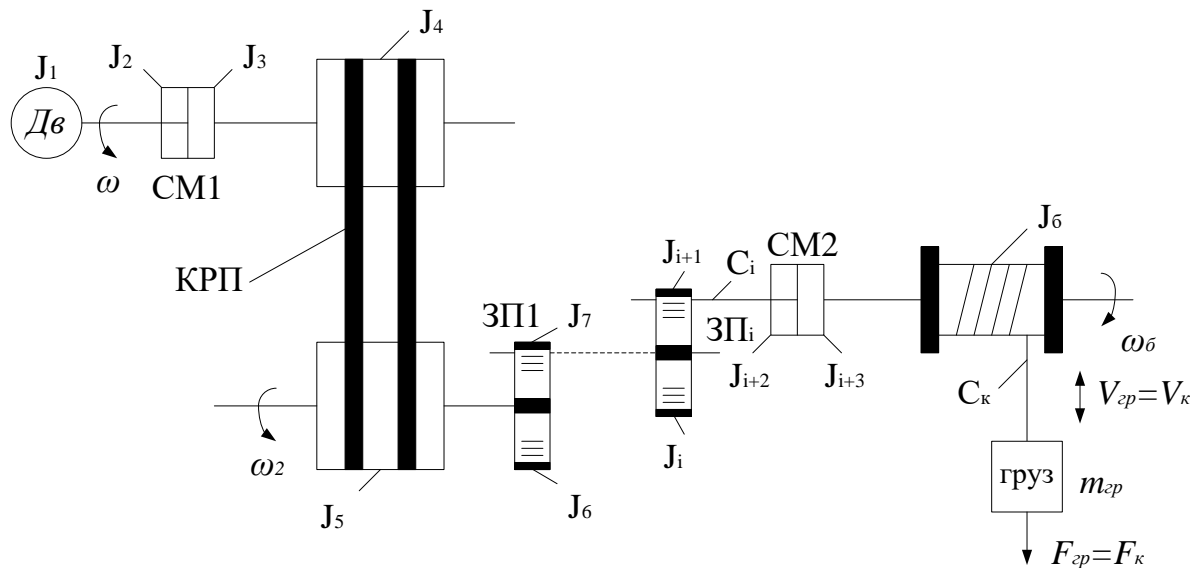


Рис.1.1.

Тут двигун Дв через сполучну муфту ЗМ1, клиноремінну передачу КРП, ряд зубчастих передач ЗП і сполучну муфту СМ2 приводить в обертання барабан, що перетворює обертальний рух в поступальний переміщення вантажу масою m . Кожен обертовий елемент володіє моментом інерції J і пов'язаний з відповідними сусіднім елементом механічним зв'язком, володіє жорсткістю C . Поступально рухомі елементи (ремені, канат) також мають жорсткість. При навантаженні елементи системи (вали, зубчасті колеса, клиноремінні передачі тощо) деформуються, так як механічні зв'язки не є абсолютно жорсткими.

Необхідно знати, що жорсткість обертового пружного елемента визначається величиною моменту, необхідного для його прокручування на 1 радіан, а жорсткість поступально рухомого елемента визначається величиною зусилля, необхідного для розтягування або стиснення пружного елемента на 1 метр.

Робочий орган виробничого механізму реалізує підведену до нього механічну енергію на корисну роботу. Він зазвичай є споживачем енергії. Але в ряді випадків він є і джерелом енергії, віддаючи її двигуну (наприклад, на вантажо-підіймальних установках).

Рух електроприводу в сталому режимі визначається дією двох моментів: електромагнітного моменту M двигуна і моменту M_c , що перешкоджає руху, тобто так званого моменту опору, який визначає статичне навантаження електро-привода. В перехідних (несталих) режимах з'являється ще так званий динамічний момент M_d .

Залежно від причини, що обумовлює виникнення M_c , розрізняють реактивні і активні (потенційні) M_c .

Реактивні сили і моменти опору з'являються тільки внаслідок руху, отже, вони залежать від швидкості. Вони завжди перешкоджають руху і змінюють свій знак при зміні напрямку руху. До таких моментів відносяться моменти тертя, різання металу або дерева і т. д., момент холостого ходу, створюваний в самому двигуні.

В протилежність реактивним активні моменти опору не змінюють свій знак при зміні напрямку руху, тобто при одному напрямку обертання двигуна вони перешкоджають руху (наприклад, при підйомі вантажу), а при іншому напрямку руху – сприяє, тобто можуть розглядатися як рушійні (наприклад, при спуску вантажу).

За характером впливу на механічні коливання всі сили і моменти діляться на консервативні й дисипативні. Консервативними називаються сили і моменти, при дії яких на систему не відбуваються поглинання енергії коливань (наприклад, сила тяжіння, робота якої за період коливань дорівнює нулю). Дисипативні сили і моменти – це ті, при дії яких на систему відбувається поглинання енергії коливань (наприклад, момент або сила тертя).

1.2. Механічні характеристики виробничих механізмів при типових навантаженнях

Для теорії і практики електроприводу велике значення мають поняття механічної характеристики робочої машини $\omega = f(M_c)$ или або $M_c = f(\omega)$.

Механічні характеристики є одним з основних критеріїв при виборі типу двигуна для виконавчого механізму. Аналітично механічні характеристики багатьох виробничих механізмів можна висловити емпіричної формулою Бланка:

$$M_c = M_0 + (M_{CH} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x,$$

де M_c і M_{CH} – статичні моменти опору механізму відповідно при швидкості ω та ω_H ; M_o – момент холостого ходу (тертя) механізму, що не залежить від швидкості.

Механічні характеристики виробничих механізмів при найбільш характерних видах навантажень (типових навантаженнях) можна розділити на наступні класи:

1. Не залежать від швидкості (див. рис. 1.4).

При цьому $X = 0$ і її рівняння $M_c = M_{CH}$. Таку характеристику мають механізми, що слугують для підйому вантажу, або механізми, в яких опір руху надають сили сухого тертя.

Сила тяжіння, як при підйомі, так і при спуску вантажу спрямована в бік спуску і незмінна за значенням. Механічна характеристика в цьому випадку має вигляд прямої 1, M_c в цьому випадку залежить від маси вантажу: $M_c = GR = mgR$ (рис 1.2) і може змінюватися в межах від $M_c = 0$ ($G = 0$) до $M_c = M_{CH}$ ($G = G_H$).

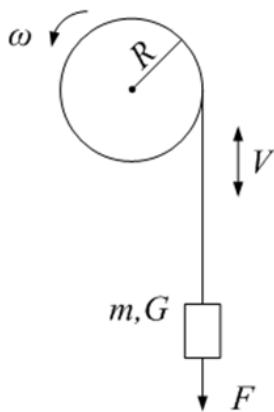


Рис.1.2.

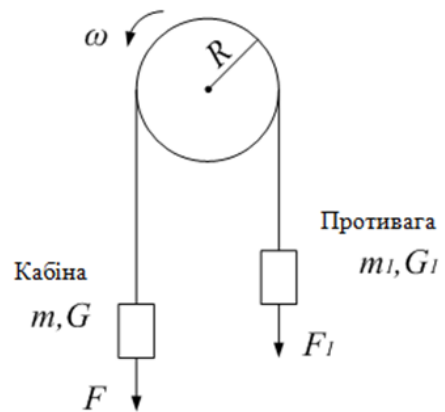


Рис.1.3.

Для зниження робочого навантаження установки з важкими вантажо-підйомними пристроями зазвичай виконуються зрівноваженими. Прикладом може служити ліфтовий підйомник або шахтний підйомник з противагою. В даному випадку корисне навантаження механізму визначається різницею сил натягу каната з боку кабіни F і з боку противаги F_1 , тобто $F_{мех} = F - F_1$ або $M_c = (G - G_1)R = g(m - m_1)R$.

Сила $F_{мех}$ (M_c) не залежить від швидкості, не змінюється при зміні напрямку руху, але на відміну від попереднього прикладу, відповідного рис 1.2. як при підйомі, так і при спуску кабіни може мати різний знак в залежності від маси вантажу, що піднімається. Так, при $G > G_1$, корисне навантаження має той же знак, що і в разі невідновженого підйомника (пряма 1 на рис. 1.4).

При $G = G_1$, $M_c = 0$, а при $G < G_1$, тобто при переміщенні ненавантаженої кабіни напрямком корисного навантаження механізму змінюється на протилежний (пряма 1').

Характеристика $\omega = f(M_c)$ для навантаження типу сухого тертя також не залежить від швидкості, але залежить від її знака (пряма 2 і 2').

2. Лінійно-зростаюча (пряма 3). В цьому випадку $x = 1$ і M_c лінійно залежить від ω . Така характеристика має місце в приводі генератора незалежного збудження при його працює на постійний зовнішній опір. Це навантаження типу в'язкого тертя. В цьому випадку $M_c = \beta_{в.т.} \cdot \omega$, де $\beta_{в.т.}$ – коефіцієнт пропорційності. На практиці таке навантаження зустрічається рідко. З урахуванням моменту холостого ходу характеристика має вигляд пунктирною прямою 3'.

3. Параболічна характеристика (крива 4). Їй відповідає $x = 2$. Момент M_c залежить від квадрата швидкості.

Таку характеристику мають механізми, що працюють по відцентровому принципу (відцентрові насоси), вентилятори, димотяги і т.д. Момент опору таких механізмів часто називають вентиляторним.

4. Нелінійно спадає характеристика (крива 5). Їй відповідає $x = -1$. Момент M_c змінюється обернено пропорційно швидкості, а потужність на валу механізму залишається постійною. Таку характеристику мають деякі токарні, розточувальні, фрезерні та інші верстати.

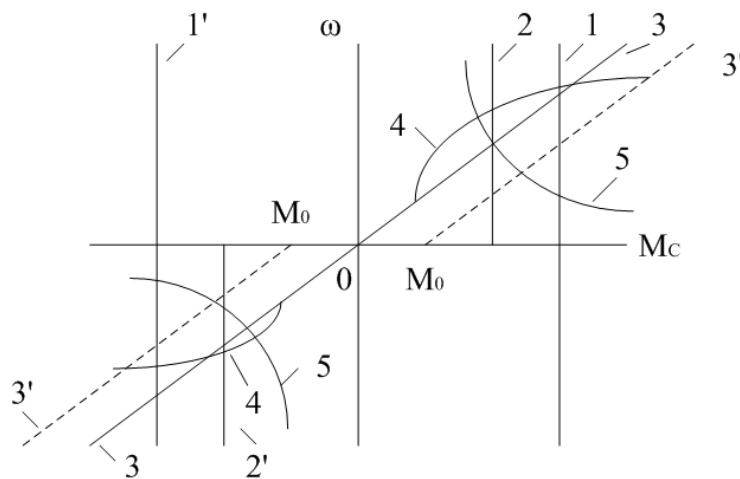


Рис.1.4.

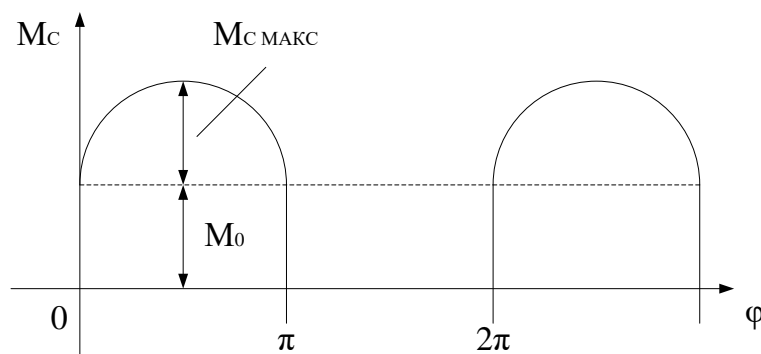


Рис 1.5

При наявності у робочій машини кривошипно-шатунної, кулісної, карданної передач, навантаження залежить від кута повороту робочого органу. Момент M_c в цьому випадку $M_c = M_0 + M_{c_{\max}} \cdot \sin \varphi$, де M_0 – момент холостого ходу (див. рис. 1.5).

До механізмів, які мають такий M_c , належать поршневі компресори, преси, ножиці для різання металу, механізми копання роторного екскаватора, шахтні підйомники з неврівноваженим канатом та інші.

Лекція №2. Приведення J , M_c , F_c , m і C -жорсткостей пружних елементів до розрахункової швидкості та розрахункові схеми механічної частини електропривода.

2.1. Загальні положення.

Зазвичай значна частина виробничих механізмів працює при невеликій швидкості робочих органів (100-300 об/хв.), в той час як двигуни виходячи з економічних міркувань конструюються на швидкості 750-3000 об/хв. Тому між двигуном і механізмом розміщується передавальний пристрій (зазвичай редуктор), окремі елементи якого рухаються з різними швидкостями.

Для вибору двигуна в більшості випадків необхідно мати навантажувальну діаграму електропроводу $M(t)$ або $P(t)$ або $I(t)$. Її можна збудувати тільки після розрахунку перехідних процесів. Для цього необхідно знати сумарний момент інерції системи і сумарний момент опору. Кінематична схема електропривода дає уявлення про механічні зв'язки між рухомими інерційними масами конкретної установки, проте вона не відображає того, що інерційні маси рухаються з різними швидкостями. Тому навіть однакові моменти інерції складати для отримання сумарного моменту інерції не можна, так як їх динамічна дія різна. Те ж можна сказати про сили і про моменти, а також поступально-рухомі мас.

Крім того, по кінематичній схемі не можна судити наскільки елементи системи при навантаженні зазнають деформації, так як вони володіють жорсткістю. Тому при практичних розрахунках з допомогою кінематичної схеми складаються розрахункові схеми механічної частини електропривода, в яких J , M_c , F_c , m , а також реальні жорсткості "С" механічних зв'язків замінюються еквівалентними величинами, приведеними до однієї розрахункової швидкості, за яку зазвичай беруть швидкість вала двигуна.

При заміні реальної системи еквівалентною системою всі J , M_c , F_c , m і C повинні бути перераховані таким чином, щоб в еквівалентній схемі було збережено рівність запасів кінетичної і потенційної енергії вихідної (реальної) системи, а також елементарної роботи всіх діючих в системі сил і моментів на можливих переміщеннях. Якщо система електропривода складається з декількох інерційних елементів, що мають моменти інерції J_1, J_2, \dots, J_m , що обертаються з кутовими швидкостями $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ (рис.2.1), і є абсолютно жорсткою, їх динамічну дію можна замінити дією одного моменту інерції $J_{\text{пр}}$, приведенного до розрахункової швидкості (вала двигуна).

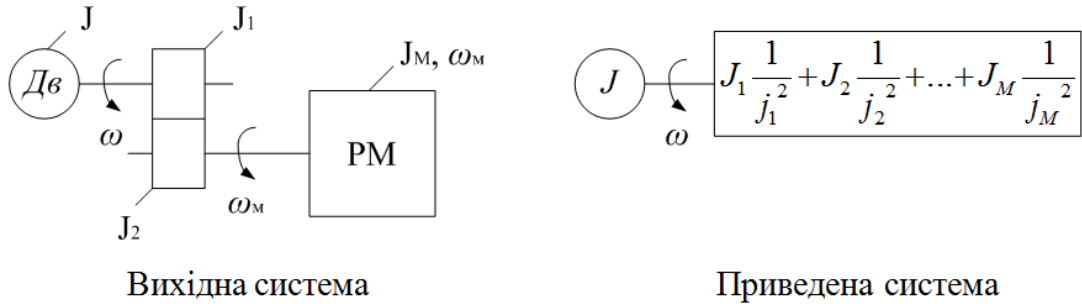


Рис.2.1.

Під ним розуміють момент інерції найпростішої системи, в якій всі елементи обертаються зі швидкістю осі, до якої проводиться приведення, і яка володіє при цьому запасом кінетичної енергії, рівним запасу енергії в вихідній системі.

В цьому випадку

$$J_{np} = J \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_M \frac{\omega_M^2}{2}.$$

Звідси

$$J_{np} = J + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + \dots + J_M \left(\frac{\omega_M}{\omega} \right)^2 = J + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \dots + J_M \frac{1}{j_M^2},$$

де j_1, j_2, \dots, j_M – передавальні відношення між віссю (валом) двигуна і осями окремих обертових елементів.

Часто приведений момент інерції системи вважають рівним сумі моментів інерції двигуна і приведенного моменту інерції робочої машини, а моменти інерції ланок передавального механізму (редуктора) враховують збільшення моменту інерції двигуна в "δ" раз, тобто

$$J_{np} = \delta \cdot J + J_M \cdot \frac{1}{j_M^2},$$

де $\delta = 1,1 \div 1,3$.

Аналогічно виконується приведення мас, що рухаються поступально зі швидкістю V до розрахункової швидкості.

Замінімо, наприклад, систему підйомника, зображену на рис.2.2, еквіва-лентною системою, що містить тільки обертові елементи.

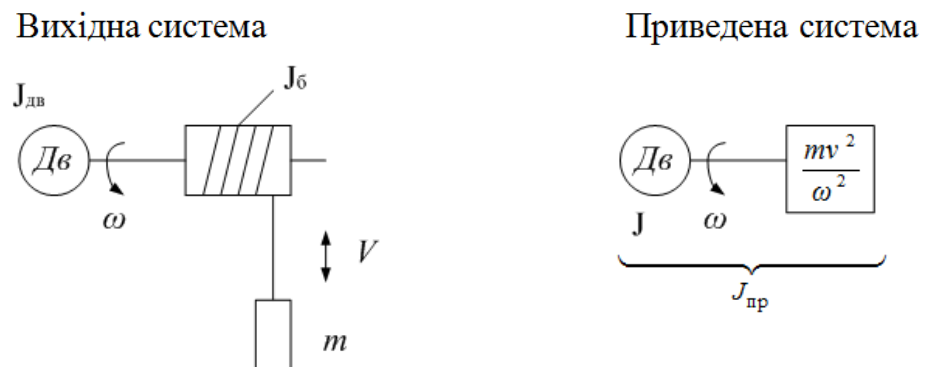


Рис.2.2.

Оскільки двигун і барабан обертається з однаковою швидкістю, їх моменти інерції можна скласти, позначивши $J_{об} + J_6 = J$.

Баланс запасів кінетичної енергії

$$J_{np} \cdot \frac{\omega^2}{2} = J \cdot \frac{\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}.$$

Звідси

$$J_{np} = J = \frac{mv^2}{\omega^2} = J + J'.$$

В цьому випадку приведена до обертального руху маса еквівалентна моменту інерції J' .

У загальному випадку приведення до обертального руху поступально рухається зі швидкістю V_j маси m_j до розрахункової швидкості проводиться з умов рівності запасів енергії:

$$J_{np} \cdot \frac{\omega^2}{2} = \frac{m_j \cdot v_j^2}{2};$$

Звідки

$$J_{np} = m_j \cdot \left(\frac{v_j}{\omega} \right)^2 = m_j \cdot \rho_j^2,$$

де ρ_j - радіус приведення.

Приведення статичних моментів опору M_c і статичних зусиль F_c елементів кінематичного ланцюга здійснюється на основі рівності елементарної роботи на можливих переміщеннях.

$$M_{np,i} \cdot \Delta\varphi_{np,i} = M_{c,i} \cdot \Delta\varphi_i \quad \text{і} \quad M_{np,j} \cdot \Delta\varphi_{np,j} = F_{c,j} \cdot \Delta S_j;$$

Звідси

$$M_{np,i} = M_{c,i} \cdot \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\varphi_{np,i}} = M_{c,i} \cdot \frac{1}{J_i}; \quad M_{np,j} = F_{c,j} \cdot \frac{\Delta S_j}{\Delta\varphi_{np,j}} = F_{c,i} \cdot \rho_j.$$

Приведення жорсткостей C пружних елементів здійснюється за умови збереження незмінної величини потенційної енергії деформації реальної і еквівалентної систем. Для цього потрібно знати реальну жорсткість пружного елемента і кінетичні параметри системи. Якщо, наприклад, ділянка кінематичного ланцюга з жорсткістю C_i (див. рис.2.3) при прокручуванні відчуває деформацію $\Delta\varphi_i$, то потенційна енергія деформації елемента при цьому дорівнює

$$W = \frac{C_i \cdot \Delta\varphi_i^2}{2}.$$

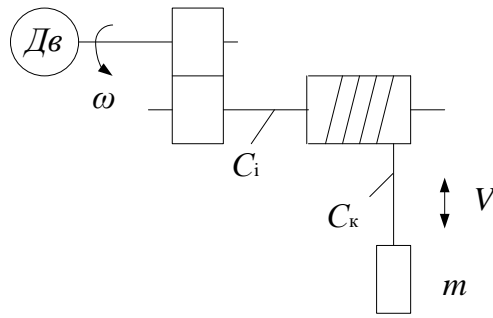


Рис.2.3.

Тримасова система

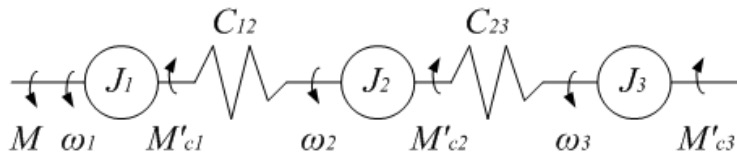


Рис.2.4.

Двомасова система

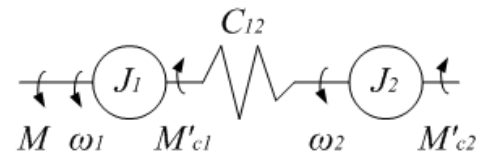


Рис.2.5.

Одномасова система

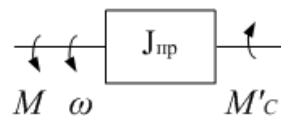


Рис.2.6.

У тримасовій розрахунковій схемі J_1 – це сумарний момент інерції ротора або якоря двигуна і інших елементів, приведених до валу двигуна, жорстко пов'язаних з двигуном. До інерційної маси J_1 прикладений електромагнітний момент M двигуна і момент статичного навантаження M'_{c1} , який зазвичай є сумарним моментом втрат на валу двигуна і жорстко з ним пов'язаних елементах. Інерційна маса J_2 є проміжною. До неї прикладений момент опору M'_{c2} . Інерційна маса J_3 являє собою сумарний момент інерції робочого органу механізму та інших інерційних елементів, жорстко пов'язаних і приведених до валу двигуна. До неї прикладений момент зовнішнього навантаження M_{c3} цієї маси. C_{12} і C_{23} – це приведені жорсткості пружних зв'язків між J_1 та J_2 , J_2 і J_3 .

У двомасовій розрахунковій схемі J_1 і J_2 – це теж, що J_1 і J_3 тримасової схеми. Пружний зв'язок між J_1 та J_2 характеризується жорсткістю C_{12} .

Зазвичай тримасова схема використовується для детального аналізу умов руху механізму. Для дослідження окремих фізичних особливостей тримасова розрахункова схема зводиться до двомасової. Електромеханічна система з двомасовою пружною механічною частиною являє собою найпростішу модель електроприводу, найбільш зручну для вивчення пружних зв'язків.

У тих випадках, коли вплив пружних зв'язків незначний або ними можна знехтувати, механічна частина електропривода видається простою

розрахунковою схемою (див. рис.2.6) – жорсткою приведеною механічною ланкою, тобто багатомасова механічна частина електропривода з моментами інерції J_1, J_2 і т. д. замінюється дією одного моменту інерції $J_{пр}$, приведенного до розрахункової швидкості. Сумарний наведений момент інерції електропривода в цьому випадку визначається як:

$$J_{пр} = J_{\Sigma} = J + \sum_{i=2}^n J_i \cdot \frac{1}{j_i^2} + \sum_{j=1}^k m_j \cdot \rho_j^2,$$

де J – момент інерції ротора або якоря двигуна, а n, k – число інерційних елементів електроприводу, що здійснюють відповідно обертальний і поступальний рух.

Сумарний приведений до валу двигуна момент опору в загальному вигляді можна представити як:

$$M_c = M_{спр} = \sum_i^q M_i \cdot \frac{1}{j_i} + \sum_{j=1}^p F_j \cdot \rho_j,$$

де p, q – число зовнішніх моментів M_i і сил F_j , прикладених до системи крім електромагнітного моменту двигуна.

2.2. Операція приведення величин.

Приведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої може бути вироблено на підставі енергетичного балансу системи. При цьому втрати потужності в проміжних передачах враховуються введенням в розрахунки відповідного ККД – η_n . На підставі рівності потужностей отримаємо

$$M_{см} \cdot \omega_m \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_d.$$

Звідси

$$M_c = M_{см} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_d} \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_{см} \cdot \frac{1}{i \eta_n}.$$

де $M_{см}$ – момент опору виробничого механізму (Нм), M_c – той же момент опору, приведенний до швидкості вала двигуна, ω_d – кутова швидкість вала, ω_m – кутова швидкість вала виробничого механізму, $i = \omega_d / \omega_m$ – передавальне число. При наявності декількох передач між двигуном і механізмом з передавальними числами i_1, i_2, \dots, i_n і відповідними ККД $\eta_{n1}, \eta_{n2}, \dots, \eta_{nn}$ момент опору, приведенний до швидкості вала двигуна, визначається формулою

$$M_c = M_{см} \cdot \frac{1}{i_1 i_2 \dots i_n} \cdot \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \dots \eta_{nn}}.$$

Приведення сил опору проводиться аналогічно приведення моментів. Якщо швидкість поступального руху V , м/с, а кутова швидкість вала двигуна ω_d , рад / с, то

$$F_{cm} \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_\delta,$$

де F_{cm} – сила опору виробничого опору виробничого механізму, Н.

Звідси приведений до валу двигуна момент опору дорівнює

$$M_c = F_{cm} \cdot V / \omega_\delta \eta_n.$$

Приведення моментів інерції до однієї осі обертання засноване на тому, що сумарний запас кінетичної енергії рухомих частин приводу, віднесений до однієї осі, залишається незмінним. При наявності обертових частин, що володіють моментами інерції $J_\delta, J_1, J_2 \dots J_n$ і кутовими швидкостями $\omega_\delta, \omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$, можна замінити їх динамічну дію дією одного моменту інерції, приведенного, наприклад, до валу двигуна. В такому випадку можна записати:

$$J \cdot \frac{\omega_\delta^2}{2} = J_\delta \cdot \frac{\omega_\delta^2}{2} + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{2}.$$

Звідси результуючий чи сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна

$$J = J_\delta + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_\delta} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_\delta} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega_\delta} \right)^2.$$

де J_δ – момент інерції ротора двигуна та інших елементів (муфти, шестерні і т. п.), установлених на валу двигателя.

Приведення мас, що рухаються поступально здійснюється також на основі рівності запасу кінетичної енергії

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

Звідси момент інерції, приведений до валу двигуна дорівнює

$$J = m(v/\omega_\delta)^2.$$

Лекція №3. Механічні характеристики електроприводів. Усталені режими.

3.1. Жорсткість механічної характеристики

Жорсткість механічної характеристики електроприводу – це відношення різниці моментів, що розвиваються електродвигунні пристроєм, до відповідної різниці кутових швидкостей електроприводу, тобто

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega = dM / d\omega.$$

Зазвичай на робочих ділянках механічні характеристики двигунів мають негативну жорсткість $\beta < 0$, тобто зі збільшенням моменту швидкість зменшується.

Поняття жорсткості може бути застосовано і до механічних характеристиках виробничих механізмів. Ці характеристики можна оцінювати жорсткістю

$$\beta_c = dM_c / d\omega.$$

Роботі електричного двигуна і виробничого механізму в сталому режимі відповідає рівновагу моменту опору механізму і крутного моменту двигуна при певній швидкості, тобто $M = M_c$. Зміна моменту опору на валу двигуна при-зводить до того, що швидкість двигуна і момент, який він розвиває, можуть автоматично змінюватися і привід продовжуватиме стійко працювати при іншій швидкості з новим значенням моменту.

Для відновлення рівноваги між зміненим моментом опору і моментом двигуна у всіх неелектричних двигунах потрібна участь спеціальних регуляторів, які впливають на джерело енергії, збільшуючи або відповідно зменшуючи подачу води, палива або пара. В двигунах роль автоматичного регулятора може виконувати ЕРС двигуна. Ця особливість електродвигунів автоматично підтриму-вати рівновагу системи при змінному моменті опору є дуже цінним властивістю, так як у багатьох випадках момент може змінюватися в тій чи іншій мірі.

Привід статично стійкий, якщо в точці сталого режиму виконується умова

$$dM / d\omega - dM_c / d\omega = \beta - \beta_c < 0. \quad (3.1)$$

Умова означає, що привід статично стійкий, якщо при додатньому збільшенні кутової швидкості момент двигуна виявиться менше статичного моменту (моменту опору) і привід внаслідок цього загальмується до попереднього значення швидкості. При від'ємному збільшенні кутової швидкості момент двигуна виявиться більше моменту опору і привід внаслідок цього розженеться до попереднього значення швидкості. Привід статично нестійкий, якщо в точці сталого режиму умова (3.1) не виконується.

Зазвичай при проектуванні електроприводу механічна характеристика виробничого механізму є вже заданою. Тому для одержання стійкої роботи в сталому режимі для певних швидкостей і моментів опору виробничих механізмів необхідно підбирати механічну характеристику електродвигуна відповідної форми. Це може бути досягнуто підбором відповідного типу електродвигуна і зміною електричних параметрів його кіл. Іноді для одержання необхідних механічних характеристик доводиться застосовувати спеціальні схеми вмикання електричних машин і апаратів.

3.2. Рівняння руху електропривода

Вище були розглянуті умови роботи електропривода в сталому режимі, коли момент, що розвивається двигуном, дорівнює моменту опору механізму і швидкість приводу є постійною. Однак у багатьох випадках привід прискорю-ється або сповільнюється, і тоді виникає інерційна сила або інерційний момент, що двигун повинен долати, перебуваючи в перехідному режимі. Таким чином, перехідним режимом електропривода називають режим роботи при переході від одного усталеного стану до іншого, коли змінюються швидкість, момент і струм.

Причинами виникнення перехідних режимів в електроприводах є або зміна навантаження, пов'язане з виробничим процесом, який вплив на електропривод при управлінні ним, тобто пуск, гальмування, реверс і т.п. Перехідні режими в електроприводах можуть виникнути також внаслідок аварій або порушення нормальних умов електропостачання (наприклад, зміни напруги або частоти мережі тощо).

Рівняння руху електропривода має враховувати всі сили і моменти, що діють в перехідних режимах.

При поступальному русі рушійна сила F завжди врівноважується силою опору машини F_c та інерційною силою $F_{дин} = m \frac{dv}{dt}$, що виникає при змінах швидкості.

Відповідно до викладеного рівняння рівноваги сил при поступальному русі записується так:

$$F - F_c = m \frac{dv}{dt}. \quad (3.2)$$

Аналогічно рівняння рівноваги моментів для обертального руху (рівняння руху привода) має наступний вигляд:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3) показує, що розвиваючий двигуном обертаючий момент M врівноважується моментом опору на його валу M_c та інерційним або динамічним моментом $M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}$. В (3.2) і (3.3) прийнято, що маса тіла і відповідно момент інерції привода є постійними, що справедливо для значного числа виробничих механізмів. З аналізу (3.3) видно:

- 1) при $M > M_c$ $d\omega/dt > 0 > 0$, тобто має місце прискорення приводу;
- 2) при $M < M_c$ $d\omega/dt < 0 < 0$, тобто має місце уповільнення приводу (очевидно, що уповільнення приводу може бути і при від'ємному значенні моменту двигуна);
- 3) при $M = M_c$ $d\omega/dt = 0 = 0$, в даному випадку привід працює в сталому режимі.

Обертаючий момент, що розвивається двигуном при роботі, прийнято вважати додатнім, якщо він спрямований у бік руху привода. Якщо він спрямований у бік, протилежний рухові, то він вважається від'ємним.

Рівняння руху дозволяє проводити аналіз відповідності залежностей швидкості $\omega = f(t)$ і моменту двигуна $M = f(t)$ в реальних осцилограмах. Покажемо це на конкретних прикладах.

На рис.3.1 наведена осцилограма пуску електропривода при активному моменті опору (підйом вантажу). Для аналізу весь процес пуску розбиваємо на 4 етапи.

Перший етап $0 \div t_1$. На цьому етапі момент двигуна зростає від 0 до M_c , динамічний момент $M_{дин} = M - M_c < 0$ внаслідок чого прискорення приводу

$\frac{d\omega}{dt} < 0$, а привід під дією активного моменту опору (під дією вантажу) розганяється у зворотний бік. При $t = t_1$ $M_{дин} = M - M_c = 0$ прискорення $\frac{d\omega}{dt} = 0$ в кривій швидкості настає перелом (дотична до кривої швидкості паралельна осі часу).

Другий етап $t_1 \div t_2$. На цьому етапі момент двигуна від M_c збільшується до максимального $M_{мак}$, що забезпечує зростання прискорення від 0 до максимального $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{мак}$ (нахил дотичних кривої швидкості до осі часу збільшується).

Третій етап $t_2 \div t_3$. На цьому етапі момент двигуна $M = M_{мак} = const$, прискорення $\frac{d\omega}{dt} = (\frac{d\omega}{dt})_{мак} = const$ (швидкість змінюється за лінійним законом).

Четвертий етап $t_3 \div t_4$. На цьому етапі момент двигуна зменшується від $M_{мак}$ до M_c , прискорення $(\frac{d\omega}{dt})_{мак}$ знижується від до нуля.

Вище викладеної підтверджується побудованої залежності.

$$M_{дин} = M - M_c \equiv \frac{d\omega}{dt} = f(t).$$

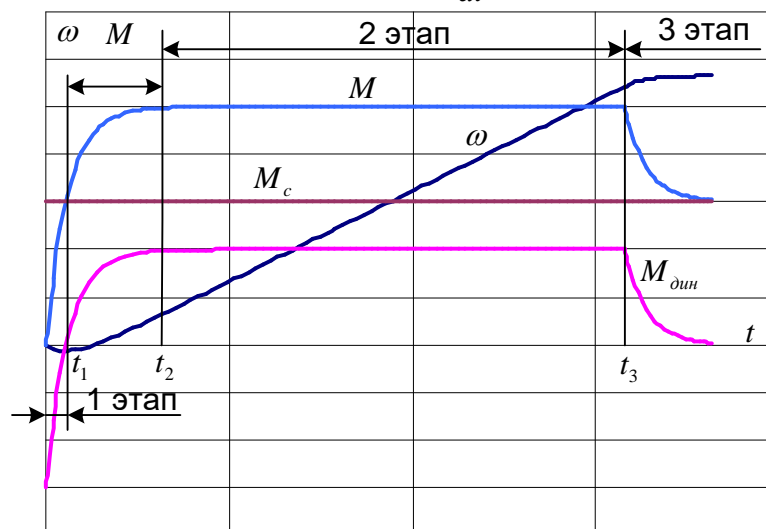


Рис.3.1. Осцилограма пуску електроприводу при активному моменті опору.

На рис.3.2 наведена осцилограма пуску електроприводу при реактивному моменті опору. Основною відмінністю від попереднього випадку є 1 етап. На цьому етапі $M < M_c$ швидкість приводу $\omega = 0$.

На рис.3.3 наведена осцилограма реверсу електроприводу. Для аналізу весь процес пуску розбиваємо на 4 етапи.

Перший етап $0 \div t_1$. На цьому етапі момент двигуна змінюється від M_c до $M_{т,мак}$, динамічний момент $M_{дин} = M - M_c < 0$ внаслідок чого прискорення приводу $\frac{d\omega}{dt} < 0$ і привід гальмується під дією моменту опору і гальмівного

двигуна. При $t = t_1$ момент двигуна досягає значення $M_{т,мак}$, що забезпечує зростання прискорення від 0 до максимального $\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{мак}$.

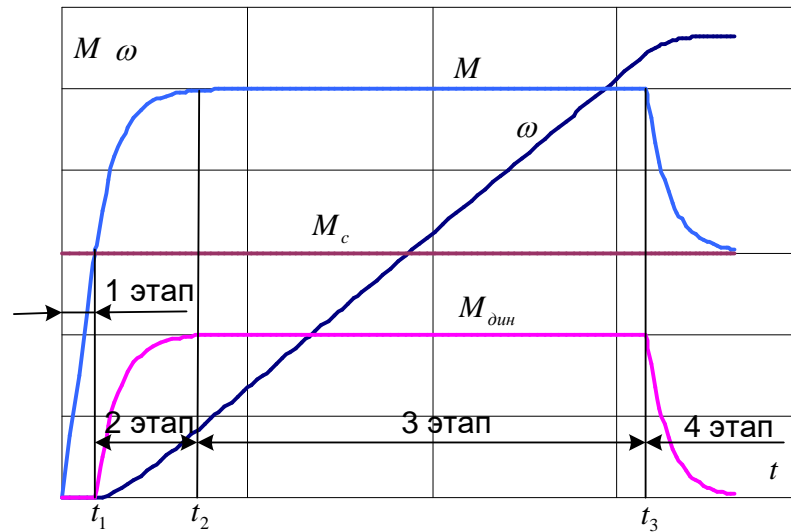


Рис.3.2. Осцилограма пуску електроприводу при реактивному моменті опору.

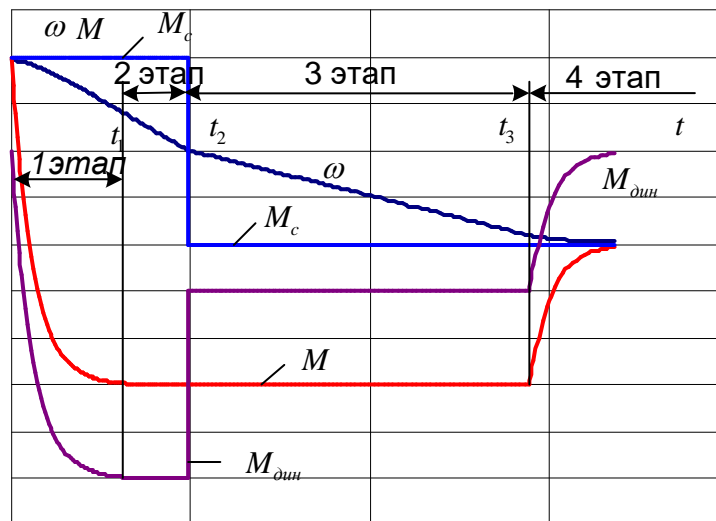


Рис.3.3. Осцилограма реверсу.

На 2 етапі момент двигуна $M = M_{т,мак} = const$, динамічний момент $M_{дин} = M_{т,мак} - M_c = -(|M_{т,мак}| + M_c)$, прискорення $\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{т,мак} = const$, швидкість зменшується за лінійним законом до нуля. При $t = t_2$ швидкість $\omega = 0$, момент опору M_c змінює свій знак.

На 3 етапі момент двигуна $M = M_{раз,мак} = M_{т,мак} = const$, динамічний момент $M_{дин} = M_{раз,мак} + M_c = -(|M_{раз,мак}| - M_c)$, прискорення $\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{раз,мак} = const$, швидкість збільшується за лінійним законом в зворотну сторону. Динамічний момент по абсолютній величині на 3 етапі в порівнянні з 2

зменшується, а значить і прискорення по абсолютній величині на цьому етапі менше.

На 4 етапі момент двигуна по абсолютній величині зменшується від $M_{\text{мак}}$ до M_c , прискорення знижується від до нуля. Вище викладене підтверджується побудованою залежністю.

$$M_{\text{дин}} = M - M_c \equiv \frac{d\omega}{dt} = f(t).$$

На рис.3.4 наведено осцилограма ударного прикладання навантаження. Характер перехідного процесу коливальний.

Відповідність кривих перепаду швидкості $\Delta\omega = f(t)$ і моменту двигуна $M = f(t)$ наочно характеризуються такими характерними точками.

При $t = t_1, t = t_3$, момент двигуна досягає значення моменту опору M_c , а це значить $M_{\text{дин}} = M - M_c = 0$ прискорення $\frac{d\omega}{dt} = 0$ в кривій швидкості настає перелом (дотична до кривої швидкості паралельна осі часу).

При $t = t_2$, момент двигуна досягає максимального значення, а це значить, що динамічний момент $M_{\text{дин}} = M - M_c$ і прискорення $\frac{d\omega}{dt}$ максимальні.

При $t = t_4$, момент двигуна досягає мінімального значення, а це значить, що динамічний момент $M_{\text{дин}} = M - M_c < 0$ абсолютній величині на цьому етапі максимальний і прискорення (уповільнення) $\frac{d\omega}{dt}$ також максимальне.

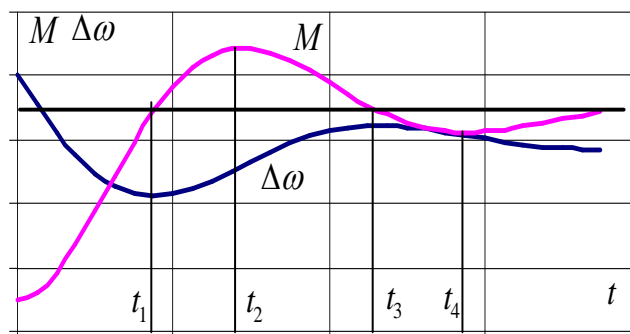


Рис.3.4. Осцилограма ударного прикладання навантаження.

3.3. Час прискорення і уповільнення приводу

Визначення часу перехідних процесів засноване на інтегруванні рівняння руху приводу. Розділяючи перемінні, отримуємо

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

Час, необхідний для зміни швидкості приводу від ω_1 до ω_2 :

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M - M_c} d\omega. \quad (3.4)$$

Для розв'язку цього інтеграла необхідно знати залежності моментів двигуна і механізму від швидкості. У найпростішому випадку, прийнявши $M = const$, і $J = const$, отримаємо:

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

Цим рівнянням можна скористатися, наприклад, для розрахунку часу пуску приводу. Якщо значення моменту двигуна під час пуску позначити через M_n , то отримаємо такий вираз для часу пуску від стану спокою до кінцевої швидкості $\omega_{ном}$, відповідної заданому моменту опору

$$t_n = J\omega_{ном}/(M_n - M_c).$$

Якщо потрібно точно врахувати час перехідного процесу і момент двигуна не може бути прийнятий постійним, наприклад при пуску двигуна з короткозамкненим ротором, необхідно користуватися (3.4).

З (3.4) видно, що теоретично повне час перехідного процесу дорівнює нескінченності. Дійсно, оскільки перехідний процес закінчується при настанні рівності моментів ($M = M_c$), то величина, що стоїть під знаком інтеграла, прямує до нескінченності. У розрахунках зазвичай вважають, що процес розгону закінчується при швидкості $\omega = 0,95\omega_2$, тоді час пуску отримає кінцеве значення.

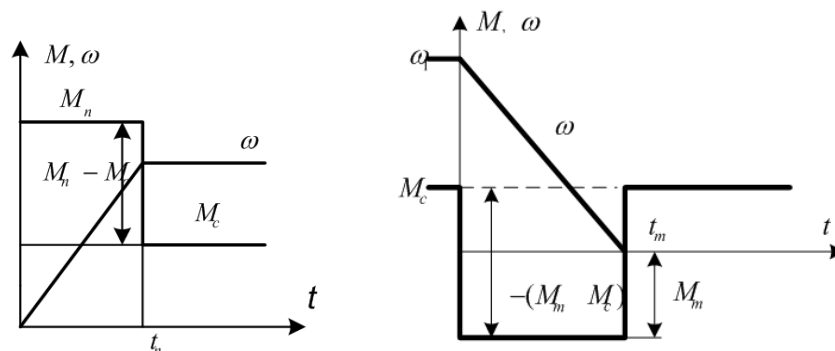


Рис.3.5. Графіки пуску і гальмування приводу.

У тих випадках, коли динамічний момент має від'ємне значення, привід сповільнюється. Як зазначалося вище, для такого випадку рівняння моментів матиме вигляд

$$M - M_c = M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} < 0.$$

Момент двигуна може бути як негативним, так і позитивним. При позитивному моменті він повинен бути менше моменту опору $M < M_c$. З останнього рівняння випливає, що час гальмування

$$t_m = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{Jd\omega}{(M - M_c)} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{Jd\omega}{-(M - M_c)}.$$

Приймаючи як частковий випадок $J = const$, $M = const$, $M_c = const$, отримаємо:

$$t_m = J \frac{\omega_1 - \omega_2}{-(M - M_c)}$$

Користуючись рівнянням (2.19), можна розрахувати час гальмування ($\omega_2 = 0$) для графіка моменту, показаного на рис. 2.10.

Якщо момент двигуна і момент статичний знаходяться в складній залежності від швидкості, рівняння руху вирішується чисельними методами.

Лекція №4. Поняття про електромеханічні і механічні характеристики і режими роботи двигунів.

4.1. Загальні положення.

Важливе значення для теорії і практики електроприводів мають електромеханічні $\omega = f(I)$ і механічні характеристики $\omega = f(M)$ двигунів. Механічні характеристики двигунів в поєднанні з рівняннями руху електроприводу дозволяють досліджувати рух електромеханічних систем в цілому. Залежно від режиму роботи електромеханічні і механічні характеристики поділяються на статичні і динамічні. Статична механічна характеристика являє собою геометричне місце точок на площині $[\omega, M]$, відповідних сталому режимам роботи, а динамічна характеристика – геометричне місце точок на тій же площині, кожної з яких відповідає певний момент часу. Як приклад на рис. 4.1 зображені статична і динамічна механічні характеристики асинхронного двигуна для режиму пуску вхолосту.

При зміні навантаження на валу двигуна швидкість його змінюється. Величиною, що характеризує ступінь її зміни, є жорсткість. Статична жорсткість характеристики визначається як відношення приросту моменту до приросту швидкості $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{dM}{dt}$.

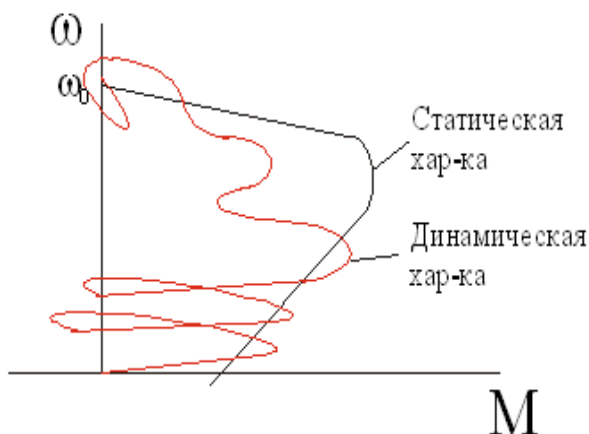


Рис.4.1.

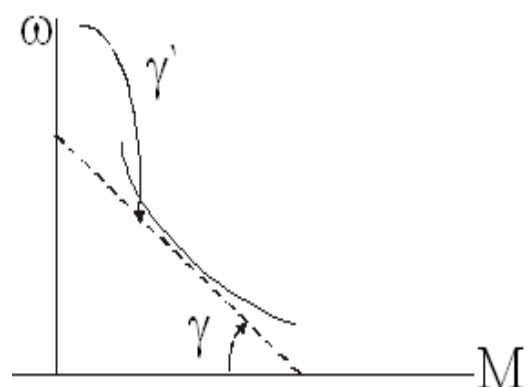


Рис.4.2.

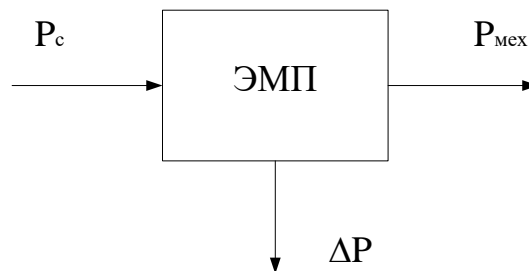
Статичні характеристики двигунів мають негативну жорсткість, якщо при збільшенні навантаження швидкість їх зменшується.

У динамічних режимах роботи електроприводу жорстка і навіть абсолютно жорстка статична характеристика перетворюється в м'яку або має змінну жорсткість як видно з рис.4.1. Тому для правильного твердження про

жорсткість характеристик двигуна або електроприводу в цих режимах використовується поняття динамічної жорсткості. Модуль динамічної жорсткості визначається як відношення амплітуд сталих гармонійних коливань моменту і кутової швидкості щодо середніх значень $|\beta_g| = \frac{\Delta M_g}{\Delta \omega_g}$ при $\Delta \omega_g \rightarrow 0$.

4.2. Режими роботи електроприводів.

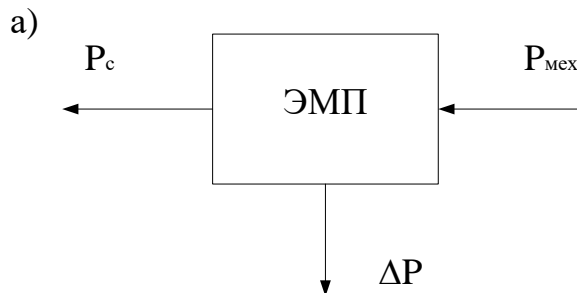
Основним режимом роботи ЕМП і двигуна є двигунний, при якому потужність, споживана з мережі P_c , в основному перетворюється в механічну $P_{мех}$, а інша частина ΔP втрачається у вигляді тепла в обмотках і сталі машини.



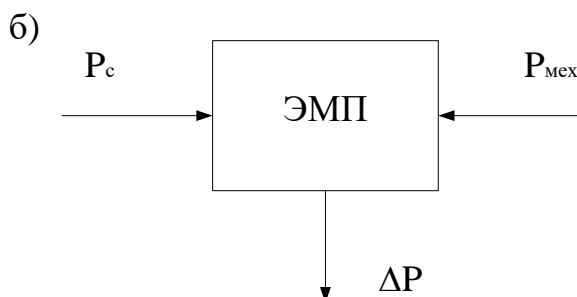
До гальмівних, тобто генераторних, відносяться режими:

а) рекуперативного гальмування; б) противмикання; в) динамічне гальмування.

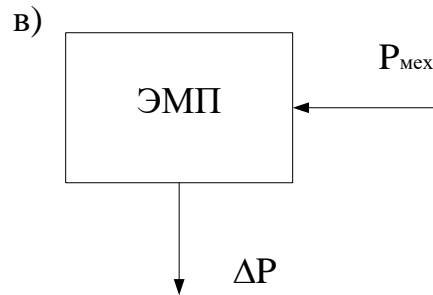
У режимі рекуперативного гальмування механічна потужність $P_{мех}$, що надходить з вала механізму, перетворюється в електричну P_c і віддається в мережу за винятком втрат в обмотках і сталі.



У режимі противмикання двигун споживає потужність P_c з мережі та з валу механізму $P_{мех}$ і вся вона втрачається у вигляді тепла в обмотках і сталі.



У режимі динамічного гальмування двигун відключений від мережі, працює автономним генератором. Вся механічна потужність, що надходить з вала механізму, перетворюється в електричну і розсіюється у вигляді тепла в обмотках і стали машини.



Процес електромеханічного перетворення енергії супроводжуються втра-тами енергії, що викликають нагрівання машини. Чим більше її навантаження, тим більше тепла виділяється в машині, тим вище температура її елементів. Максимально допустима температура t двигуна обмежується максимально допустимим нагріванням ізоляції, тому що перевищення допустимої температури t різко скорочує термін служби ізоляції. Звідси впливає обмеження по нагріванню. Однак обмеження по нагріванню не виключає можливість коротко-часного перенавантаження двигуна, тому що за час такого навантаження температура t двигуна різко змінитися не зможе.

Розрізняють, також перевантажувальну здатність двигуна по струму

$$\lambda_I = \frac{I_{don}}{I_H} \text{ і по моменту } \lambda_M = \frac{M_{don}}{M_H}.$$

Перевантажувальна здатність двигунів постійного струму обмежується умовами комутації, а двигунів змінного струму – найбільшим моментом, який машина способу розвинути при номінальній напрузі і номінальному збудженні (для синхронних двигунів).

Перевантажувальна здатність двигунів постійного струму з моменту λ_M не повинна бути менше 2,5. Для кранових і металургійних двигунів постійного струму в залежності від потужності і способу збудження становить $\lambda_M = 2,5 \dots 5,5$.

Перевантажувальна здатність двигунів постійного струму по струму становить $\lambda_I = 1,5 \dots 3,6$, а для двигунів з гладким якорем $\lambda_I = 6 \dots 8$.

Перевантажувальна здатність асинхронних двигунів (АД) тривалого режиму по моменту $\lambda_M = 1,7 \dots 2,2$, а для кранових і металургійних двигунів вона більша 2,3. Перевантажувальна здатність АД і синхронних двигунів по струму не нормується.

Перевантажувальна здатність синхронних двигунів (миттєва) по моменту $\lambda_M = 2,5 \dots 3$, а за рахунок форсування збудження може бути доведена до 3,5...4.

Лекція №5. Природні і штучні електромеханічні і механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження.

5.1. Загальні положення.

Принципова схема двигуна незалежного збудження (ДНЗ) зображується так, як показано на рис.5.1. Обмотка збудження (ОЗ) живиться від незалежного джерела постійного струму. При підключенні ОЗ до обмотки якоря машина перетворюється в двигун паралельного збудження. Для регульованих електроприводів зазвичай використовується ДНЗ.

Процеси електромеханічного перетворення енергії ДНЗ описуються наступними рівняннями.

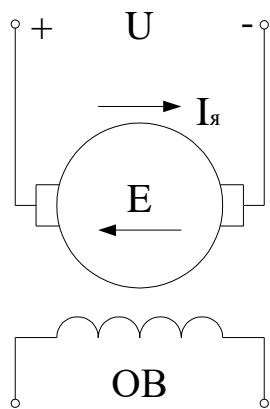


Рис.5.1.

$$U_{\epsilon} = i_{\epsilon} \cdot R_{\epsilon} + L_{\epsilon} \cdot \frac{di_{\epsilon}}{dt} = i_{\epsilon} \cdot R_{\epsilon} (1 + T_{\epsilon} \cdot p).$$

$$U_{\text{я}} = i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} + L_{\text{я}\Sigma} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + k\phi \omega = i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma} (1 + T_{\text{я}} \cdot p) + k\phi \omega.$$

$$M = k\phi \cdot i_{\text{я}}.$$

Тут $R_{\text{я}\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}} + R_{\text{ко}}.$

$$L_{\text{я}\Sigma} = L_{\text{я}} + L_{\text{д.п}} + L_{\text{ко}}.$$

$$T_{\epsilon} = \frac{L_{\epsilon}}{R_{\epsilon}} - \text{електромагнітна постійна обмотка збудження } T_{\epsilon} = (0,5 \div 5) \text{ с.}$$

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}} - \text{електромагнітна постійна обмотка якоря } T_{\text{я}} = (0,01 \div 0,1) \text{ с.}$$

K - конструктивний коефіцієнт, що дорівнює $\frac{N \cdot p_{\text{п}}}{2\pi a}$, де

N - число активних провідників обмотки якоря;

p - число пар полюсів машини;

a - число пар паралельних гілок обмотки якоря;

$k\phi \omega$ - ЕРС обертання якоря;

$$k\phi = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma}}{\omega_{\text{н}}} - \text{коефіцієнт ЕРС машини;}$$

$R_{\text{я}}$ - опір обмотки якоря;

$R_{\text{дп}}$ - опір обмотки додаткових полюсів;

$R_{ко}$ - опір компенсаційної обмотки (для машини потужністю 100 і вище кВт).

Зазвичай ДНЗ працює при $\Phi = \Phi_n = \text{const}$. При цьому вище написані рівняння лінеарізуються і після перетворень (рішення щодо швидкості ω) отримаємо рівняння електромеханічної характеристики.

$$\omega = \frac{U_{я}}{k \cdot \phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{k \cdot \phi} \cdot i_{я} - \frac{L_{я\Sigma}}{k \cdot \phi} \cdot \frac{di_{я}}{dt}.$$

5.2. Характеристики двигунів.

Виразивши струм якоря через момент $i_{я} = \frac{M}{k\phi}$, отримаємо рівняння механічної характеристики

$$\omega = \frac{U_{я}}{k \cdot \phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{(k \cdot \phi)^2} \cdot M - \frac{L_{я\Sigma}}{(k \cdot \phi)^2} \cdot \frac{dM}{dt}.$$

У сталому режимі $\frac{di_{я}}{dt} = \frac{dM}{dt} = 0$. Тому рівняння запишуться в наступному вигляді:

$$\omega = \frac{U_{я}}{k \cdot \phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{k \cdot \phi} \cdot I_{я};$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{k \cdot \phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{(k \cdot \phi)^2} \cdot M.$$

Ці рівняння показують, що при $U = U_{я} = \text{const}$ і $\phi = \text{const}$ характеристики є прямими з початковою ординатою, що відповідає швидкості ідеального холостого ходу двигуна $\omega_0 = \frac{U_{я}}{k \cdot \phi}$ (рис.5.2).

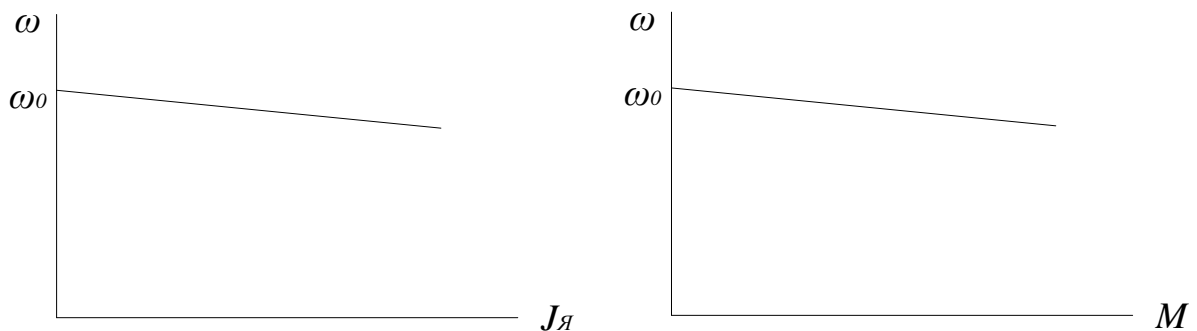


Рис.5.2.

Характеристики, що відповідають відсутності в колі якоря додаткового опору, є природними. Статичну жорсткість характеристики, що визначає її нахил, можна знайти, продиференціювавши вираз моменту M за швидкістю ω , знайшовши попередньо M з рівняння механічної характеристики.

$$M = k \cdot \phi \cdot \frac{U}{R_{я\Sigma}} - \frac{(k \cdot \phi)^2}{R_{я\Sigma}} \cdot \omega; \quad \beta_c = \frac{dM}{d\omega} = -\frac{(k \cdot \phi)^2}{R_{я\Sigma}}.$$

Модуль статичної жорсткості

$$|\beta| = \frac{(k \cdot \phi)^2}{R_{я\Sigma}}.$$

Використовуючи поняття жорсткості, рівняння статичної механічної характеристики ДНВ можна представити у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{k\phi} - \frac{M}{\beta} = \omega_0 - \frac{M}{\beta}.$$

Чим більший модуль жорсткості природної механічної характеристики, тим стабільніша є швидкість ω електроприводу при широких межах зміни його навантаження.

Іншою оцінкою стабільності робочої швидкості ω є статизм характеристики, кількісною оцінкою якого служить номінальний перепад швидкості.

$$\Delta\omega_{\text{ном}} = \omega_{0\text{ном}} - \omega_{\text{мн}} = \frac{M}{\beta_c},$$

де $\omega_{0\text{ном}}$ - швидкість ідеального холостого ходу на природній характеристиці.

Відносний перепад швидкості для двигунів

$$\Delta\omega_{\text{ном}} \% = \frac{\Delta\omega_{\text{ном}}}{\omega_{0\text{ном}}} \cdot 100\%.$$

великої потужності становить (1,5...3)%.

На вигляд природних механічної і електромеханічної характеристик сильно впливає реакція якоря, що послабляє магнітний потік машини. Через її розмагнічуючу дію в механічній характеристиці двигуна можуть з'явитися ділянки з позитивною жорсткістю (рис.5.3, ділянка а-б), що призводить до нестійкості електроприводу.

Реакція якоря, може знизити магнітний потік двигуна на 10-20%, внаслідок чого зменшиться його перевантажувальна здатність. Вона несприятливо позначається і на динамічних властивостях електроприводу. Тому в двигунах без компенсаційної обмотки потужністю до 100 кВт застосовують так звану стабілізуючу обмотку, що розміщується на сердечниках головних полюсів.

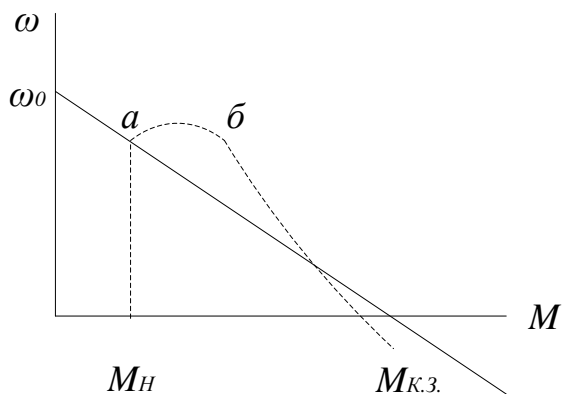


Рис.5.3.

Вона включається в коло якоря послідовно і створює невелику МРС, що компенсує дію реакції якоря. Але двигуни з такою обмоткою можна застосовувати для реверсивних електроприводів, тому що при зміні напрямку обертання струм якоря має протилежний зміст, і стабілізуюча обмотка буде посилювати дію реакції якоря.

Відзначимо, що механічна характеристика ДНЗ є залежність ω від електромагнітного моменту M двигуна. Якщо ж зобразити залежність ω від моменту на валу, то це буде не пряма, а ламана (рис.5.4). У двигунному режимі $M_g = M - \Delta M = M - M_0$, а в гальмівному (генераторному) $M_g = M + \Delta M = M + M_0$ (пунктирна лінія). При $\omega = 0$ виникає розрив безперервності. Це створює незручності при розрахунках. Тому момент $\Delta M = M_0$ додають до навантаження (до M_c) і характеристику двигуна вважають лінійною.

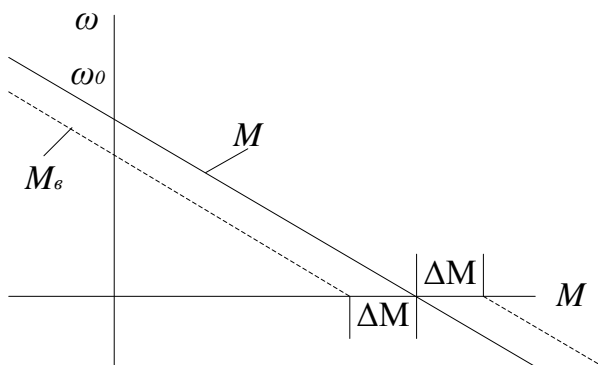


Рис.5.4.

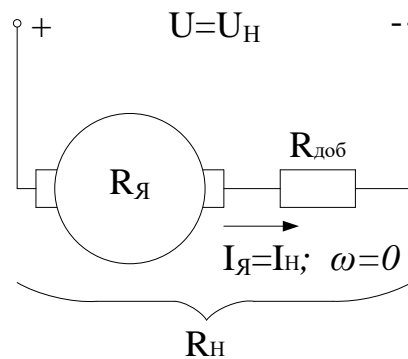


Рис.5.5.

Часто для зручності розрахунків рівняння механічної характеристики представляють у відносних одиницях. Характеристики двигунів, різних за своїми номінальними даними, стають універсальними. У відносних одиницях напруга, ЕРС, струм, момент, потік, швидкість можна представити в наступному вигляді:

$$V = \frac{U}{U_H}; \quad \varepsilon = \frac{E}{E_H}; \quad i = \frac{I_{я}}{I_H}; \quad \mu = \frac{M}{M_H}; \quad \varphi = \frac{\phi}{\phi_H}; \quad \nu = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

Для двигунів послідовного і змішаного збудження $\nu = \frac{\omega}{\omega_H}$, $\rho = \frac{R_{я}}{R_H}$, де

$R_H = \frac{U_H}{I_H}$ - номінальний опір, тобто опір якірного кола, яке при прикладанні

до якоря номінальної напруги і $\omega = 0$ обмежує струм в якорі до $I_{яH}$ (див. рис. 5.5).

Для написання рівняння механічної характеристики відносних одиницях розділимо обидві частини рівняння механічної характеристики на ω_0 .

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0}{\omega_0} - \frac{R_{я\Sigma}}{(k \cdot \phi)^2 \cdot \omega_0} \cdot M.$$

Звідси

$$\nu = 1 - \frac{R_{я\Sigma}}{k\phi\omega_0 \cdot k\phi} \cdot M = 1 - \frac{R_{я\Sigma}}{U \cdot k\phi} \cdot M = 1 - \frac{R_{я\Sigma}}{I_H R_H \cdot k\phi} \cdot M = 1 - \frac{\rho}{M_H} \cdot M = 1 - \rho \cdot \mu.$$

Тобто $\nu = 1 - \rho \cdot \mu$.

Оскільки у ДНЗ при $\Phi = \text{const}$ $M \equiv I_{я}$, то $\frac{M}{M_H} = \frac{I_{я}}{I_H} = \mu = i$ та

$$\nu = 1 - \rho \cdot i.$$

Це рівняння електромеханічної характеристики у відносних одиницях.

Характеристики двигуна, що відповідають змінам параметрів двигуна або спеціальних схемах його включення, є штучними. Так, при введенні в коло якоря додаткового опору нахил характеристик збільшується, їх жорсткість зменшується.

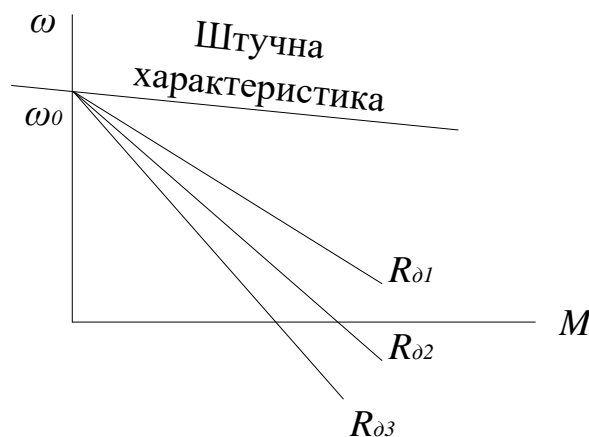


Рис.5.6.

При зміні напруги, що підводиться двигуну, змінюється швидкість ідеального холостого ходу $\omega_0 = \frac{U}{k\phi}$, а жорсткість характеристик залишається незмінною. Сімейство механічних характеристик, що відповідають різним напруженням на якорі, зображено на рис.5.7.

Для ряду виробничих механізмів у відповідність до вимог технологічного процесу іноді виникає необхідність збільшення робочої швидкості, що перевищує швидкість при $U = U_H$ і $\phi = \phi_H$. Цього досягається ослабленням магнітного потоку двигуна (зменшенням струму збудження).

Якщо зменшене значення магнітного потоку $\phi_{осл} = \phi' = \alpha \cdot \phi$, так само, де $\alpha < 1$, то нове, збільшене значення швидкості ідеального холостого ходу буде

$$\omega'_0 = \frac{U}{k \cdot \phi'} = \frac{U}{k \cdot \alpha \cdot \phi} = \frac{\omega_0}{\alpha}.$$

При ослабленому потоці і попередньому значенні моменту струм якоря збільшується. Його можна знайти з рівняння моменту

$$M = k \cdot \phi' \cdot I_{я}' = k \cdot \alpha \cdot \phi \cdot I_{я}' = k \cdot \phi \cdot I_{я} = const.$$

Звідки

$$I_{я}' = I_{я} \cdot \frac{\phi}{\phi'} = \frac{I_{я}}{\alpha}.$$

Рівняння механічної характеристики при ослабленому потоці буде

$$\omega = \frac{\omega_0}{\alpha} - \frac{R_{\beta}}{(k \cdot \alpha \cdot \phi)^2} \cdot M = \frac{\omega_0}{\alpha} - \frac{\Delta\omega}{\alpha^2}.$$

де $\Delta\omega$ - перепад швидкості при номінальному потоці.

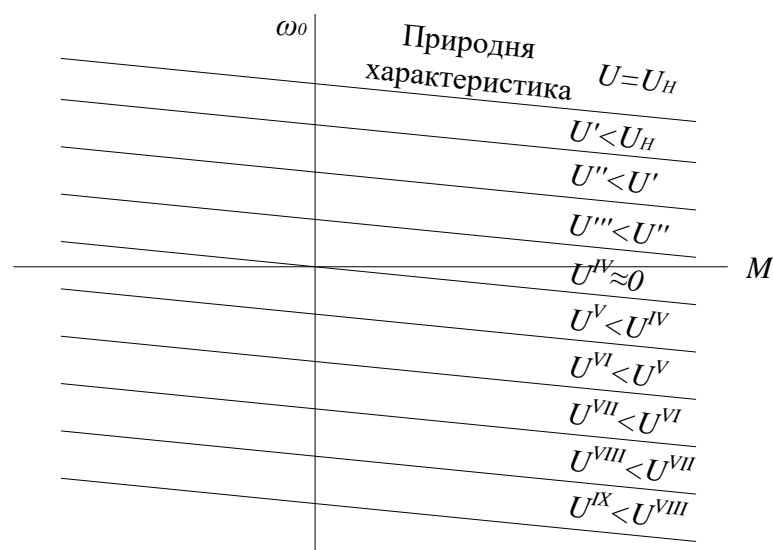


Рис.5.7.

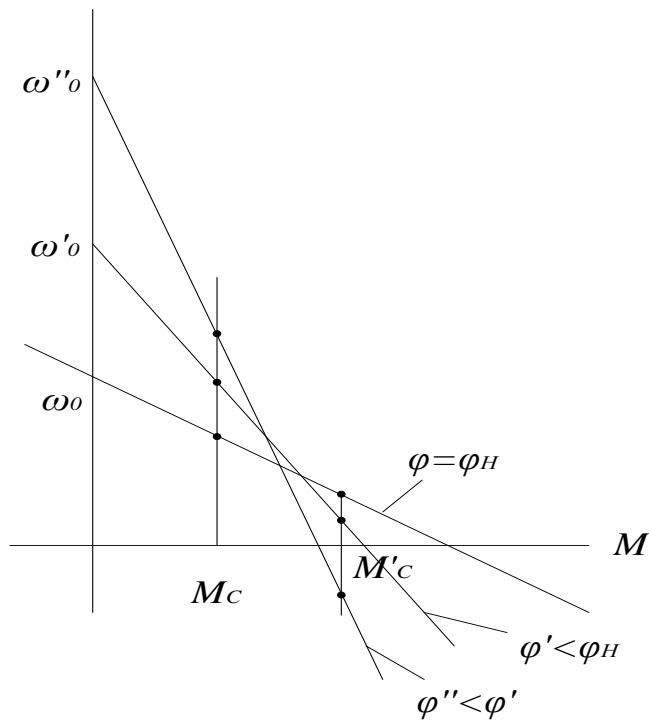


Рис.5.8.

Ослаблення потоку викликає збільшення не тільки ω_0 , але і швидкості якоря двигуна (при навантаженнях, допустимих за умовами комутації), що, власне, і потрібно. Але при навантаженнях, що не допустимі за умовами комутації, швидкість буде зменшуватися, і двигун може перейти в гальмівний режим, що зображено на рис.5.8, де зображено сімейство механічних характеристик двигуна, що відповідають різним значенням магнітного потоку.

Лекція №6. Гальмівні режими двигуна незалежного збудження.

6.1. Гальмування з рекуперацією енергії в мережу.

Перехід двигуна в гальмівний режим з віддачею енергії в мережу буде мати місце в разі, коли швидкість якоря двигуна виявляється більше швидкості ідеального холостого ходу ($\omega > \omega_0$), а ЕРС двигуна більше прикладеної напруги. Практично цей вид електричного гальмування застосовується при спуску важких вантажів зі швидкістю $\omega > \omega_0$.

В цьому випадку двигун включається в напрямок спуску (рис.6.1) і система розганяється під дією електромагнітного моменту M двигуна і статичного моменту M , створюваного вантажем.

Те ж саме буде мати місце, якщо транспортний пристрій з двигуном незалежного збудження переходить на похилий ділянку шляху (рис.6.2).

При $\omega > \omega_0$ струм якоря змінить напрямок.

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}\Sigma}} = \frac{U - k \cdot \phi \cdot \omega}{R_{\text{я}\Sigma}}.$$

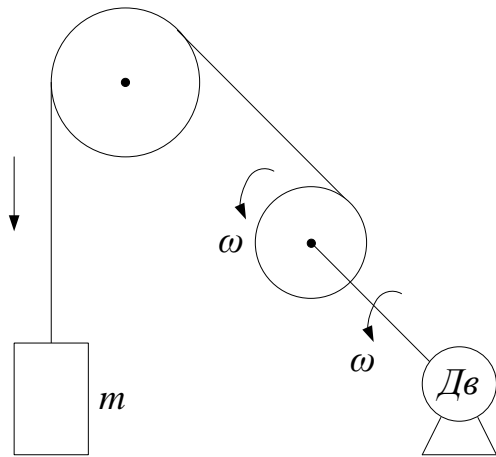


Рис.6.1.

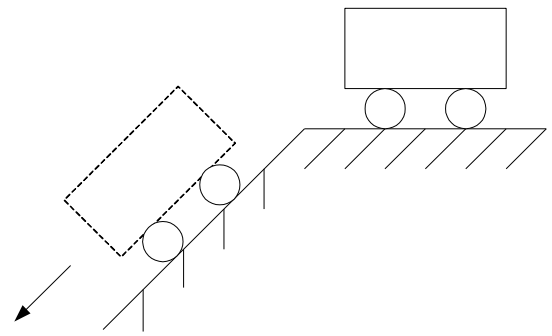


Рис.6.2.

Момент, що розвивається двигуном, при цьому буде не обертальним, а гальмівним. Двигун перетворюється в генератор, що перетворює механічну енергію, що підводиться до його валу з боку робочої машини, в електричну і віддає її в мережу за винятком втрат. Привід досягне сталої швидкості ω_y як тільки зростаючий гальмівний момент двигуна стане рівним рушійному моменту, створюваному робочою машиною, тобто $M = M_c$.

Механічна характеристика в цьому випадку піде з III квадранта в IV квадрант (див. рис.6.3). Потужність, що віддається в мережу дорівнює $P_c = P_{\text{ЭМ}} - I_{\text{Я}}^2 \cdot (R_{\text{Я}} + R_{\text{доб}})$, де $R_{\text{доб}}$ - додатковий опір в якірного ланцюга, яке в загальному випадку може бути. ККД машини в цьому режимі

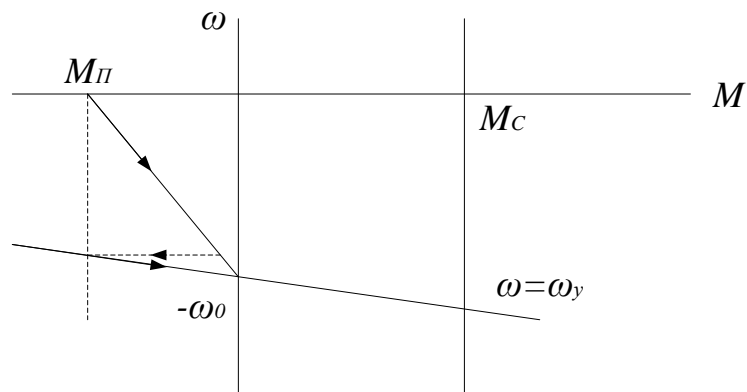


Рис.6.3.

$$\eta_{\text{Р.Т.}} = \frac{P_c}{P_{\text{ЭМ}}} = \frac{P_{\text{ЭМ}} - I_{\text{Я}}^2 \cdot (R_{\text{Я}} + R_{\text{доб}})}{P_{\text{ЭМ}}}$$

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть весьма экономично. Однако оно может быть осуществлено в ограниченных пределах, т.к. не во всех электроприводах возможно соблюдение условия $\omega > \omega_0$, т.е. не все электроприводы допускают увеличение скорости сверх скорости ω_0 .

Генераторне гальмування з віддачею енергії в мережу досить економічне. Однак воно може бути здійснено в обмежених межах, тому що не у всіх електроприводах можливо дотримання умови $\omega > \omega_0$, тобто не всі електроприводи допускають збільшення швидкості понад швидкості ω_0 .

6.2. Гальмування противмиканням

Противмиканням називається режим, коли двигун включений для одного напрямку обертання, а його якор за інерцією або під дією зовнішнього моменту обертається в протилежну сторону. При цьому момент двигуна протидіє руху. Такий режим може використовуватися при активному моменті M_c для гальмівного спуску вантажу. Якщо в коло якоря двигуна, що піднімає вантаж, включити великий додатковий опір, двигун виявиться працюючим на штучній характеристики з великою крутизною, на якій при швидкості перемикавання (т.В див. рис.6.4.) момент, що розвивається двигуном, буде менше M_c , двигун почне сповільнюватися і зупиниться в т.С, а потім під дією вантажу він почне обертатися в протилежному напрямку.

Розпочнеться спуск вантажу. Стала швидкість гальмівного спуску буде в т.д. ЕРС двигуна змінить свій знак і співпадатиме з напругою мережі. Струм якоря буде рівним:

$$I_{я} = \frac{U - (-E)}{R_{я\Sigma} + R_{доб}} = \frac{U + E}{R_{я\Sigma} + R_{доб}}.$$

При реактивному моменті опору для переходу двигуна в режим противмикання необхідно на ходу двигуна змінити полярність напруги на його якорі. Одночасно для обмеження кидка струму в коло якоря слід ввести додатковий опір. Схема включення двигуна і відповідні цьому режиму механічні характеристики зображені на рис.6.5.

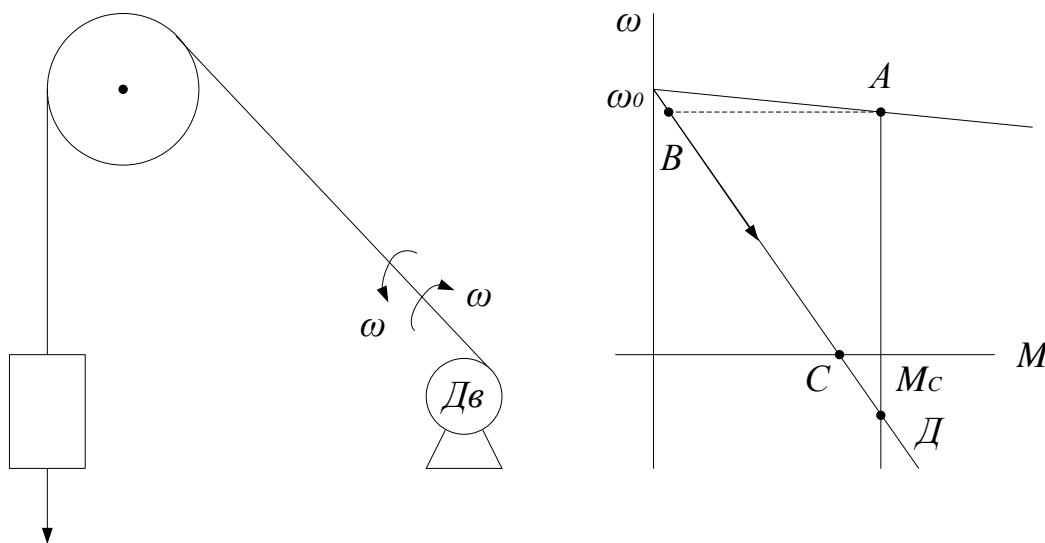


Рис.6.4

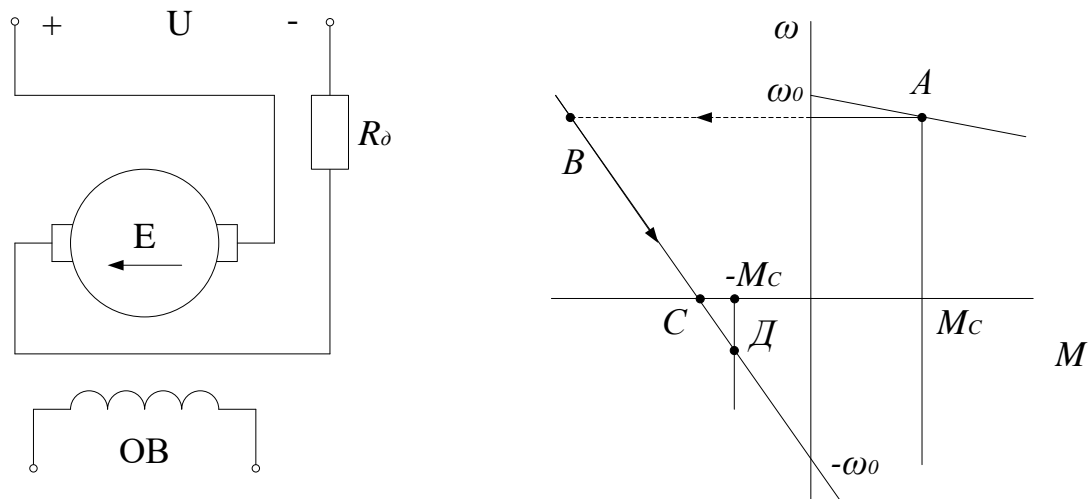


Рис.6.5.

При зміні полярності напруги на якорі, двигун, що працював до цього зі швидкістю, що відповідає т.А, переходить в т.В для роботи на штучній характеристиці, і гальмується на її ділянці ВС. При $\omega = 0$ його потрібно відключити від мережі. Якщо потрібен реверс і якщо момент двигуна в т.С більше M_c , знак якого стрибком зміниться на протилежний, двигун переходить в двигун ний режим і розганяється до швидкості, що відповідає т.Д, де його момент стане рівним M_c .

Струм двигуна в цьому гальмівному режимі:

$$I_{я} = -\frac{U + E}{R_{я} + R_{d}}$$

У новому двигунному режимі разом зі зміною напрямку обертання зміниться і напрямок ЕРС двигуна, яка буде знову спрямована зустрічно напрузі мережі. У режимі проти вмикання до двигуна з боку мережі підводиться потужність $P_C = U \cdot I_{я}$, а з боку механізму $P_{MEH} = E \cdot I_{я}$. Вся ця потужність $P_C + P_{MEH}$ розсіюється у вигляді тепла в опорах якорного кола. При такому пере-творенні енергії ККД = 0, тому що корисно використовуваної енергії тут немає.

Режим проти вмикання найчастіше застосовується для реверсивних електроприводів, в яких гальмування і пуск двигуна в зворотному напрямку являє собою єдиний процес.

Цей спосіб забезпечує інтенсивне гальмування до повної зупинки механізму при порівняно малозмінному гальмівному моменті, але супроводжується значним нагріванням двигуна.

6.3. Динамічне гальмування

Суть цього способу гальмування полягає в тому, що якор двигуна відключається від мережі і замикається накоротко або, або на гальмівний опір, а обмотка збудження залишається підключеним до мережі (рис.6.6).

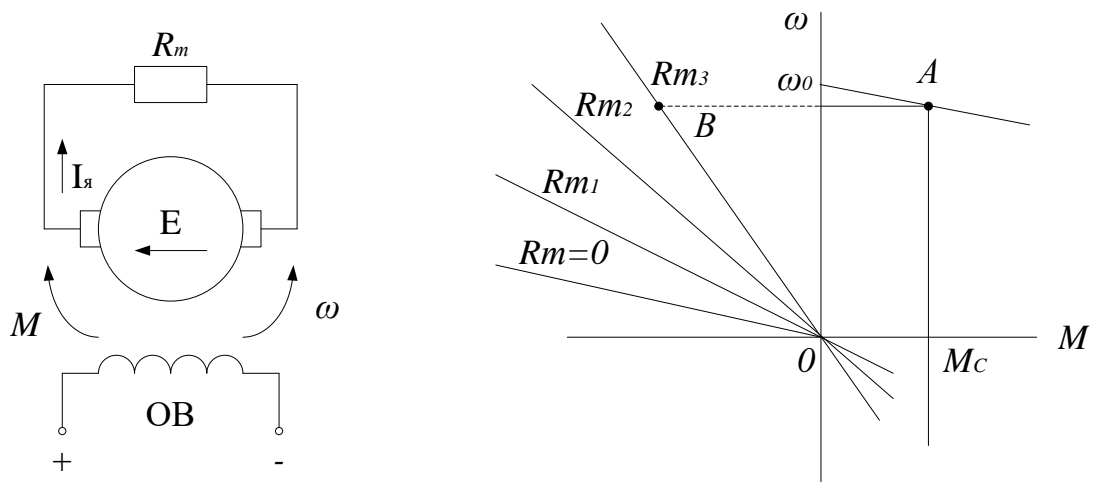


Рис.6.6.

Внаслідок того, що ЕРС двигуна за напрямом залишається такою ж, як і до гальмування, а напруга до якоря не прикладена, струм, що протікає під дією цієї ЕРС

$$I_{я} = \frac{0 - E}{R_{я} + R_m} = - \frac{E}{R_{я} + R_m}$$

створює гальмівний момент. Машина працює генератором. Кінетична енергія, запасена в двигуні і обертових частинах проведеного ним механізму, перетворюється в електричну і розсіюється у формі тепла опір якорного кола. Як і в режимі противмикання поняття ККД тут втрачає сенс. Так як при динамічному гальмуванні $U=0$, то також дорівнює $\omega_0 = \frac{U}{k\phi}$ нулю і рівняння механічної характеристики має вигляд:

$$\omega = - \frac{R_{\beta} + R_m}{(k\phi)^2} \cdot M$$

Сімейство механічних характеристик, що відповідають різним опорам R_m , зображено на рис.6.6. Всі вони проходять через початок координат. Найбільш інтенсивне гальмування виходить при замиканні якоря накоротко. При цьому характеристика динамічного гальмування буде паралельна природній. Однак за умовами обмеження початкового кидка струму замикання якоря накоротко допустиме тільки при переході двигуна в гальмівний режим при малих швидкостях.

Зазвичай динамічне гальмування здійснюється при $\Phi = \Phi_n$ і широко застосовується в електроприводах, де потрібна точна зупинка. Воно може бути використано і для гальмівного спуску вантажу.

З енергетичної точки зору динамічне гальмування вигідніше за проти микання, тобто з мережі енергія споживається тільки обмоткою збудження. Воно забезпечує плавність гальмування, надійне, можна отримати характеристики з малою крутістю. Недоліком є зменшення гальмівного моменту двигуна по мірі зниження швидкості.

Лекція №7. Розрахунок механічних характеристик двигуна незалежного збудження.

7.1. Розрахунок опорів якоря.

Для розрахунку та побудови природної або штучної механічної характеристики ДНЗ досить знати координати 2-х точок, оскільки його механічні характеристики є прямими лініями. Ці 2 точки можуть бути будь-якими. Однак побудову природної характеристики зручно проводити по точках, одна з яких відповідає координатам $\omega = \omega_0$, $M = 0$, а інша координатами, $\omega = \omega_H$, $M = M_H$.

Для знаходження цих точок необхідно знати паспортні дані двигуна і опір обмотки якоря в нагрітому стані (частіше при $t = 75^\circ \text{C}$).

Швидкість ω_0 визначається виходячи з таких принципів:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \phi} = \frac{U}{k \cdot \phi} \cdot \frac{\omega_H}{\omega_H} = \frac{U}{E_H} \cdot \omega_H = \frac{U \cdot \omega_H}{U - I_{яH} \cdot R_я}$$

Якщо $R_я$ невідомий, його можна орієнтовно визначати за втратами в міді, виходячи з відомого положення, що при навантаженні, що відповідає максимальному ККД змінні втрати рівні постійним. Оскільки поблизу максимуму ККД змінюється мало, можна вважати, що він максимальний при номінальному навантаженні, тобто при P_H .

Повні втрати при номінальному навантаженні

$$\Delta P = U_H \cdot I_{яH} - P_H$$

Номінальні втрати в міді в цьому випадку дорівнюють половині повних

$$\text{втрат } \Delta P_M = \frac{\Delta P_H}{2} = I_{яH}^2 \cdot R_я = \frac{U_H \cdot I_{яH} - P_H}{2}$$

Звідси

$$\begin{aligned} R_я &= \frac{\Delta P_H}{2 I_{яH}^2} = \frac{U_H \cdot I_{яH} - P_H}{2 I_{яH}^2} = \frac{U_H}{2 I_{яH}} - \frac{P_H}{2 I_{яH}^2} \cdot \frac{U_H}{U_H} = \frac{1}{2} R_H - \frac{1}{2} \cdot \frac{P_H \cdot R_H}{U_H \cdot I_{яH}} = \\ &= 0,5 R_H \cdot \left(1 - \frac{P_H}{U_H \cdot I_{яH}}\right) = 0,5 R_H \cdot (1 - \eta_H). \end{aligned}$$

Для генератора:

$$R_я = 0,5 R_H \cdot \left(\frac{1}{\eta_H} - 1\right).$$

Для двигунів послідовного збудження:

$$R_я \cong 0,75 \cdot R_H (1 - \eta_H).$$

Для краново-металургійних двигунів змішаного збудження:

$$R_я \cong 0,6 R_H \cdot (1 - \eta_H).$$

Номінальний момент двигателя:

$$M_H = k \cdot \phi \cdot I_{яH} = \frac{U - I_{яH} \cdot R_я}{\omega_H} \cdot I_{яH}.$$

Штучна характеристика, що відповідає введенню в коло якоря додаткового опору, розраховується і будується також за двома точками з координатами: $\omega = \omega_0$; $M = 0$; $\omega = \omega_{ш}$, $M = M_H$. Швидкість $\omega_{ш}$ визначається

$$\omega_{ш} = \omega - \frac{R_{Я} + R_{доод}}{(k\phi)^2} \cdot M_H \text{ або } \omega_{ш} = \omega_0 \cdot \left[1 - \frac{I_{ЯН} \cdot (R_{Я} - R_{доод})}{U} \right].$$

Механічна характеристика може бути розрахована і побудована по точках з такими координатами: $\omega = \omega_0$; $M = 0$; $\omega = 0$;

$$M = M_{КЗ} = k \cdot \phi \cdot I_{КЗ} = k \cdot \phi \cdot \frac{U}{R_{Я} + R_{дооб}}.$$

7.2. Природні і штучні механічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПЗ)

Принципова схема ДПВ зображена на рис.7.1. Оскільки обмотка ДПЗ включена послідовно з обмоткою якоря, його магнітний потік є функцією струму якоря $I_{Я}$ (навантаження). Рівняння рівноваги ЕРС якірного кола і рівняння моменту цього двигуна можна представити у вигляді:

$$U_{Я} = i_{Я} \cdot R_{Я\Sigma} + L_{Я\Sigma} \cdot \frac{di_{Я}}{dt} + W_B \cdot \frac{d\phi}{dt} + k\phi(i_{Я})\omega.$$

$$M = k \cdot \phi(i_{Я}) \cdot i_{Я}.$$

Тут $R_{Я\Sigma} = R_{Я} + R_B + R_{Д.П.}$

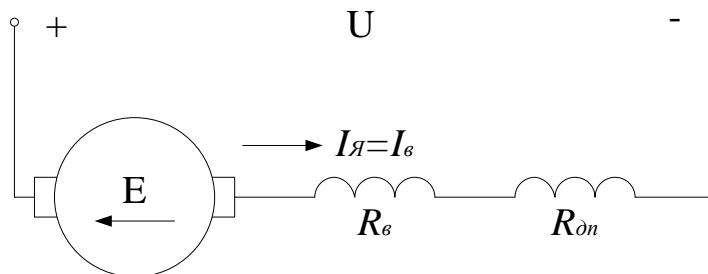


Рис.7.1.

Індуктивність розсіювання якірного кола $L_{Я}$, значно менше індуктивності L_3 обмотки збудження, пов'язаної з головним потоком двигуна.

Тому в ряді випадків нею можна знехтувати. У сталому режимі $\frac{di_{Я}}{dt} = \frac{d\phi}{dt} = 0$.

Тому рівняння статичних електромагнітної та механічної характеристик можна представити у вигляді:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \phi(I_{Я})} - \frac{R_{Я\Sigma}}{k \cdot \phi(I_{Я})} \cdot I_{Я}; \quad \omega = \frac{U}{k \cdot \phi(I_{Я})} - \frac{R_{Я\Sigma}}{(k\phi)^2(I_{Я})} \cdot M;$$

При номінальному струмі магнітне коло ланцюг машини насичене. У зв'язку з цим для отримання досить докладного уявлення про характеристики

двигуна можна скористатися кусково-лінійною апроксимацією характеристик і намагнічування (рис.7.2).

Початкова ділянка кривої намагнічування ($I_{Я} \leq 0,3I_H$ і $M \leq 0,15M_H$) з достатньою точністю можна замінити прямою $\phi = \alpha \cdot I_{Я}$. Тоді $M = k \cdot \phi(I_{Я}) \cdot I_{Я} = k \cdot \alpha \cdot I_{Я}^2$, де α - коефіцієнт пропорційності.

$$\text{Тоді } I_{\beta} = \sqrt{\frac{M}{k \cdot \alpha}}.$$

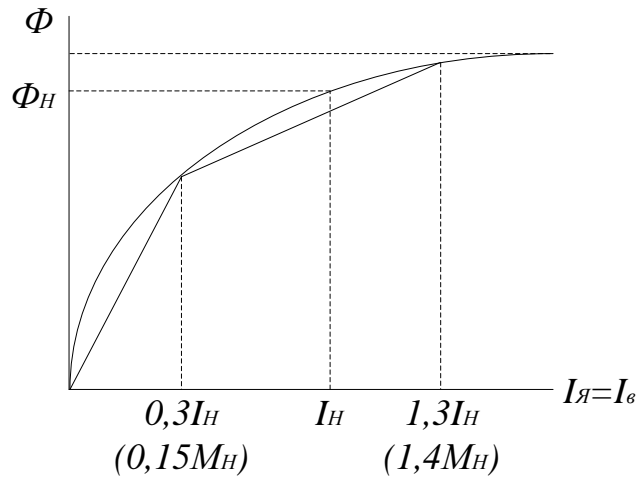


Рис.7.2.

Початкова ділянка кривої намагнічування ($I_{Я} \leq 0,3I_H$ і $M \leq 0,15M_H$) з достатньою точністю можна замінити прямою $\phi = \alpha \cdot I_{Я}$. Тоді $M = k \cdot \phi(I_{Я}) \cdot I_{Я} = k \cdot \alpha \cdot I_{Я}^2$, де α - коефіцієнт пропорційності.

$$\text{Тоді } I_{\beta} = \sqrt{\frac{M}{k \cdot \alpha}}.$$

Підставивши це в рівняння електромеханічної характеристики, отримаємо:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{U}{k \cdot \phi(I_{Я})} - \frac{R_{Я\Sigma}}{k \cdot \phi(I_{Я})} \cdot I_{Я} = \frac{U}{k \cdot \alpha \cdot I_{Я}} - \frac{R_{Я\Sigma}}{k \cdot \alpha \cdot I_{Я}} \cdot I_{Я} = \\ &= \frac{U}{k\alpha \cdot \sqrt{\frac{M}{k\alpha}}} - \frac{R_{Я\Sigma}}{k \cdot \alpha} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B. \end{aligned}$$

Звідси випливає, що при малих навантаженнях механічна характеристика ДПЗ має гіперболічний характер.

Друга ділянка лінійної апроксимації кривої намагнічування, відповідає значенням $I_{Я}$ до $1,3I_H$ і M до $1,4M_H$. Для цієї ділянки залежності потоку від струму і моменту мають вигляд $\phi = \phi_0 + \alpha_1 \cdot I_{Я}$ і $\phi = \frac{\phi_0}{2} \cdot (1 + \sqrt{1 + M \cdot \varepsilon})$, де

$\varepsilon = \frac{4\alpha_1}{k \cdot \phi_0^2}$, де α_1 - теж коефіцієнт пропорційності, а Φ_0 - потік залишкової індукції. Якщо підставити значення Φ у рівняння електромеханічної характеристики, отримаємо неявно виражену гіперболу.

При навантаженнях по струму $I_{я} > 1,3I_{Н}$ і моменту $M > 1,4M_{Н}$ магнітний потік машини стає практично постійним і механічна характеристика набуває лінійний характер. Швидкість двигуна зменшується лише за рахунок падіння напруги в якірному колі (рис.7.3).

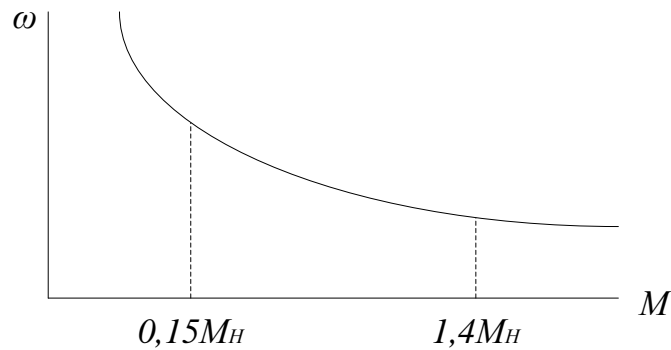


Рис.7.3.

При практичних розрахунках отриманим рівнянням механічної характеристики (якщо скласти її окремі ділянки, що відповідають зазначеним вище навантаженням по струму і моменту) користуватися не можна, тому що воно отримане в припущенні ненасиченої магнітної системи, а сучасні двигуни з такою системою не проектується. Тому при розрахунках електроприводів з ДПЗ застосовують графічні і графоаналітичні методи з використанням експериментальних залежностей його швидкості, моменту і потоку від струму якоря. Ці залежності наводяться в каталогах для кожного типу двигунів в абсолютних, а у довідниках – у відносних одиницях у вигляді універсальних характеристик для двигунів до 10 кВт і вище 10кВт (див. рис.7.4).

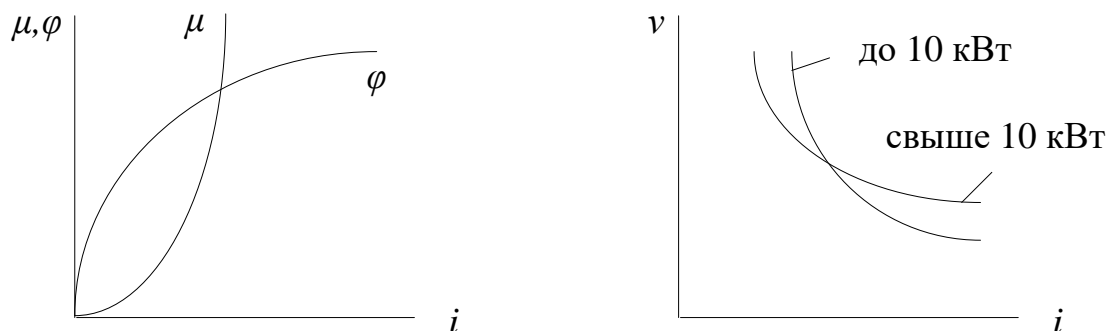


Рис.7.4.

Знаючи номінальні дані двигуна і користуючись цими універсальними характеристиками, можна, задаючись різними значеннями струму якоря,

знайти ω і M по кривих $\mu = f(i)$ і $\nu = f(i)$ природну характеристику $\omega = f(M)$. Однак потрібно пам'ятати, що це буде залежність швидкості від моменту на валу.

Зазвичай ці криві для ДПЗ серії ДП, Д, МП, тобто тих двигунів, які застосовуються найчастіше в магістральному електротранспорті, трамваях, самохідних вагонах, засобах внутрішньозаводського транспорту і т.п.

Штучні механічні характеристики ДПЗ можна отримати тим же способом що і для ДНЗ.

При зміні напруги на затискачах двигуна характеристики переміщуються паралельно природною вгору або вниз (див. рис.7.5).

При введенні опору якірне коло двигуна швидкість його зменшується, характеристики зміщуються вниз, вони стають більш м'якими (рис.7.6).

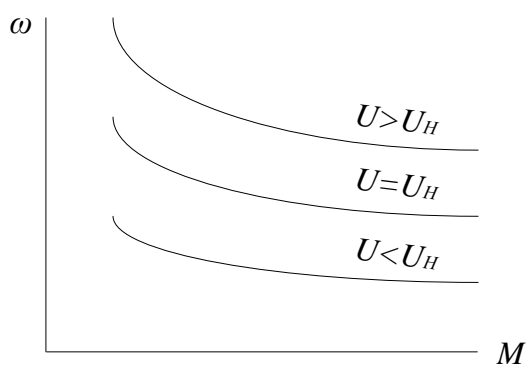


Рис.7.5.

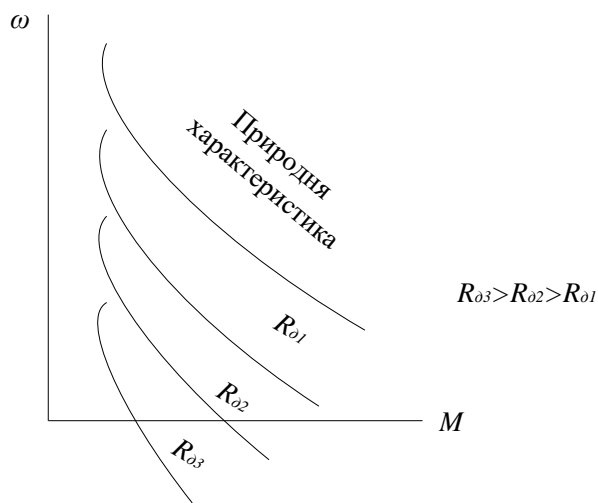


Рис.7.6.

Для отримання швидкостей двигуна при $U = \text{const}$, що перевищують швидкості на природній характеристиці, послаблюється магнітний потік машини шунтуванням обмотки збудження (рис.7.7).

Характеристика при ослабленому потоці розташовується вище природної, але вона м'якша (її жорсткість при кожній даній швидкості менше, ніж на природній характеристиці (рис.7.8)).

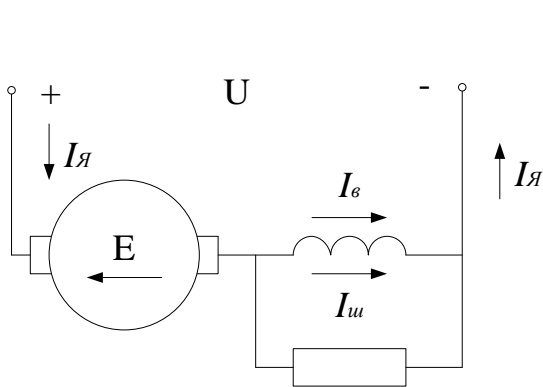


Рис.7.7.

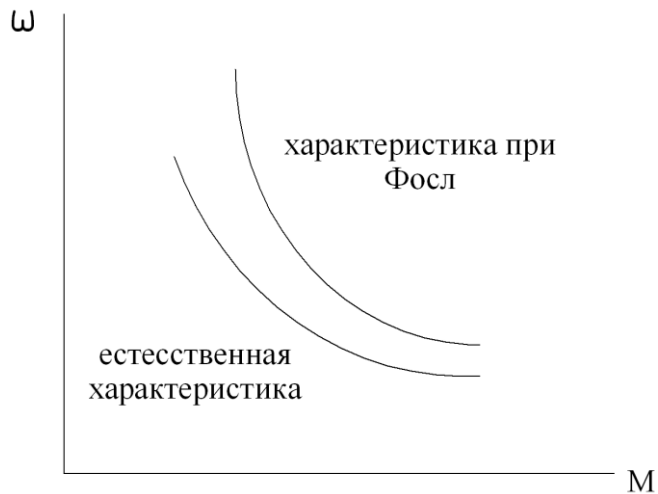


Рис.7.8.

З наведених графіків видно, що швидкість ДПЗ при роботі як на природніх, так і на штучних характеристиках, при збільшенні навантаження різко падає. Тому ДПЗ непридатні для електроприводів, що вимагають сталої швидкості при змінному навантаженні.

При ідеальному холостому ході швидкість ДПЗ теоретично може зрости до нескінченності. Насправді завжди є тертя в підшипниках, в повітря і т.п. і є потік залишкової індукції, що становить $(0,02 \div 0,09) \Phi_H$. Тому швидкість не зростає до нескінченності, але може в $5 \div 7$ разів перевищувати номінальну, і щоб уникнути небезпеки розносу двигуна його не можна з приводним механізмом з'єднувати за допомогою пасової та ланцюгової передачі. З урахуванням можливого різкого збільшення швидкості при скиданні навантаження ДПЗ розраховують на $\omega_{don} \cong 4\omega_H$.

Лекція №8. Гальмівні режими двигунів послідовного збудження.

8.1. Загальні положення.

Двигун послідовного збудження в звичайній схемі включення дозволяє отримати тільки 2 гальмівних режими: проти вмикання і динамічне гальмування. Гальмування з рекуперацією енергії в мережу неможливе, тому що у них ЕРС не може бути більшою прикладеної напруги. Навіть в ідеальному випадку, коли струм в якорі стане рівним 0, (при $\omega = \infty$) ЕРС може бути лише жорівнювати напрузі U мережі. Гальмування противмиканням є для ДПЗ основним гальмівним режимом і широко застосовується для вантажопідйомних механізмів, механізмів пересування і повороту.

Для переходу з двигунного режиму, що відповідає підйому вантажу, в режим противмикання, що відповідає гальмівному спуску, в коло якоря вводиться додатковий опір. Момент двигуна стає менше M_C (т.В на рис.8.1). У т.Д підйом вантажу припиняється. Після зупинки підйому під дією M_C вантаж починає опускатися. При швидкості, що відповідає т.С, момент M двигуна зрівняється з M_C і спуск буде відбуватися з постійною швидкістю. При зміні напрямку обертання ЕРС двигуна змінить свій знак і співпадатиме з напругою мережі. Струм якоря збільшиться $I_A = \frac{U + E}{R_{\Sigma} + R_0}$, а момент M по відношенню до моменту M_C , буде гальмівним.

Для гальмування механізмів з реактивним моментом опору необхідно на ходу змінити полярність напруги якоря, залишивши без зміни напрямку струму в обмотці збудження згідно зі схемою рис.8.2. Для обмеження початкового кидка струму і моменту в коло якоря повинен бути введений значний опір $R_{дод}$, тому що без нього струм може перевищити номінальний в 30-40 разів.

Перехід з двигунного в гальмівний режим зображений на рис.8.3. При зміні полярності живлення якоря двигун переходить з т.А на характеристику в т.В і гальмується до зупинки в т.С. Якщо після зупинки його не вимкнути і

момент двигуна в т.С більше M_C , двигун буде розганятися в протилежному напрямку і новий сталий режим настане в т.Д.

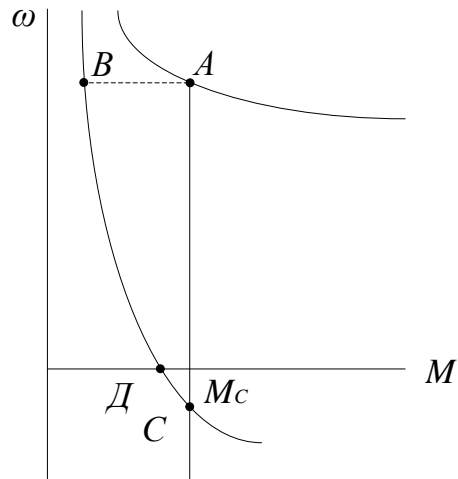


Рис.8.1.

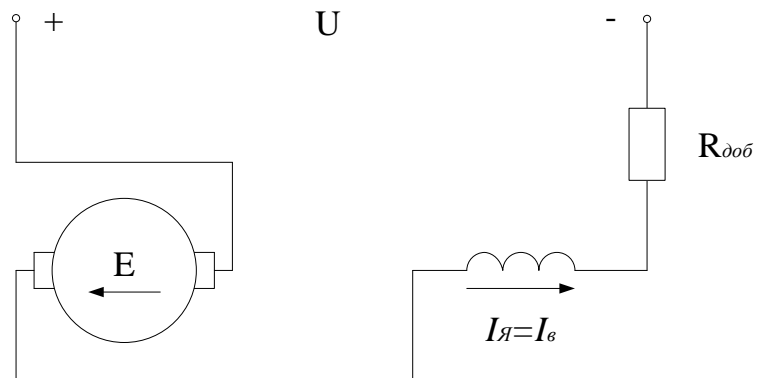


Рис.8.2.

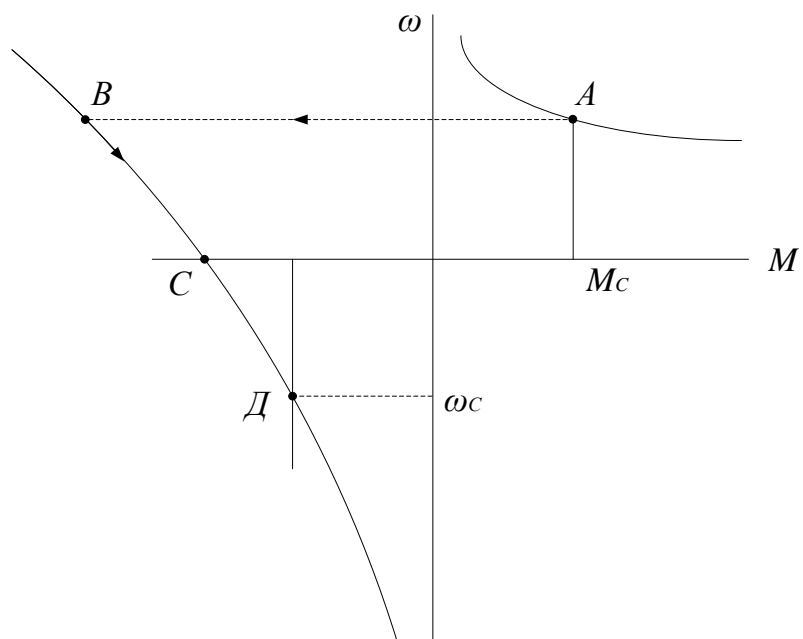


Рис.8.3.

Режим динамічного гальмування ДПЗ може здійснюватися 2-ма способами: з незалежним збудженням та з самозбудженням. При динамічному гальмуванні з незалежним збудженням двигун відключається від мережі, якір замикається на гальмівний опір, а обмотка збудження підключається до мережі через опір $R_{зд}$, що обмежує струм в ній до $I_3 \leq I_N$ (рис.8.4).

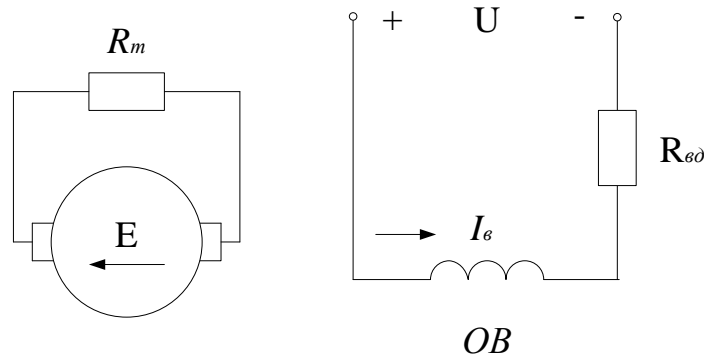


Рис.8.4.

Оскільки в цьому випадку двигун працює як генератор незалежного збудження, його характеристики, подібні до характеристик ДНЗ при динамічному гальмуванні. Всі вони перетинаються в початку координат і наведені на рис.8.5. Цей спосіб динамічного гальмування є основним.

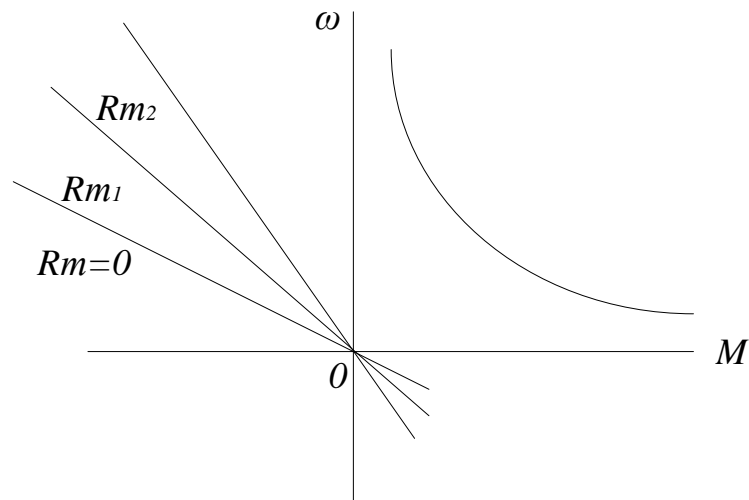


Рис.8.5.

8.2. Гальмування з самозбудженням.

При гальмуванні з самозбудженням двигун відключається від мережі і замикається на гальмівний опір (рис.8.6), працюючи генератором з самозбудженням. Головною умовою цього способу є наявність самозбудження. При обертанні якоря за рахунок кінетичної енергії механізму або вантажу в якорі від залишкового магнетизму буде наводитися ЕРС. При правильному з'єднанні обмотки якоря і обмотки збудження струм, створений ЕРС, посилить магнітний потік, а отже, і ЕРС, що призведе до подальшого збільшення струму. Це значить, що при переході машини з двигунного

режиму у гальмівний необхідно для уникнення її розмагнічування переключити полярність якоря або обмотки збудження таким чином, щоб струм в останній мав такий же напрямок, що і в двигунному режимі. Інакше самозбудження не відбудеться.

Крім того, щоб збудження виникло, швидкість двигуна повинна бути достатньою і виконувалась умова: ЕРС якоря, що визначається величиною потоку Φ і швидкістю обертання була більше падіння напруги в опорі гальмівного контуру, тобто $E > I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{м}})$.

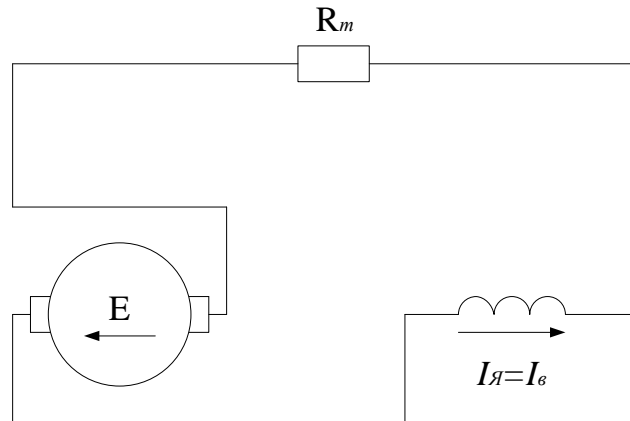


Рис.8.6.

Збудившись, машина створює гальмівний момент. При деякій швидкості настане рівновага. Режим роботи двигуна визначиться точкою перетину $E = f(I_{\text{я}})$ при досягненні швидкості обертання з лінією, що характеризує спад напруги (рис. 8.7).

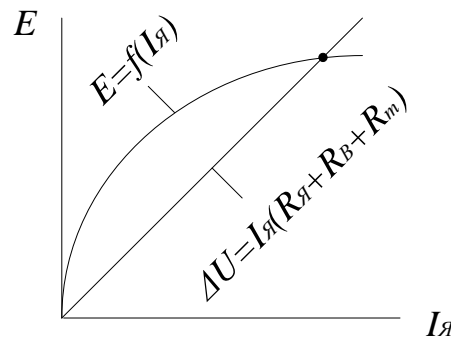


Рис.8.7.

Для кожної даної машини крива $E = f(I_{\text{я}})$ лежить тим вище, чим більше ω , а нахил прямої ΔU тим більше, чим більше $R = R_{\text{я}} + R_{\text{в}} + R_{\text{м}}$. Тому виконання цієї умови при даній швидкості, а значить і робота в гальмівному режимі, можливі лише при R (а отже і $R_{\text{м}}$), менших, ніж значення, відповідні прямій, дотичній до кривої $E = f(I_{\text{я}})$ на початку координат. Для можливості гальмування, при великих опорах R необхідно збільшити швидкість двигуна в режимі, що передує гальмівному.

Найменша швидкість, при якій ще можливо самозбудження, матиме місце при замиканні машини накоротко, тобто при $R = R_{Я} + R_{В}$. Швидкість, при якій самозбудження вже не відбудеться, називається критичною. Їй відповідає опір, також зване критичним

$$R_{кр} = \frac{E}{I_{Я}} = \frac{k \cdot \alpha \cdot I_{Я} \cdot \omega}{I_{Я}} = k \cdot \alpha \cdot \omega.$$

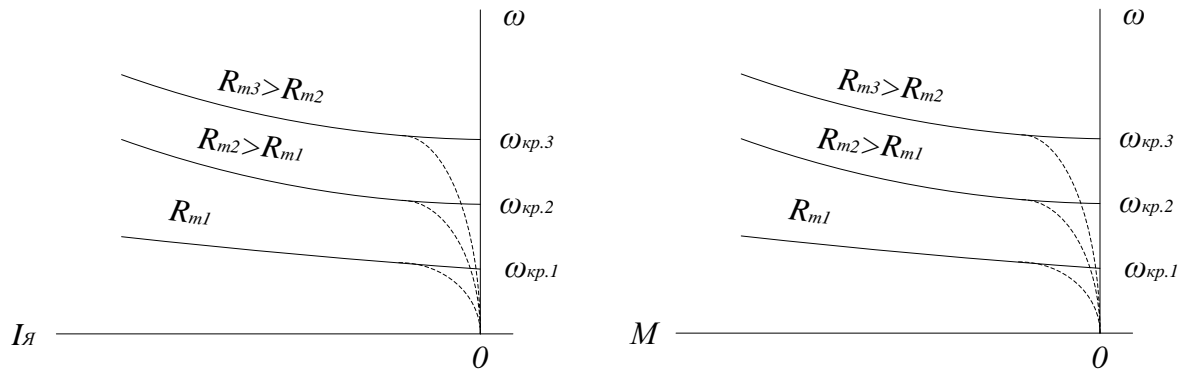


Рис.8.8.

Сімейство електромеханічних і механічних характеристик, відповідних різним значенням гальмівного опору R_m , зображено на рис.8.8. З них видно, що при кожному даному R_m гальмування здійснюється у відносно вузькій зоні швидкостей. З метою гальмування до досить малих швидкостей необхідно у міру зниження швидкості зменшувати R_m . Зазначимо, що динамічне гальмування з самозбудженням використовується як аварійне.

Лекція №9. Розрахунок штучних електромеханічних і механічних характеристик ДПЗ.

9.1. Загальні положення.

Аналітичним шляхом розрахувати штучні характеристики ДПЗ з необхідною точністю не можна із-за неможливості врахування впливу насичення. Тому для розрахунків користуються графічними і графоаналітичними методами. Для розрахунків необхідно знати паспортні дані двигуна і мати універсальні характеристики в іменованих або відносних одиницях.

Аналітичний розрахунок штучної характеристики без урахування насичення машини можна зробити виходячи з наступного:

$$\omega_{пр} = \frac{U - I_{Я} \cdot R_{Я}}{k \cdot \varphi(I_{Я})}; \quad \omega_{ш} = \frac{U - I_{Я} \cdot (R_{Я} + R_{одод})}{k \cdot \varphi(I_{Я})};$$

Розділивши $\omega_{ш}$ на $\omega_{пр}$, отримаємо:

$$\frac{\omega_{пр}}{\omega_{ш}} = \frac{U - I_{Я} \cdot (R_{Я} + R_{одод}) \cdot k \cdot \varphi(I_{Я})}{U - I_{Я} \cdot R_{Я} \cdot k \cdot \varphi(I_{Я})};$$

Звідси

$$\omega_{ш} = \omega_{пр} \cdot \frac{U - I_{Я} \cdot (R_{Я} + R_{одод})}{U - I_{Я} \cdot R_{Я}}.$$

Задаючись струмом $I_{я}$, за універсальною характеристикою знаходиться $\omega_{пр}$, а потім обчислюється $\omega_{ш}$ при введеному в коло якоря $R_{дод}$ і т. д. За отриманими точками будується штучна характеристика. Отриману характеристику (криву) $\omega_{ш} = f(I_{я})$ за допомогою універсальної характеристики можна перебудувати в механічну характеристику $\omega = f(M)$. Однак це буде залежність ω не від електромагнітного моменту, а від моменту на валу.

Графічний метод розрахунку та побудови штучної характеристики, що відповідає введенню в коло якоря додаткового опору, заснований на тому, що при незмінному струмі в колі якоря (або при сталості моменті на валу двигуна) швидкість обертання двигуна пропорційна опорі якірної кола. Це положення випливає з рівняння електромеханічної характеристики:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \phi(I_{я})} - \frac{R_{я} + R_{доб}}{k \cdot \phi(I_{я})} \cdot I_{я} = \frac{U}{k \cdot \phi(I_{я})} - \frac{R}{k \cdot \phi(I_{я})} \cdot I_{я}.$$

Якщо при регулюванні швидкості підтримувати $I_{я} = const$, то потік Φ двигуна буде незмінним, отже, постійним будуть $\frac{U}{k \cdot \phi(I_{я})}$ і $\frac{I_{я}}{k \cdot \phi(I_{я})}$, де

$\omega = A - B \cdot R$. Тобто швидкість двигуна при $I_{я} = const$ є лінійною функцією опорі кола якоря. Для побудови штучних характеристик у I квадранті будується природна електромеханічна характеристика двигуна. По осі абсцис вліво від початку координат відкладається опір кола якоря. У II квадранті проводиться вертикальна лінія, що лежить від початку координат на відстані (0а, рис.9.1), що відповідає в масштабі опорі двигуна $R_0 = R_{я} + R_B + R_{ДП}$.

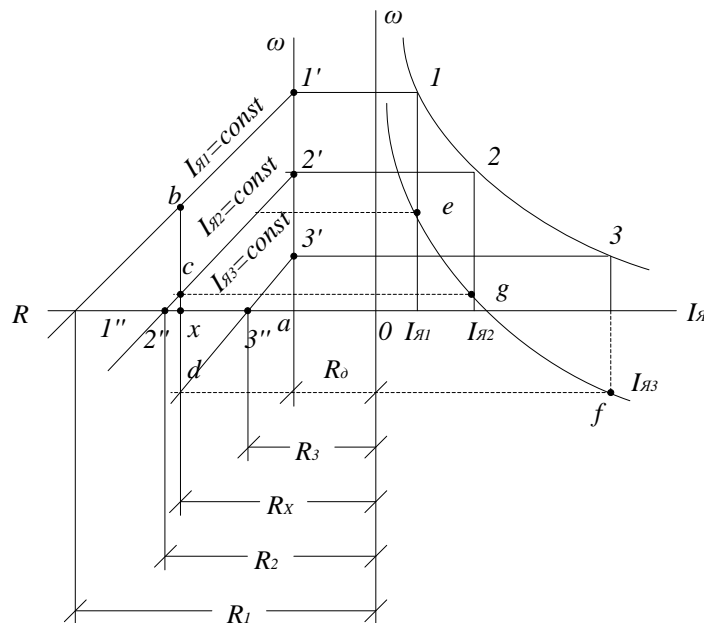


Рис.9.1.

Задаючись деяким значенням струму $I_{я1}$, проводиться вертикаль до перетину з природною характеристикою в т. 1. Після цього в осях ω і R

будується пряма $\omega = f(R)$, що відповідає струму $I_{я1}$: Однією з точок цієї прямої є т. 1'. Інша точка знаходиться на осі абсцис. Їй відповідає $\omega=0$ при $I_{я} = const$. Опір якірного кола при $\omega=0$, що відповідає цій точці дорівнює:

$$R_1 = \frac{U - E}{I_{я1}} = \frac{U - 0}{I_{я1}} = \frac{U}{I_{я1}}.$$

Так як при $\omega=0$, то й ЕРС $E = 0$.

Відкладаючи на осі абсцис значення цього опору, отримаємо т.1". З'єднуючи прямою точки 1' і 1'', отримаємо шукану залежність $\omega = f(R)$ при $I_{я1} = const$. Аналогічно будуються прямі для значення струмів $I_{я2}, I_{я3}$.

Для побудови штучної характеристики, що відповідає опору якірного кола $R = R_x$, по осі абсцис відкладається величина цього опору (див. рис.9.1) і через точку X проводиться вертикаль, що перетинається з прямими $I_{я1} = const$, $I_{я2} = const$, і т.д. в точках b, c, d. Вона визначає швидкості обертання двигуна на штучній характеристиці при відповідних значеннях струмів. Перенісши ці точки на вертикалі $I_{я1} - 1$, $I_{я2} - 2$, $I_{я3} - 3$, отримаємо точки e, g, f і т.д. З'єднуючи плавною кривою ці точки, отримаємо штучну характеристику.

9.2. Електромеханічні властивості двигуна постійного струму змішаного збудження (ДЗЗ)

Двигун змішаного збудження, принципова схема якого зображена на рис.9.2, має дві обмотки збудження – паралельну (незалежну) і послідовну. Тому його властивості і характеристики займають проміжне положення між ДНЗ і ДПВ. Практично МРС обмоток збудження діють узгоджено.

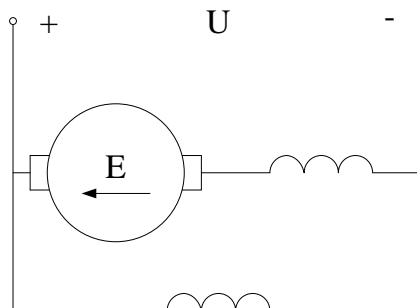


Рис.9.2.

Природні електромеханічні характеристики ДЗЗ наводяться в каталогах. Завдяки наявності паралельної обмотки збудження ДЗЗ має швидкість ідеального холостого ходу. При малих навантаженнях, коли машина ще не насичена, потік зростає від додавання до постійного потоку паралельної обмотки потоку послідовної обмотки збудження і швидкість різко знижується (див. рис. 9.3). При великих навантаженнях машина насичується і хоча МРС послідовної обмотки зростає, потік машини майже не змінюється. Тому швидкість знижується незначно лише за рахунок падіння напруги в

колі якоря. Чим більше МРС послідовної обмотки, тобто чим більше навантаження, тим м'якші характеристики (пунктирні криві на рис.9.3).

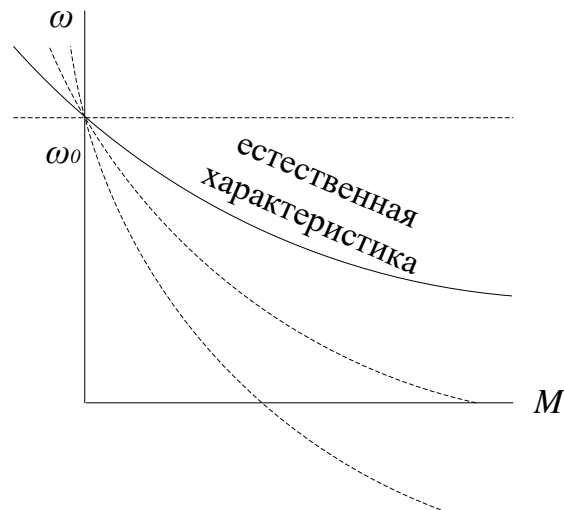


Рис.9.3.

При зміні напруги характеристики переміщуються паралельно самим собі. ДЗЗ дозволяє мати всі три способу електричного гальмування. Вони мають кілька особливостей порівняно з гальмівними режимами ДНЗ і ДПЗ. При $\omega > \omega_0$ двигун переходить в режим з рекуперацією енергії в мережу. Струм в якорі і послідовній обмотці при цьому змінює напрямок і може розмагнітити машину. Із збільшенням струму гальмівний момент наростає дуже повільно, а при великих струмах може навіть зменшуватися. Найбільший гальмівний момент становить $(0,3 \div 0,7)M_H$ і має місце при $\omega = 2\omega_0$.

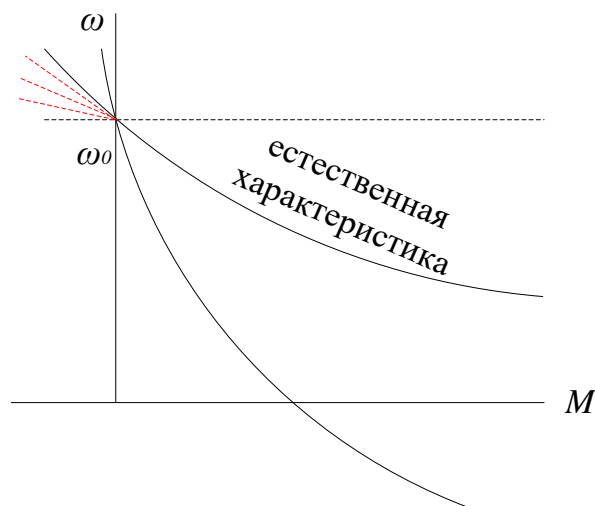


Рис.9.4

Характеристики при цьому у II квадранті, йдуть круто вгору (див. рис.9.4). Щоб уникнути розмагнічуючої дії послідовної обмотки при переході в даний гальмівний режим її шунтують (відключають), перетворюючи цим

самим двигун в генератор незалежного збудження. Тому механічні характеристики у II квадранті перетворюються в прями (пунктир).

Режим противмикання практично не відрізняється від цього режиму ДПЗ.

Для переходу ДЗЗ в режим динамічного гальмування якірне коло відключається від мережі і замикається на гальмівний опір. Оскільки струм в послідовній обмотці при цьому змінить напрямок, машина буде розмагнічуватися. Тому зазвичай цю обмотку збудження відключають і гальмування здійснюється тільки при обмотці паралельного збудження. Механічні характеристики при цьому мають вигляд штрихових прямих, як показано на рис.9.5.

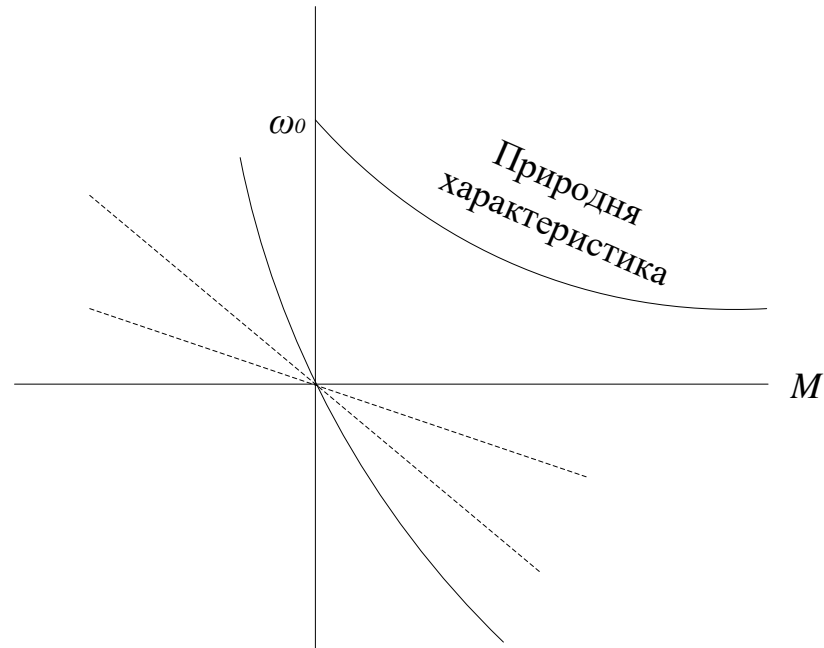


Рис.9.5.

Лекція №10. Номінальний режим роботи електроприводів.

10.1. Допустимі значення координат.

Розглянемо визначення допустимих значень основних координат – струму, моменту, швидкості.

В основі всіх цих оцінок лежать **номінальні дані двигуна**, які вказуються, як правило, на заводській емблемі або в паспорті двигуна.

До таких даних для двигунів, які призначені для роботи в тривалому режимі, відносяться: номінальна напруга U_n , В; струм I_n , А; потужність на

валу P_n , кВт; частота обертання n_n , об/хв. ($\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$, 1/с); ККД η_n ; напруга

збудження $U_{зб}$, В; струм збудження $I_{зб}$, А (для двигунів з незалежним збудженням); момент інерції J_n , $кг \cdot м^2$, виконання двигуна IP . Інші відомості, як правило, в паспорті не приводяться.

Номинальні дані відповідають одній точці в площині $\omega - M$ з допустимими та прийнятними значеннями всіх основних величин в тривалому режимі, хоча в дійсності електропривод працює в будь-яких точках і зовсім не при номінальних даних.

Номинальні дані використовуються для побудови основних (природних) характеристик двигуна, які служать основою для отримання штучних характеристик під час регулювання координат.

В електроприводах з двигунами з незалежним збудженням всі механічні та електромеханічні характеристики – прямі лінії і для їх побудови достатньо двох точок, наприклад, точки ідеального холостого ходу ($M = 0, \omega = \omega_0$) і номінального режиму ($M = M_n, \omega = \omega_n$). Дві із вказаних координат (M_n та ω_0) повинні бути визначенні по номінальним даним, причому $\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi_n}$ і $M_n = k\Phi_n I_n$, тобто потрібно знати величину $k\Phi_n$. Для її визначення зручно скористуватися рівнянням з номінальними величинами, звідки отримаємо:

$$k\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_y}{\omega_n}, \quad (10.1)$$

тут невідомим є опір якірного кола R_y – обмотки якоря, щіткового контакту, додаткових обмоток, якщо вони використовуються.

Краще всього мати надійну оцінку R_y , але часто це пов'язано з труднощами. Тоді використовують грубу (іноді дуже грубу) оцінку, яка отримана з припущення, що половина номінальних втрат ΔP_n – це втрати в міді обмотки:

$$0,5 \cdot \Delta P_n \approx I_n^2 \cdot R_y,$$

звідки

$$R_y \approx \frac{0,5 \cdot \Delta P_n}{I_n^2} = 0,5 \frac{U_n}{I_n} (1 - \eta_u). \quad (10.2)$$

Номинальний електромагнітний момент M_n , визначений як $M_n = k\Phi_n I_n$, більший за номинальний момент на валу:

$$M_{н.вал} = \frac{P_n}{\omega_n}$$

на величину ΔM .

Природні характеристики двигунів з послідовним збудженням будуються з використанням універсальних характеристик у відносних величинах.

Відносні величини зручні і для двигунів постійного струму з незалежним збудженням.

Якщо прийняти за базові величини $U_n, I_n, \omega_n, k\Phi_n = \frac{U_n}{\omega_0}$ та $R_n = \frac{U_n}{I_n}$, то отримаємо:

$$\omega^* = \frac{U^* - I^* R^*}{\Phi^*}$$

та

$$\omega^* = \frac{U^*}{\Phi^*} - \frac{M^* R^*}{(\Phi^*)^2},$$

де всі відносні величини визначені як

$$X^* = \frac{X}{X_\sigma}.$$

Тоді, прийнявши $U^* \equiv \Phi^* = 1$, отримаємо:

$$\omega^* = 1 - I^* R^*,$$

або при $I^* = 1$ (при номінальному струмі):

$$\omega^* = 1 - R^*. \quad (10.3)$$

Останнє співвідношення дозволяє дуже легко будувати характеристику при заданому R або, навпаки, визначати R , якщо характеристика відома.

Відмітимо, що, як правило, відносний опір власне якірного кола дуже невеликий: $R_{\text{я}}^* = 0,02 - 0,05$, і жорсткість природної характеристики ($R = R_{\text{я}}$) досить висока:

$$\beta_{\text{np}} = (-50) - (-20).$$

Розглянемо допустимі (безпечні) границі зміни основних координат.

Напруга обмежується номінальним значенням. В реверсивних електроприводах допускається на час реверсу двократне перевищення номінального значення.

Магнітний потік обмежений номінальним значенням, оскільки при його тривалому перевищенні струм збудження, що перевищує номінальний, може викликати недопустимий перегрів обмоток. Короткочасне (до хвилини) двократне збільшення струму збудження, що використовується, наприклад, в електроприводах з живленням якірного кола від джерела струму, допустиме, але внаслідок насичення магнітний потік при цьому збільшується незначно. При форсуваннях – пришвидшеному наростанні магнітного потоку – допустиме короткочасне 2–3-кратне перевищення номінальної напруги збудження.

Швидкість за умовами механічної міцності обмежена номінальним значенням з 20–30% допустимим перевищенням; спеціальні двигуни, що призначені для роботи з ослабленим полем, допускають 3–4-кратне перевищення номінальної швидкості.

Струм якоря – координата, що визначає надійність роботи електроприводу. В тривалому режимі струм на всіх швидкостях не повинен перевищувати номінального значення при незалежному охолодженні двигуна – суцільні лінії зі штриховкою на рис.10.1.

В двигунах, що охолоджуються власним вентилятором, в тривалому режимі необхідно знижувати струм на 30–40% при низьких швидкостях – пунктир на рис.10.1 для недопущення недопустимого перегріву. Короткочасні (секунди) перевантаження за струмом обмежуються умовами комутації

машини; допустимі перевантаження, як правило, не перевищують (2–3) I_n – лінії з подвійною штриховкою на рис.10.1. Недопустимий пуск електроприводу постійного струму (окрім малопотужних приводів) прямим включенням на номінальну напругу.

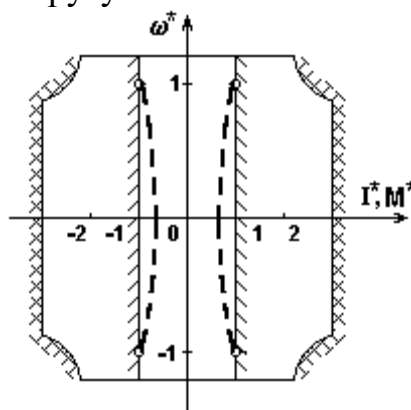


Рис.10.1.

Момент при повному потоці має ті ж обмеження, що і струм якоря. Таким чином, зона допустимих значень ω^* , I^* та M^* порівняно невелика, і рис.10.1 дає про неї деяку уяву: внутрішня область відноситься до тривалого режиму, зовнішня – до короточасних (секунди) перевантажень.

10.2. Регулювання координат у розімкнених системах

Реостатне регулювання – найпростіший та найнесприятливіший спосіб регулювання швидкості та (або) моменту. В якірне коло послідовно, якщо живлення здійснюється від джерела напруги (рис.10.2,а), вмикаються додаткові резистори.

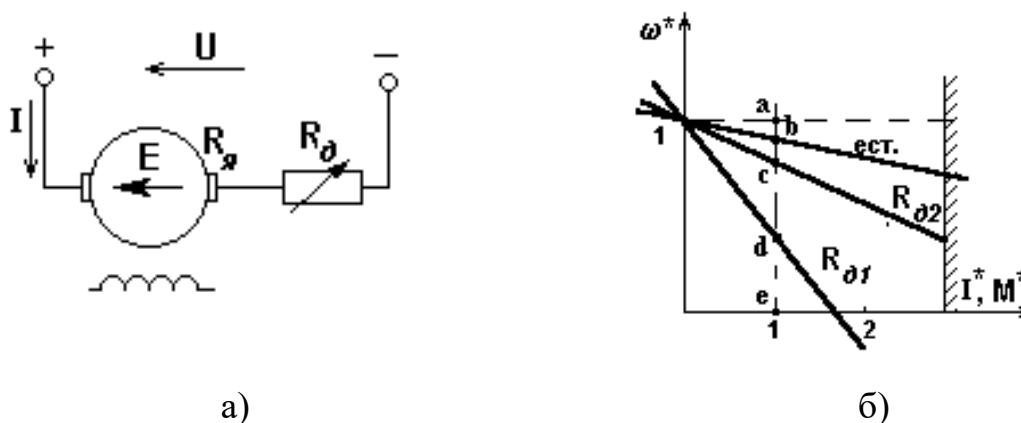


Рис.10.2. Схема (а) та характеристики (б) при реостатному регулюванні двигуна з незалежним збудженням

Швидкість ідеального холостого ходу при U_n та Φ_n і ввімкненні R_d не зміниться:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k \Phi_n},$$

а нахил характеристик (перепад швидкості) $\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi_H} = \frac{MR}{(k\Phi_H)^2}$ буде збільшуватися пропорційно $R = R_{я} + R_{д}$.

Скориставшись останнім рівнянням отримаємо при $I^* = M^* = 1$:

$$\Delta\omega^* = R^*, \quad (10.4)$$

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

Співвідношення (10.4) дозволяє легко вирішувати пряму задачу – побудувати характеристики, якщо задано R , і обернену – знайти R та $R_{д}$ для заданої характеристики. Так, на рис.10.2,б:

$$R_{я} = R_H \frac{ab}{ae}, \quad R_{д1} = R_H \frac{bc}{ae}, \quad R_{д2} = R_H \frac{cd}{ae},$$

$$R = R_{я} + R_{д1} + R_{д2} = R_H \frac{ad}{ae}.$$

В електроприводі з двигуном з послідовним збудженням при $U = U_H$ (рис.10.3,а) та відомій природній характеристиці:

$$\omega_{пр} = \frac{U_H - I(R_{я} + R_3)}{k\Phi}$$

можна використати рівняння характеристик при реостатному регулюванні:

$$\omega_{шт} = \frac{U_H - I(R_{я} + R_3 + R_{д})}{k\Phi}$$

та отримати співвідношення для розрахунку $\omega_{шт}$ для будь-якого струму:

$$\omega_{шт} = \omega_{пр} \frac{U_H - I(R_{я} + R_3 + R_{д})}{U_H - I(R_{я} + R_3)}. \quad (10.5)$$

Механічна характеристика може бути побудована по відомій залежності $M(I)$. Приблизний вигляд механічних характеристик при реостатному регулюванні показаний на рис.10.3,б. Під час живлення якірного кола від джерела струму ($I = const$) реостатне регулювання здійснюється ввімкненням $R_{д}$ паралельно якорю – рис.10.4,а.

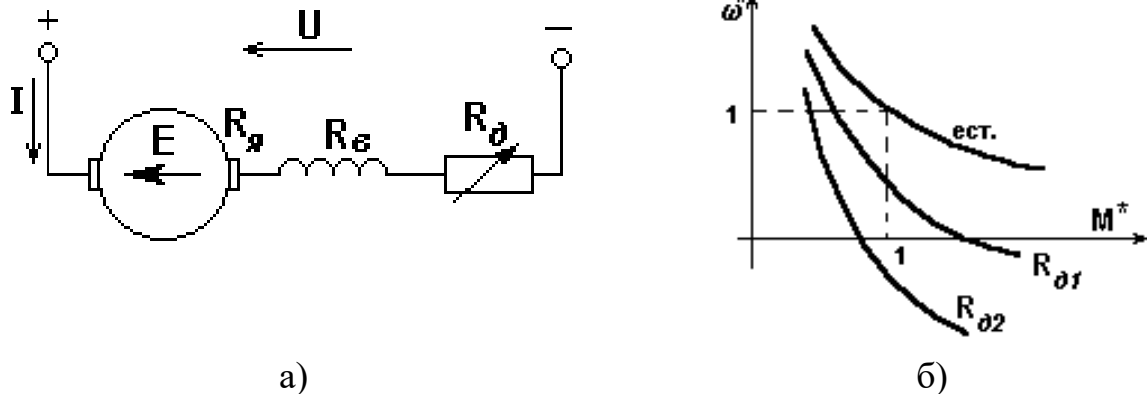


Рис.10.3.

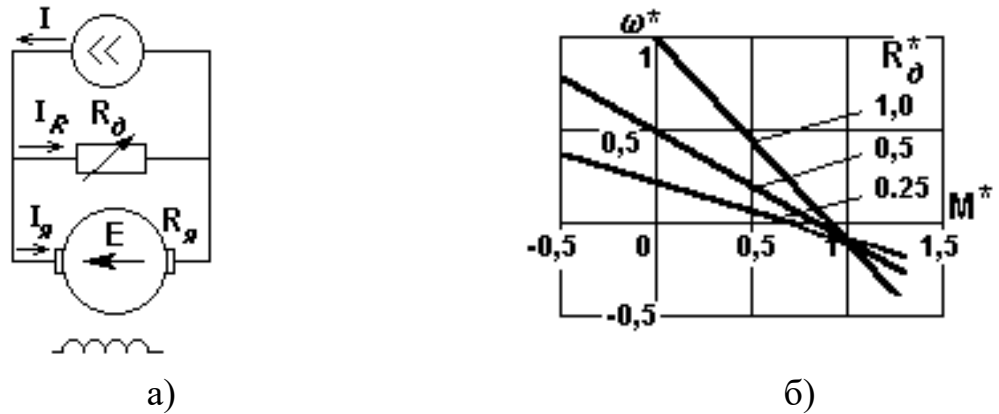


Рис.10.4.

Для схеми на рис.10.4,а реостатні характеристики можна отримати із основних рівнянь (10.1) та (10.2):

$$M^* = I_y^* \Phi^*$$

та

$$E^* = \Phi^* \omega^*,$$

що доповнені рівняннями для електричних кіл:

$$I^* = I_y^* + I_R^*,$$

$$E^* = I_R^* R_d^* - I_y^* R_y^*.$$

В даному випадку ми використали відносні величини, прийнявши за базові, як і раніше, U_n , I_n , Φ_n , ω_n .

Спільно вирішуючи рівняння можна отримати:

$$\omega^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*} - \frac{M^* (R_d^* + R_y^*)}{(\Phi^*)^2}. \quad (10.6)$$

Наявність контуру якір – додатковий резистор, в якому реалізується дія ЕРС обертання E , приводить до характеристик, що аналогічні традиційним, що отримані при живленні якоря від джерела напруги.

Відмінність полягає в тому, що швидкість ідеального холостого ходу складає:

$$\omega_0^* = \frac{I^* R_d^*}{\Phi^*}$$

зараз залежить від опору додаткового резистора R_d^* , а момент короткого замикання:

$$M_{к.з}^* = I^* \Phi^* \frac{R_d^*}{R_d^* + R_y^*} \approx I^* \Phi^*$$

при малих значеннях R_y^* , практично не залежить від R_d^* .

Таким чином, в системі джерело струму – двигун із шунтуючим резистором загальною точкою механічних характеристик при $\Phi = const$ та $R_d = var$ є точка короткого замикання, тоді як в системі джерело напруги – двигун при $R_d = var$ – точка ідеального холостого ходу. Приклади

механічних характеристик при зміні R_d ($\Phi = \Phi_n$) приведені на рис.10.4,б. Напряга на виході джерела струму змінюється при $\Phi = const$ практично пропорційно швидкості:

$$U_{dc}^* = I_{я}^* R_d^* = \omega^* \Phi^* + \frac{M^* R_{ш}^*}{\Phi^*} \approx \omega^* \Phi^*.$$

Із графіків на рис.10.4,б видно, що реостатне регулювання швидкості в системі джерело струму – двигун більш сприятливе на малих швидкостях як з точки зору жорсткості характеристик – вона тим вище, чим менша швидкість – так і з точки зору втрат – вони зменшуються зі зменшенням швидкості.

Отже, отримаємо наступні оцінки реостатного способу регулювання.

1. Регулювання однозонне – вниз від основної швидкості, оскільки ввівши R_d ми збільшуємо $\Delta\omega$, і всі штучні характеристики в I квадранті розміщуються нижче природної.

2. Діапазон реостатного регулювання невеликий (2–2,5):1, при зміні M_c на 40 – 50%.

Стабільність швидкості низька, жорсткість характеристик падає з ростом R .

$$M = \frac{U_n c - \omega c^2}{R},$$

де $c = k\Phi_n$ (в подальшому, якщо необхідно підкреслити незмінність потоку збудження двигуна, будемо користуватися символом c).

Тоді $\beta = \frac{dM}{d\omega} = -\frac{c^2}{R} \equiv -\frac{1}{R}$. Ця властивість реостатного регулювання

часто значно ускладнює його використання: невелика випадкова зміна M_c на низьких швидкостях призводить до значної зміни ω .

3. Реостатне регулювання – ступінчасте, оскільки значення опору резистора в якірному колі допускає лише дискретну зміну. Отримання великої кількості ступенів є важким завданням, так як потребує великої кількості комутаційних апаратів (контакторів).

4. При прийнятих раніше допущеннях (зовнішній обдув) можна вважати, що $M_{доп} = M_n$ на будь-якій реостатній характеристиці, оскільки магнітний потік є незмінним.

5. Втрати енергії при регулюванні значні та пов'язані з глибиною регулювання. Це безпосередньо впливає зі способу регулювання: швидкість змінюється за рахунок ввімкнення резистора – елемента, що перетворює електричну енергію, яка надходить до нього в тепло. Знайдемо кількісну оцінку втрат потужності (енергії) при реостатному регулюванні. Помноживши обидві частини рівняння (3.3) на I , отримаємо рівняння балансу потужностей:

$$UI = EI + I^2 R,$$

де $UI = P_1$ – потужність, яка споживається з мережі; $EI = P_{\text{ем}}$ – електромагнітна потужність, що перетворюється в механічну; $I^2R = \Delta P$ – втрати потужності в якірному колі.

Виразивши U та E через магнітний потік та швидкість будемо мати:

$$\Delta P = k\Phi\omega_0 I - k\Phi\omega I = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1\Delta\omega^* . \quad (10.7)$$

Цей результат – втрати потужності пропорційні відносному перепаду швидкості – дуже важливий та універсальний і може застосовуватися до ряду інших випадків.

6. Капітальні затрати на реостатне регулювання порівняно невеликі: до двигуна додається тільки недорогий резистор та комутаційна апаратура.

Реостатне регулювання є досить недосконалим способом регулювання. Але він все ще досить широко застосовується на практиці (підйомно-транспортні установки, загальнопромислові механізми тощо) у випадках, коли джерелом живлення є мережа постійного струму. Це пояснюється практично відсутністю до останнього часу інших можливостей регулювати швидкість вниз від основної при живленні від мережі постійного струму ($U = U_n = \text{const}$).

Лекція №11. Електроприводи змінного струму.

11.1. Принцип дії асинхронної машини. Моделі асинхронного електроприводу.

Один із елементів машини – статор використовується для створення магнітного поля, що обертається з певною швидкістю, а в замкнутих провідних пасивних контурах іншого елемента – ротора наводяться ЕРС, які викликають протікання струмів та утворення сил (моментів) при їх взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному – асинхронному русі ротора відносно поля, що і дало машинам даного типу назву – асинхронні.

Статор, як правило, виконаний у вигляді декількох розміщених в пазах котушок, а ротор – у вигляді «білячої клітки» (короткозамкнений ротор) або у вигляді декількох котушок (фазний ротор), які з'єднані між собою, виведені на кільця, що розміщені на валу, і з допомогою ковзаючих по ним щіток можуть бути замкнені на зовнішні резистори.

Складність повного математичного опису процесів в асинхронній машині полягає в тому, що:

1. Всі напруги, струми, потокозчеплення – змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами.

2. Взаємодіють контури, які рухаються, взаємне розміщення яких змінюється в просторі.

3. Магнітний потік нелінійно зв'язаний з струмом намагнічування (проявляється насичення магнітного кола), активні опори роторного кола залежать від частоти (ефект витіснення струму), опори всіх кіл залежать від температури тощо.

В загальному випадку для машини, що має p пар полюсів ($p = 1, 2, 3, \dots$), синхронна кутова швидкість ω_0 , рад/с, тобто швидкість поля, визначається за формулою:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (11.1)$$

для частоти обертання n_0 , об/хв., будемо мати:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (11.2)$$

тобто, під час живлення від мережі $f_1 = 50$ Гц синхронна частота обертання може бути 3000, 1500, 1000, 750, 600 ... об/хв. в залежності від конструктивного виконання машини.

Вирази (11.1) та (11.2) мають принципний характер: вони показують, що для даної машини є лише одна можливість змінювати швидкість поля – змінювати частоту джерела живлення f_1 .

Процеси при $\omega = \omega_0$.

Нехай ротор обертається зі швидкістю ω_0 , тобто його обмотки не перетинають силових ліній магнітного поля і він не здійснює суттєвого впливу на процеси.

При грубому наближенні можна представити обмотку фази статора як деяку ідеальну котушку, до якої прикладена змінна напруга $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$. Як правило, напругу та інші змінні, що змінюються синусоїдально позначають великими літерами, якщо інтерес представляють їх діючі значення, або додають точку зверху, якщо розглядають вектори, що мають амплітуду $U_m = \sqrt{2U}$ та фазу φ .

Прикладена напруга \dot{U}_1 врівноважується ЕРС самоіндукції \dot{E}_1 (рис. 11.1,а,б):

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{об}, \quad (11.3)$$

де w_1 – число витків обмотки; $k_{об}$ – коефіцієнт, що залежить від конкретного виконання обмотки.

Наближено можна рахувати, що магнітний потік визначається прикладеною напругою, частотою та параметрами обмотки:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об}} \equiv \frac{U_1}{f_1}. \quad (11.4)$$

Струм в обмотці (фазі) статора – струм намагнічення визначається тільки магнітним потоком та характеристикою намагнічення машини (рис.11.1,в):

$$I_1 = I_{10} = I_\mu.$$

В серійних машинах при $U_1 = U_{1н}$ та $f_1 = f_{1н}$, тобто при номінальному магнітному потоці струм холостого ходу I_{10} складає, як правило, 30% – 40% від номінального струму статора $I_{1н}$.

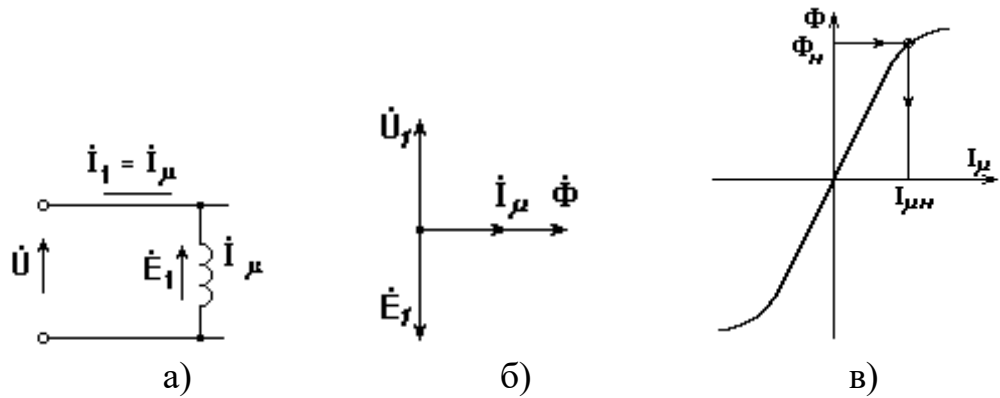


Рис.11.1.

Процеси під навантаженням.

При навантаженні вала $\omega \neq \omega_0$ відмінність швидкостей ω та ω_0 прийнято характеризувати ковзанням:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}. \quad (11.5)$$

Тоді в роторному колі з'явиться ЕРС E'_2 , що наведена по закону електромагнітної індукції та рівна:

$$E'_2 = E_1 \cdot s, \quad (11.6)$$

штрихом позначені приведені величини, що враховують неоднаковість обмоток статора та ротора. Частота наведеної ЕРС складає:

$$f_2 = f_1 \cdot s. \quad (11.7)$$

Струм I'_2 в роторному колі, що має опір R'_2 та індуктивність L'_2 , знаходиться таким чином:

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

або після простих перетворень:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2)^2}}, \quad (11.8)$$

де X'_2 – індуктивний опір розсіяння вторинного кола при частоті f_1 .

Дане рівняння відповідає традиційній схемі заміщення фази асинхронного двигуна – рис.11.2, в якій враховані параметри статора R_1 та X_1 . Ця проста модель придатна для аналізу статичних режимів при симетричному живленні з симетричним живленням.

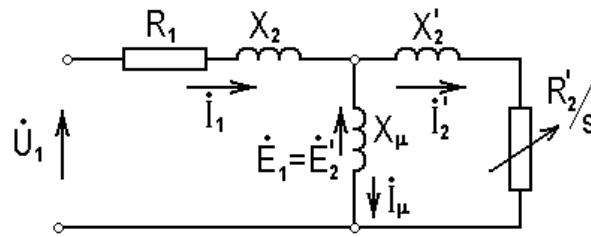


Рис.11.2.

11.2. Механічні характеристики. Енергетичні режими

Для отримання механічної характеристики ще більше спростимо модель – винесемо контур намагнічення на затискачі – рис.11.3,а.

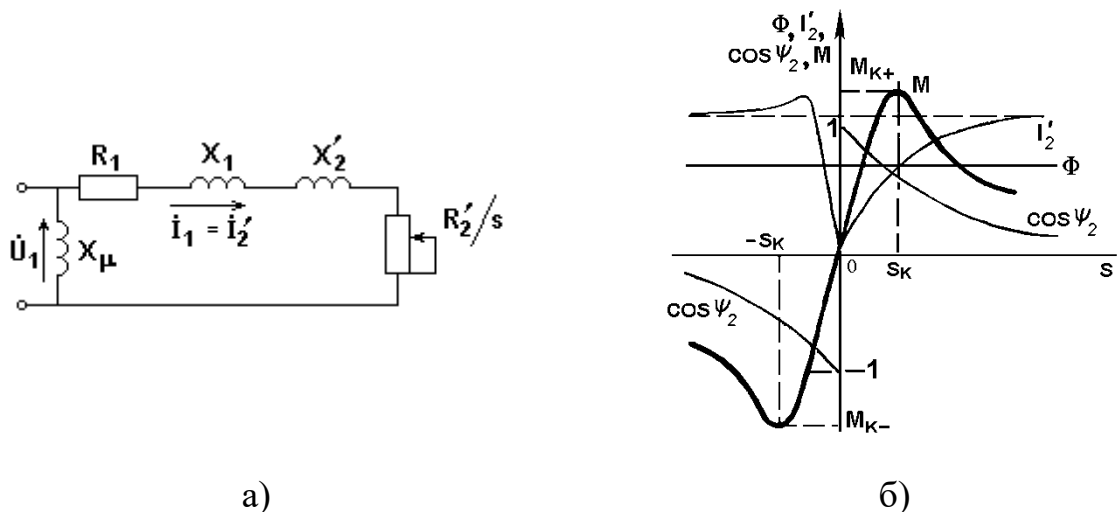


Рис.11.3. Спрощена схема заміщення (а) та характеристики машини (б)

Оскільки

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_{2a} = k \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2,$$

де I_{2a} – активна складова струму ротора; ψ_2 – кут між \dot{E}_2 та \dot{I}_2 ; якісне уявлення про механічну характеристику $M(s)$ можна отримати, простеживши залежність кожного із трьох множників від s .

Магнітний потік Φ в першому наближенні відповідно до (4.4) не залежить від ковзання s – рис. 4.3,б. Струм ротора (4.8) рівний нулю при $s = 0$ і асимптотично прямує до $\frac{U_1}{X_2'}$ при $s \rightarrow \pm\infty$ – рис.11.3,б. Останній множник легко визначити по схемі заміщення:

$$\cos\psi_2 = \frac{R_2'/s}{\sqrt{\left(R_2'/s\right)^2 + (X_2')^2}},$$

$\cos\psi_2$ близький до ± 1 при малих s і асимптотично прямує до нуля при $s \rightarrow \pm\infty$. Момент, як добуток трьох множників, рівний нулю при $s=0$ ($\omega = \omega_0$ – ідеальний холостий хід), досягає позитивного $M_{к+}$ та негативного $M_{к-}$ максимумів – критичних значень при деяких критичних значеннях ковзання $\pm s_k$, а тоді при $s \rightarrow \pm\infty$ прямує до нуля за рахунок третього множника.

Рівняння механічної характеристики отримаємо, порівнявши втрати в роторному колі, що виражені через механічні та електричні величини. Потужність, яка споживається з мережі, якщо знехтувати втратами в R_1 , приблизно рівна електромагнітній потужності:

$$P_1 \approx P_{ем} = M \cdot \omega_0,$$

а потужність на валу визначається як:

$$P_2 = M \cdot \omega.$$

Втрати в роторному колі складуть:

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 \approx M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot s = P_1 \cdot s, \quad (11.9)$$

або при вираженні їх через електричні величини:

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

звідки:

$$M = \frac{3(I_2')^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s}.$$

Підставивши в останній вираз I_2' з формули (11.8) та знайшовши екстремум функції $M = f(s)$ і M_k та s_k , що йому відповідають, будемо мати:

$$M_k = \frac{2M_k(1 + \alpha \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\alpha \cdot s_k}, \quad (11.10)$$

де $\alpha = \frac{R_1}{R_2'}$:

$$M_k = \frac{3U^2}{2\omega_0[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}, \quad (11.11)$$

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}. \quad (11.12)$$

На практиці інколи вважають, що $\alpha = 0$, тобто нехтують активним опором обмоток статора. Це, як правило, не призводить до суттєвих похибок при $P_H > 5\text{кВт}$, але може невинувато погіршити модель при малих

потужностях. При $\alpha = 0$ вирази (11.10) – (11.12) мають вигляд (формула Клосса):

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (11.10,а)$$

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \cdot X_k}, \quad (11.11,а)$$

$$s_k = \frac{R'_2}{X_k}, \quad (11.12,а)$$

де $X_k = X_1 + X'_2$ – індуктивний опір розсіяння машини.

В рівнянні (11.10,а) при $s \ll s_k$ можна знехтувати першим членом в знаменнику та отримати механічну характеристику на робочій ділянці в вигляді:

$$M \approx \frac{2M_k \cdot s}{s_k}. \quad (11.13)$$

Як видно з рис. 11.3,б та виразів (11.10) та (11.10,а), жорсткість механічної характеристики асинхронних двигунів змінна, на робочій ділянці $\beta < 0$, а при $|s| > |s_k|$ – позитивна.

Асинхронний електропривод як і електропривод постійного струму, може працювати в двигунному та трьох гальмівних режимах з таким же, як і в електроприводі постійного струму розподіленням потоків енергії – рис. 11.11.

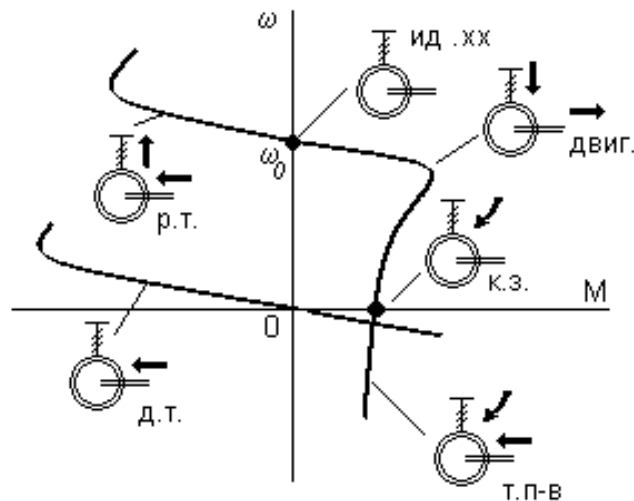


Рис.11.4.

Рекуперативне гальмування здійснюється при обертанні двигуна активним моментом зі швидкістю $\omega > \omega_0$. Цей режим буде мати місце, якщо при обертанні ротора зі швидкістю ω зменшити швидкість обертання поля ω_0 . Роль активного моменту тут буде виконувати момент інерційних мас ротора, що обертається.

Для здійснення гальмування противмиканням необхідно змінити місцями дві будь-які фази статора – рис. 11.5. При цьому, змінюється напрям обертання поля, машина гальмує в режимі противмикання, а після цього реверсується.

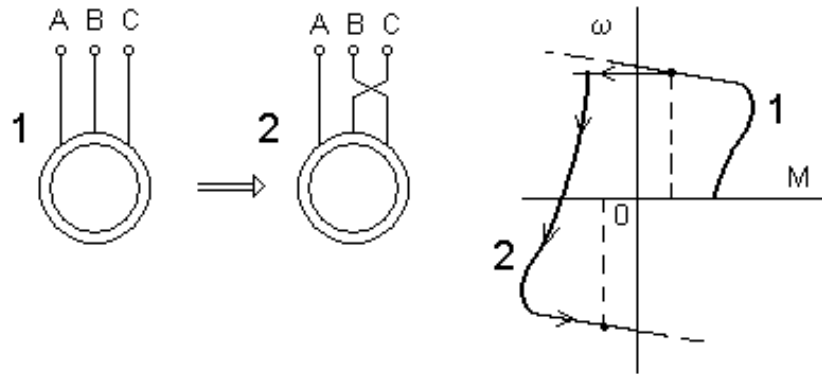


Рис.11.5.

Специфічним є режим динамічного гальмування, яке являє собою генераторний режим відключеного від мережі змінного струму асинхронного двигуна, до статора якого підведений постійний струм I_{Π} . Цей режим застосовується в ряді випадків, коли після відключення двигуна від мережі необхідна його швидка зупинка без реверсу.

Постійний струм, що підводиться до обмотки статора, створює нерухоме в просторі поле. При обертанні ротора в його обмотці наводиться змінна ЕРС, під дією якої протікає змінний струм. Цей струм створює також нерухоме поле.

Складаючись, поля статора та ротора утворюють результуюче поле, в результаті взаємодії з яким струму ротора виникає гальмівний момент. Енергія, що надходить з валу двигуна, розсіюється при цьому в опорах роторного кола.

В режимі динамічного гальмування поле статора нерухоме, ковзання записується як:

$$s = \frac{\omega}{\omega_0}$$

і справедливі співвідношення для механічної характеристики, що аналогічні (11.10,а) – (11.12,а):

$$M = \frac{2M_{к.т}}{\frac{s}{s_{к.т}} + \frac{s_{к.т}}{s}}, \quad (11.14)$$

$$M_{к.т} = \frac{3I_{екв}^2 \cdot X_{\mu}^2}{2\omega_0 \cdot (X_{\mu} + X_2')}, \quad (11.15)$$

де $I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\Pi}$ – при з'єднанні обмоток статора в зірку; $I_{екв} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\Pi}$ – при з'єднанні обмоток статора в трикутник.

$$s_{к.т} = \frac{R'_2}{X_\mu + X'_2}. \quad (11.16)$$

Оскільки, при ненасиченій машині $X_\mu \gg X'_2$, критичне ковзання в режимі динамічного гальмування $s_{к.т}$ значно менше s_k .

11.3. Номінальні дані асинхронних електроприводів

На емблемі або в паспорті асинхронного двигуна, як правило, вказані номінальні лінійні напруги при з'єднанні обмоток в зірку та трикутник $U_{1Y}/U_{н\Delta}$, струми $I_{1Y}/I_{1\Delta}$, частота $f_{1н}$, потужність на валу P_n , частота обертання n_n , ККД η_n , $\cos \varphi_n$.

Для двигунів з короткозамкненим ротором в каталозі приводяться кратності пускового струму $k_I = \frac{I_{1п}}{I_{1н}}$, пускового моменту $k_M = \frac{M_p}{M_n}$, критичного моменту $\lambda = \frac{M_k}{M_n}$, інколи – типові природні характеристики.

Для двигунів з фазним ротором вказується ЕРС на розімкнених кільцях загальмованого ротора $E_{2н}$ при $U_{1н}$ та номінальний струм ротора $I_{2н}$.

Приведених в каталозі даних недостатньо для визначення по них параметрів схеми заміщення та користуватися нею при всіх розрахунках, але по каталожним даним можна побудувати природну електромеханічну та механічну характеристики, скориставшись декількома опорними точками (рис.11.6).

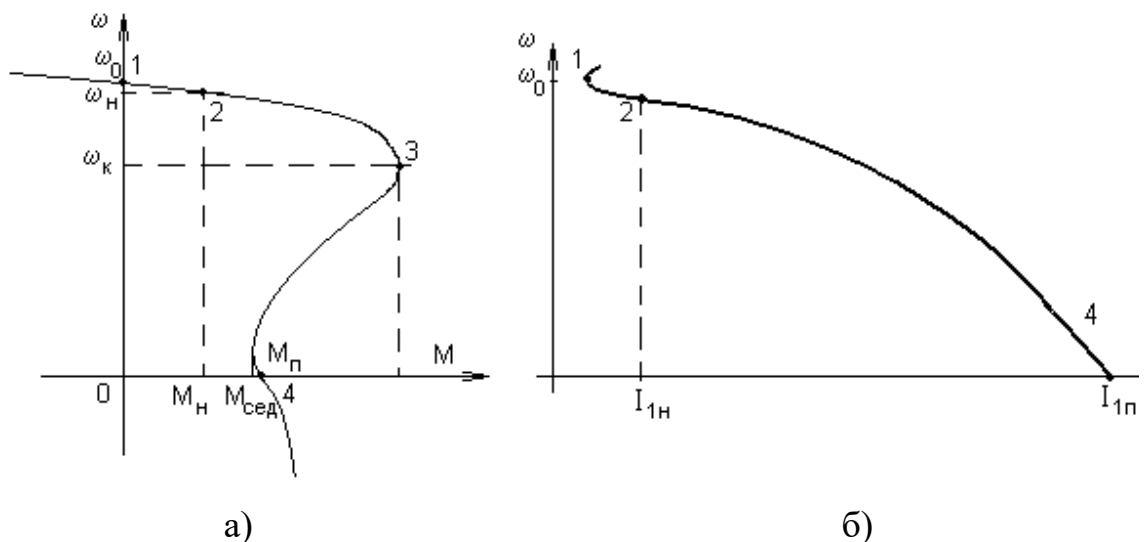


Рис.11.6. До побудови природних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Точка 1 ($\omega = \omega_0$, $M = 0$, $I_1 = I_{xx} \approx 0,35 \cdot I_{1H}$) вибирається з ряду $n_0 = 3000, 1500, 1000, 750, 600$ об/хв., як ближча більша до n_H , $\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}$.

Точка 2 – номінальна. Для визначення **точки 3** ($\omega = \omega_K$, $M = M_K$) потрібно розрахувати номінальний момент $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$, визначити критичний момент $M_K = \lambda \cdot M_H$ та вирахувати s_K за (11.10) або (11.10,а), підставивши в ці рівняння M_H та $s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}$. **Точка 4** ($\omega = 0$, $M = M_{II}$, $I_1 = I_{II}$)

розраховується безпосередньо по каталожних даних.

Сучасні двигуни з короткозамкненим ротором проектують так, щоб мати підвищений пусковий момент M_{II} , і в деяких каталогах вказують так званий «сідловий» момент $M_{сід}$ (рис.11.6,а).

Деяке представлення про характеристики сучасних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором можна отримати з наступних даних:

– $s_H = 0,01 - 0,05$ (менші значення у двигунів більшої потужності – сотні кВт);

– $k_I = 5 - 7$;

– $k_M = 1,3 - 1,6$;

– $\lambda = 1,8 - 3,0$.

Як впливає з цих даних, природні властивості асинхронних двигунів досить несприятливі: малий пусковий момент, великий пусковий струм, обмежені можливості керування координатами.

Лекція №12. Штучні механічні характеристики АД при зміні параметрів кола двигуна і живильної мережі.

12.1. Загальні положення.

Штучні механічні характеристики АД можна отримати зміною величини і частоти напруги живлення, введенням в коло ротора або статора додаткового опору і т.п. Розглянемо, який вплив на механічні характеристики двигуна надають перераховані чинники.

При зміні підводиться до двигуна напруги змінюється момент, тому що він пропорційний квадрату фазної напруги. Синхронна швидкість $\omega = \frac{2\pi f}{p_{II}}$ і

критичне ковзання, а також форма характеристики зберігаються (рис.12.1).

Зміниться величина швидкості при M_H , однак, ця зміна буде незначною.

Зменшення напруги призводить до значного зниження перевантажувальної здатності $\lambda_M = \frac{M_{KP}}{M_H}$, але знижується і струм холостого ходу. При $U_1 = U_{1H}$ магнітне коло машини насичене.

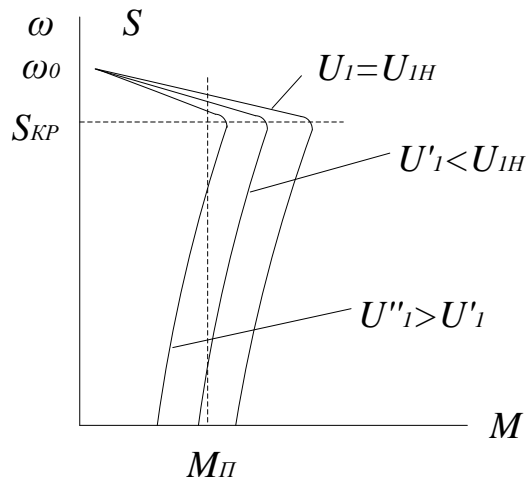


Рис.12.1.

Збільшення U_1 при $f = \text{const}$ призводить при інших рівних умовах до швидкого збільшення струму намагнічування. Оскільки у двигунів нормального виконання струм холостого ходу $I_0 \cong (0,25 \div 0,35)I_{1н}$, перевищення U_1 на $(20 \dots 30)\%$ може збільшити I_0 до значень, що перевищують $I_{1н}$, і двигун може нагріватися понад допустиму температуру навіть при відсутності корисного навантаження.

Для обмеження величини пускового струму АД з к.з. ротором під час роботи від мережі обмеженої потужності або зменшення кидків струму і пускового моменту, що важливо для пом'якшення ударів в передачах, іноді в коло статора вводять додатковий активний або індуктивний опір. Величина опору визначається потрібним значенням пускового струму. Якщо потрібно обмежити пусковий струм двигуна при номінальних умовах до значення $I_{п} = \alpha I_{п}'$, де $\alpha < 1$, то для цього повний опір к.з. в початковий момент пуску має бути $Z_{кп} = \frac{Z_{к}}{\alpha}$, де $z_{к} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{п}}$ - повний опір к.з. при номінальних умовах.

12.2. Визначення додаткових опорів.

Розрахункові формули для визначення додаткових опорів можна знайти використовуючи трикутники короткого замикання (рис.12.2).

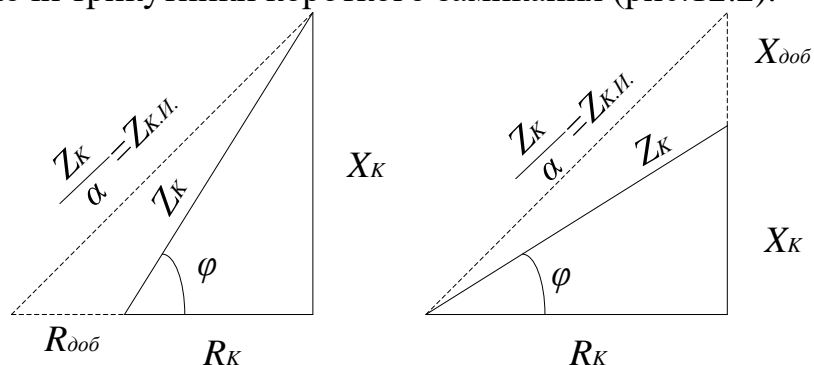


Рис.12.2.

$$R_{\text{доd}} = \sqrt{\left(\frac{z_{\text{к}}}{a}\right)^2 - X_{\text{к}}^2} - R_{\text{к}}. \quad X_{\text{доd}} = \sqrt{\left(\frac{Z_{\text{к}}}{a}\right)^2 - R_{\text{к}}^2} - X_{\text{к}}.$$

При введенні в колоротора АД додаткового активного опору збільшується критичне ковзання $S_{\text{кр}} = \frac{R_2 + R_{2\text{доd}}}{\sqrt{r_1^2 + X_{\text{к}}^2}}$, максимум моменту ($M_{\text{кр}}$)

зміщується в бік більших ковзань, а величина його не змінюється, тому що $M_{\text{кр}}$ не залежить від активного опору роторної кола. Введення в коло ротора $R_{\text{доd}}$ використовується для обмеження пускового струму і збільшення пускового моменту (рис.12.3). Фізично збільшення пускового моменту пояснюється збільшенням активної складової струму ротора (збільшенням числа провідників обмотки ротора, на які електромагнітні сили діють у напрямку обертання і зменшенням числа провідників, на які ці сили діють проти напрямку обертання).

При зміні частоти мережі і $U_1 = \text{const}$, змінюється швидкість обертання магнітного поля машини $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n}$ і критичний момент (див. рис.12.11).

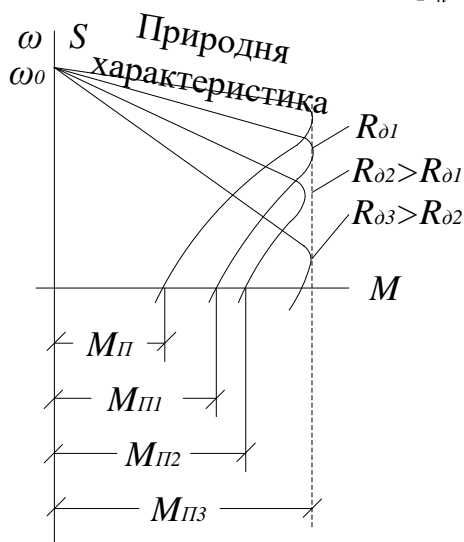


Рис.12.3.

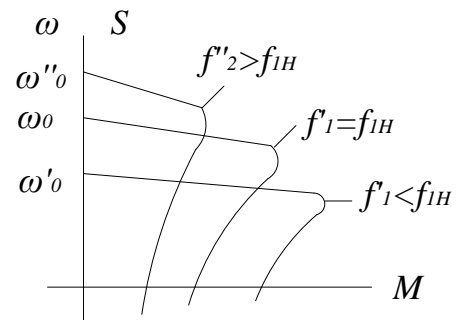


Рис.12.4.

Змінюється і магнітний потік, причому він зменшується з ростом частоти і збільшується при її зменшенні. Це видно з рівняння рівноваги ЕРС для однієї фази статора $\dot{U}_1 = I_1 \cdot Z_1 - E_1$. Нехтуючи падінням напруги в колі статора, можна написати для абсолютних значень ЕРС і напруги при $U_1 = \text{const}$.

$$\dot{U}_1 \cong E_1 = 4,44 \cdot W_1 \cdot K_{\text{об1}} \cdot f_1 \cdot \Phi_M = \text{const}.$$

Звідси видно, що при зростанні f_1 потік зменшується, а при зменшенні f_1 він росте. Цим пояснюється і зміна $M_{\text{кр}}$ двигуна і його перевантажувальної здатності.

Збільшення потоку веде до насичення магнітного кола машини, збільшення намагнічу вального струму, наслідком чого є погіршення енергетичних показників двигуна. Зменшення потоку при $M_c = \text{const}$ призводить до збільшення струму ротора, що видно з виразу $M = C_M \cdot \phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2$, і споживаного з мережі струму, отже, до перевантаження обмоток двигуна при недовикористанні сталі. Тому для найкращого використання двигуна бажано, щоб потік був завжди постійним. Для цього при зміні частоти необхідно змінювати і величину напруги, що підводиться, причому не тільки в функції частоти, але і в функції навантаження. У найпростішому випадку при зміні напруги в тій же мірі, що і частоти, тобто при $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$, перевантажувальна здатність двигуна особливо при частотах, менших $0,5 f_{1H}$, буде зменшуватися (див. рис.12.5).

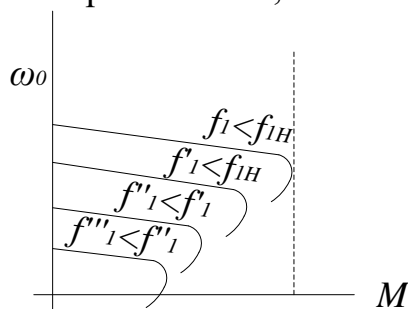


Рис.12.5.

Це пояснюється впливом спаду напруги на опорах обмотки статора, яке призводить до зменшення напруги на намагнічувальному контурі обмотки статора, до зменшення магнітного потоку і, отже, до зменшення критичного моменту двигуна.

Лекція №13. Гальмівні режими асинхронного двигуна.

13.1. Загальні положення.

Асинхронний двигун може працювати у всіх трьох гальмівних режимах:

- а) з рекуперацією енергії в мережу;
- б) в режимі противовключення;
- в) в режимі динамічного гальмування.

При відсутності зовнішнього статичного моменту на валу двигун, підключений до мережі, буде обертатися зі швидкістю, близькою до синхронної, споживаючи з мережі енергію, необхідну для покриття втрат в сталі і обмотках. Якщо за рахунок зовнішньої сили ротор обертається із синхронною швидкістю, то мережа буде покривати тільки втрати в статорі, а механічні та в сталі будуть покриватися зовнішньою силою.

У двигунному режимі, коли $\omega < \omega_0$, що обертається магнітне поле перетинає провідники обмоток статора і ротора в однаковому напрямку, ЕРС статора E_1 і ротора E_2 збігаються по фазі.

При $\omega = \omega_0$ ЕРС в роторі не наводиться, тому що його провідники не перетинаються магнітним полем.

При $\omega > \omega_0$ провідники ротора будуть перетинатися в протилежному напрямку, а статора – в попередньому напрямі. ЕРС ротора E_2 змінює свій знак на зворотний і машина переходить у генераторний режим з

рекуперацією енергії в мережу. Що стосується струму, то змінює свій напрямок тільки його активна складова, а реактивна складова при від'ємному ковзанні зберігає свій напрямок. Це видно і з виразу для струму ротора:

$$I_2 = \frac{E_2' \cdot S}{r_2' + j \cdot x_2' \cdot S} = \frac{E_2 \cdot S \cdot r_2'}{r_2'^2 + (x_2' \cdot S)^2} - j \cdot \frac{E_2' \cdot x_2' \cdot S^2}{r_2'^2 + (x_2' \cdot S)^2}.$$

Такі ж висновки можна зробити і на основі аналізу активної і реактивної потужностей. Дійсно

$$P_a = P_{\Sigma M} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{S} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{S}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_K^2} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2' \cdot S}{(r_1 \cdot S + r_2')^2 + (x_K \cdot S)^2}.$$

Тобто активна потужність змінює напрямок (віддається в мережу), а з виразу для реактивної потужності Q_2 випливає, що при $S < 0$ реактивна потужність вторинного контуру Q_2 зберігає свій знак незалежно від режиму роботи машини.

$$Q_2 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_2' \cdot \sin \psi_2 = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_K^2}} \cdot \frac{x_K}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_K^2}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot x_K \cdot S^2}{(r_1 \cdot S + r_2')^2 + (x_K \cdot S)^2}.$$

Це означає, що АД як у двигунному, так і в генераторному режимі споживає реактивну потужність, необхідну для створення обертового магнітного поля.

Гальмування з віддачею енергії в мережу використовується в підйомно-транспортних установках, при спуску важких вантажів. Під дією вантажу ротор машини буде обертатися зі швидкістю $\omega > \omega_0$, вона переходить в генераторний режим і створює гальмівний момент. При рівності $M = M_c$ вантаж буде спускатися з усталеною швидкістю ω_c , як показано на рис.13.1,а. Для нормального спуску вантажу M_c не повинен перевищувати $M_{кр}$ в генераторному режимі.

При реактивному M_c короткочасно режим з рекуперацією енергії можна отримати, якщо АД допускає перемикання обмотки статора з однієї пари полюсів на іншу, як показано на рис.13.1, б. Цей режим має місце на ділянці ВС після перемикання числа пар полюсів з $p_n=1$ на $p_n=2$.

В режимі противмикання ротор двигуна обертається в напрямку, протилежному дії моменту двигуна. Його ковзання $S > 1$, а частота струму в роторі f_2 більша за частоту f_1 живлячої мережі $f_2 = f_1 \cdot S$. Тому незважаючи на те, що струм ротора у 7-9 разів більший номінального, тобто більший пускового струму, момент унаслідок великої частоти струму, отже, великого індуктивного опору роторного кола ($x_2 \cdot S$), буде невеликий, тобто струм майже чисто індуктивний. Тому для збільшення початкового гальмівного моменту АД з фазовим ротором включають великий додатковий опір.

$$r_{\text{доо}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} \cdot (S_{\text{Нш}} - S_H) = r_{2H} \cdot (S_{\text{Нш}} - S_H),$$

де E_{20} – номінальна ЕРС ротора при $S=1$;

S_H – номінальне ковзання;

$S_{\text{Нш}}$ – ковзання при номінальному навантаженні на штучній характеристиці.

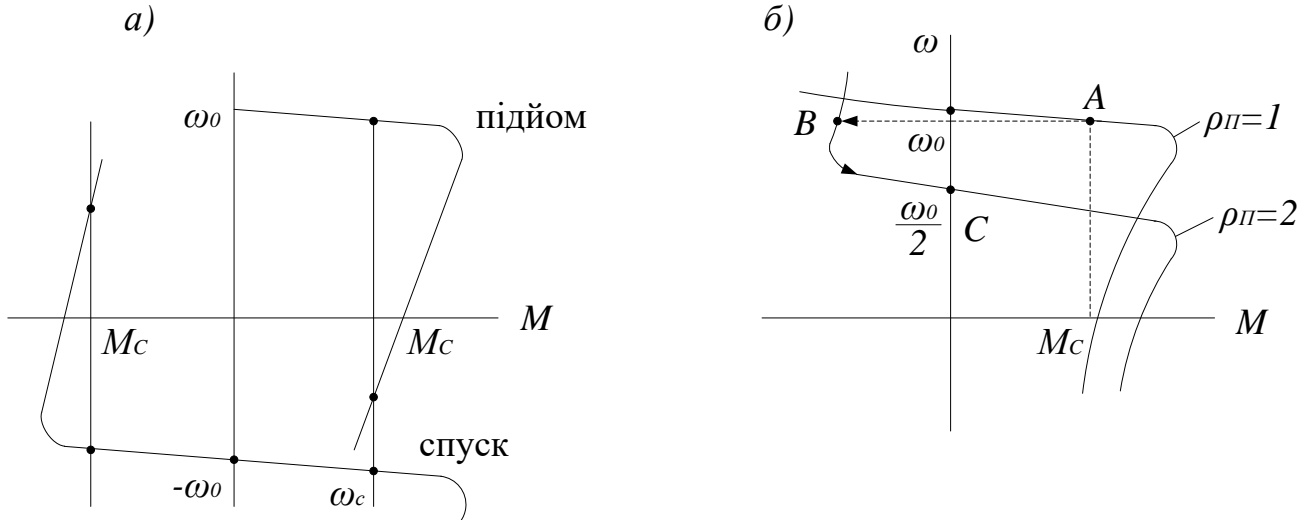


Рис.13.1.

При спуску вантажу в режимі противмикання гальмування протікає на прямолінійній ділянці механічної характеристики, жорсткість якої визначається активним опором роторної ланцюга. Процес переходу АД з двигунного режиму в режим проти вмикання при гальмівному спуску вантажу показаний на рис.13.2,а.

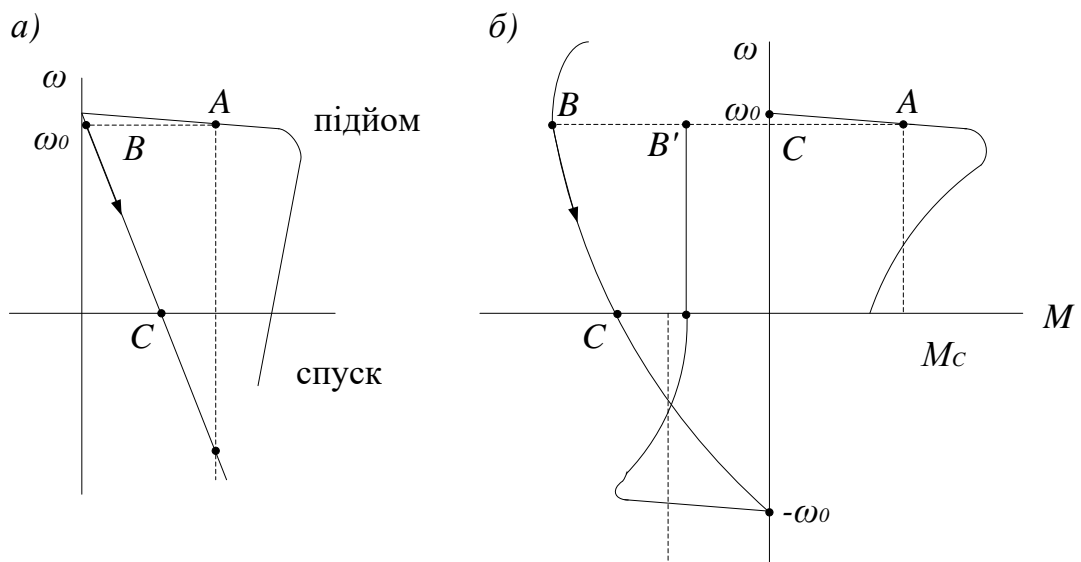


Рис.13.2.

Для переходу АД в режим проти вмикання при реактивному моменті опору необхідно на ходу двигуна змінити порядок чергування фаз живлячої

напруги, що призведе до зміни напрямку обертання магнітного поля, і одночасно ввести в коло ротора додатковий опір з метою збільшення початкового гальмівного моменту і зменшення кидка струму. Процес показаний на рис.13.2,б.

Гальмування противмиканням АД при реактивному моменті опору не ефективне, так як початковий гальмівний момент при S близькому до 2, із-за великого реактивного опору, рівного $x_2 \cdot S$, буде невеликим (відрізок СВ' на рис.13.2,б).

Розглянемо тепер динамічне гальмування АД. При відключенні обмотки статора АД від мережі, зберігається лише незначний магнітний потік від залишкового намагнічування сталі статора. ЕРС, що наводиться цим потоком в обертовому роторі і струм ротора будуть дуже малими. Взаємодія струму ротора з потоком не може створити електромагнітного моменту. Тому для отримання належного гальмівного моменту необхідно штучно створити належний магнітний потік статора. Це може бути досягнуто подачею в обмотки статора постійного струму або підключенням до них конденсаторів, або тиристорного перетворювача частоти, що забезпечує протікання по обмотках статора випереджуючого струму, що створює ефект ємності. В 1-му випадку буде мати місце режим динамічного гальмування з незалежним збудженням, у 2-му – з самозбудженням.

Розглянемо тільки 1-й випадок, оскільки гальмування, відповідне цьому випадку, є основним. При динамічному гальмуванні з незалежним збудженням обмотки статора відключаються від мережі трифазного струму і підключаються до джерела постійного струму. Цей струм створює нерухомий у просторі магнітний потік, який при обертанні ротора наводить в останньому ЕРС.

13.2. Симетричне включення.

Симетричне включення 3-х обмоток статора в мережу постійного струму неможливо без їх перемикань. Тому використовується одна із схем, наведених на рис.13.3.

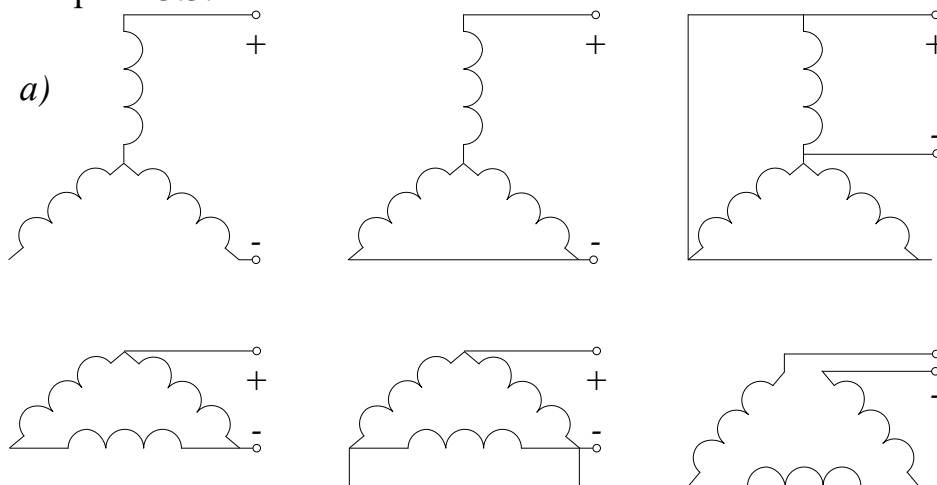


Рис.13.3.

Оскільки при живленні постійним струмом обмотки мають тільки провід-никові, для отримання потрібного значення струму досить невеликого за величиною напруги. Як джерело постійного струму для двигунів невеликої та середньої потужності використовуються напівпровідникові випрямлячі, а для великих двигунів можуть використовуватися спеціальні генератори постійного струму низької напруги.

Для виведення рівняння механічної характеристики АД в режимі динамічного гальмування режим синхронного генератора, в який перетворюється АД після підключення до джерела постійного струму, доцільно замінити еквівалент-ним режимом АД, вважаючи, що його статор замість постійного живиться змінним струмом. При такій заміні МРС створюється спільно обмотками статора і ротора і має бути дотримана рівність МРС для обох випадків, тобто $F_{\text{пост}} = F_{\text{зм}}$. Визначити МРС, створювану постійним струмом, для схеми «а» рис.13.3 можна з векторної діаграми рис.13.4, в якій вектор МРС обмоток статора розташовується так, як розташовані обмотки статора, по яких протікає постійний струм $I_{\text{п}}$.

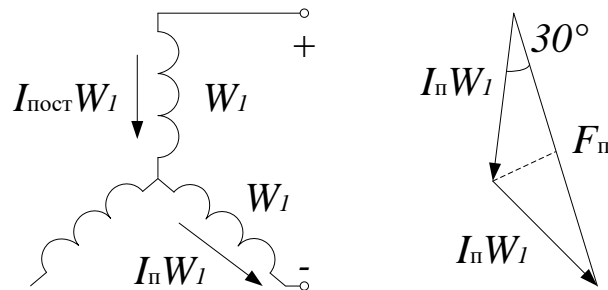


Рис.13.4.

$$F_{\text{пост}} = 2 \cdot I_{\text{пост}} \cdot W_1 \cdot \cos 30^\circ = \frac{2 \cdot I_{\text{п}} \cdot W_1 \cdot \sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{п}} \cdot W_1.$$

Амплітуда МРС, створюваної змінним струмом I_1 при протіканні його по обмоткам статора

$$F_{\text{зм}} = \frac{3}{2} I_{1M} \cdot W_1 = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1M} \cdot W_1.$$

Прирівнюючи $F_{\text{пост}}$ і $F_{\text{зм}}$, отримаємо значення змінного струму, еквівалент-ного постійному

$$\sqrt{3} \cdot I_{\text{п}} \cdot W_1 = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot W_1; I_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\text{п}}, \text{ а } I_{\text{п}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_1.$$

Необхідні напруги і потужність постійного струму

$$U = I_{\text{п}} \cdot 2r_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_1 \cdot 2r_1; P = I_{\text{п}}^2 \cdot 2r_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot I_1 \right)^2 \cdot 2r_1 = 3I_1^2 \cdot r_1.$$

Визначивши струм I_1 , машину в гальмівному режимі можна уявити як нормальний АД. Однак його робота в режимі динамічного гальмування істотно відрізняється від роботи в нормальному двигунному режимі, в якому

намагнічувальний струм і магнітний потік при зміні ковзання практично не змінюються. При динамічному гальмуванні магнітний потік при зміні ковзання змінюється внаслідок безперервної зміни результуючої МРС, що складається з незмінною МРС статора (постійного струму) і змінної МРС ротора (змінного струму змінної частоти).

Результуючий намагнічувальний струм, приведений до числа витків обмотки статора

$$I_{\mu} = \frac{I_1 \cdot W_1 + I_2' \cdot W_2}{W_1} .$$

З векторної діаграми струмів (рис.13.5) слідує:

$$I_1 \cdot \cos \psi_1 = I_2' \cdot \cos \psi_2 .$$

$$I_1 \cdot \sin \psi_1 = I_{\mu} + I_2' \cdot \sin \psi_2 .$$

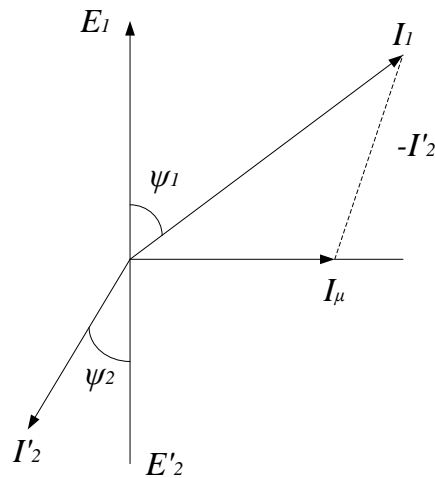


Рис.13.5.

Звівши в квадрат, праві і ліві точки цих рівнянь і почленно складаючи, отримаємо:

$$I_1^2 = I_2'^2 + I_{\mu}^2 + 2I_{\mu} \cdot I_2' \cdot \sin \psi_2 .$$

Намагнічувальний струм дорівнює $I_{\mu} = \frac{E_1}{x_{\mu}}$.

У приведеній машині $E_1 = E_2'$, де E_2' - ЕРС ротора при синхронній швидкості ω_0 , що відповідає частоті мережі. При ω , відмінній від ω_0 , ЕРС ротора дорівнюватиме $E_2' \cdot \frac{\omega}{\omega_0} = E_2' \cdot \nu$, де ν - відносна швидкість або ковзання в режимі динамічного гальмування.

При цьому рівняння рівноваги ЕРС для роторного кола має вигляд $E_2' \cdot \nu = I_2' \cdot Z_2'$, а намагнічувальний струм, виражений через E_2' :

$$I_{\mu} = \frac{E_1}{x_{\mu}} = \frac{E_2'}{x_{\mu}} = \frac{I_2' \cdot Z_2'}{x_{\mu} \cdot \nu} .$$

Опір ротора з урахуванням того, що x_2' змінюється зі зміною швидкості обертання ротора дорівнює

$$Z_2' = \sqrt{r_2'^2 + (x_2' \cdot v)^2}.$$

З огляду на те, що $\sin \psi_2 = \frac{x_2' \cdot v}{Z_2'}$ і підставляючи значення Z_2' , I_μ , $\sin \psi_2$ в рівняння для струму $I_2'^2$, знаходимо

$$I_2' = \frac{I_1 \cdot x_\mu \cdot v}{\sqrt{r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 \cdot v^2}}.$$

Електромагнітний момент

$$M = \frac{m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{v}}{\omega_0} = \frac{m_1 \cdot I_1^2 \cdot x_\mu^2 \cdot r_2' \cdot v}{\omega_0 \cdot [r_2'^2 + (x_\mu + x_2')^2 \cdot v^2]}.$$

де m_1 - число фаз статора.

З цього виразу видно, що момент при динамічному гальмуванні визначається змінним струмом I_1 , еквівалентним постійному, що протікає по обмотках статора.

Взявши похідну $\frac{dM}{dv}$ і прирівнявши її до нуля, знайдемо, що момент буде максимальний при критичній відносній швидкості $v_k = \frac{r_2'}{x_2' + x_\mu}$, а значення цього моменту, який також називають критичним, так само:

$$M_k = \frac{m_1 \cdot I_1^2 \cdot x_\mu^2}{2\omega_0 \cdot (x_\mu + x_2')}.$$

Звідси видно, що $M_{кр}$ в режимі динамічного гальмування не залежить від активного опору кола ротора.

Сімейство механічних характеристик, що відповідають різним значенням постійного струму і різному опорам роторному колу зображено на рис.13.6.

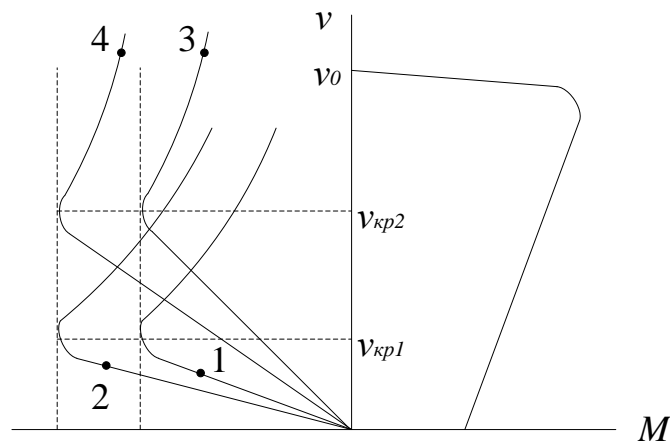


Рис.13.6.

Криві 1 і 2 відповідають однаковому значенню опору кола ротора і різним значенням постійного струму в статорі, а криві 3 і 4 – тим самим значенням постійного струму, але з більшим опором кола ротора.

Розділивши значення M на значення M_{KP} , рівняння механічної характеристики можна представити у вигляді:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{v}{v_K} + \frac{v_K}{v}}$$

Лекція №14. Розрахунок природних і штучних механічних характеристик АД.

14.1. Розрахунок природних механічних характеристик АД.

Для розрахунку характеристик необхідно знати паспортні дані двигуна: $P_n, \omega_n, U_n, I_n, \cos\varphi_n, \eta_n, E_{2n}, \lambda_\mu$.

Найбільш точним співвідношенням для розрахунку природної механічної характеристики АД є уточнена формула Клосса.

$$M = \frac{2M_{KP} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \cdot S_{KP}\right)}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S} + 2 \cdot \frac{r_1}{r_2'} \cdot S_{KP}} = \frac{2M_{KP} \cdot (1 + \alpha \cdot S_{KP})}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S} + 2 \cdot \alpha \cdot S_{KP}}$$

Але цією формулою можна скористатися, якщо відомі r_1 і r_2' .

Якщо ж прийняти, що при відсутності додаткового опору в колі ротора $r_1 \cong r_2'$, що зазвичай має місце, тоді невідомою величиною у формулі Клосса є тільки S_{KP} , яке можна обчислити за формулою:

$$S_{KP} = \frac{S_H \cdot (\lambda_\mu + \sqrt{\lambda_\mu^2 + 2S \cdot (\lambda_\mu - 1) - 1})}{1 - 2S_H \cdot (\lambda_\mu - 1)}$$

Якщо нехтувати значенням r_1 , то для розрахунку механічної характеристики можна використовувати спрощену формулу Клосса.

$$M = \frac{2M_{KP}}{\frac{S}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S}}$$

де $S_{KP} = S_H \cdot (\lambda_\mu + \sqrt{\lambda_\mu^2 - 1})$.

Задаючись різними значеннями S_H і підставляючи в уточнену або спрощену формулу Клосса, можна знайти M і побудувати залежність $M=f(S)$, а значить і $\omega=f(M)$.

Природна механічна характеристика будується для номінальної напруги. При відхиленні U_n від номінального S_{KP} не змінюється, оскільки воно не залежить від U . При відомих r_1 і r_2' , розрахунок проводиться за уточненою формулою Клосса, тільки попередньо потрібно перерахувати M_{KP} , користуючись співвідношенням:

$$M_{KP}^1 = M_{KP} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2,$$

де M_{KP} – критичний момент при $U_1=U_{1H}$.

При врахуванні $r_1=r_2$ або нехтуванні величиною r_1 , розрахунок ведеться так само, тільки так само повинно бути попередньо перераховано значення M_{KP} на відповідну напругу.

Для розрахунку та побудови штучної характеристики АД з фазним ротором, що відповідає введенню в коло ротора додаткового активного опору, необхідно мати природну або якусь штучну характеристику і дані про відповідну їй величиною $r_{дод}$.

При введенні в коло ротора додаткового активного опору, M_{KP} і величина $\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}} = \frac{r_1}{r_2}$ не змінюється.

14.2. Розрахунок штучних механічних характеристик АД.

Напишемо вираз для природної і штучної характеристик, відповідних однаковим моментів M (рис.14.1). Цьому моменту відповідають ковзання S_{np} і $S_{ш}$, а критичного моменту – ковзання $S_{кр.пр}$ та $S_{кр.ш}$.

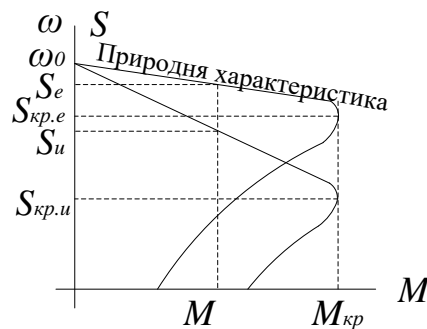


Рис.14.1.

$$\frac{2M_{KP} \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S_{np}}{S_{KP,np}} + \frac{S_{KP,np}}{S_{np}}} = \frac{2M_{KP} \cdot (1 + \varepsilon)}{\frac{S_{ш}}{S_{KP,ш}} + \frac{S_{KP,ш}}{S_{ш}}}.$$

Звідси
$$\frac{S_{np}}{S_{KP,np}} + \frac{S_{KP,np}}{S_{np}} = \frac{S_{ш}}{S_{KP,ш}} + \frac{S_{KP,ш}}{S_{ш}}.$$

Ця рівність може мати місце тільки при умові
$$\frac{S_{np}}{S_{KP,np}} = \frac{S_{ш}}{S_{KP,ш}}.$$

Тоді

$$S_U = S_E \cdot \frac{S_{KP,U}}{S_{KP,E}} = S_E \cdot \frac{r_2 + r_{доб}}{r_2}.$$

Отримані співвідношення справедливі і для випадку рівності критичних і номінальних моментів, тобто $S_{Ку} = S_{Кпр} \cdot \frac{r_2 + r_{ДОД}}{r_2}$; $S_{Ну} = S_{Нпр} \cdot \frac{r_2 + r_{ДОД}}{r_2}$.

Порядок розрахунку штучної характеристики такий: задаючись ковзанням на вихідній (природній чи штучній) характеристиці, знаходиться величина $S_{ш}$ на штучній характеристиці, що відповідає тому ж значенню моменту.

Таким чином, по точкам може бути побудована вся шукана характеристика.

Розрахунок можна вести і за формулами Клосса. У цих випадках потрібно в відповідну формулу Клосса підставляти ковзання, знайдене за вищенаведеним виразом для заданого додаткового опору, а потім вести розрахунок природної характеристики.

Якщо активні опори r_1 і r_2 невідомі, їх можна знайти виходячи з паспортних даних двигуна. Дійсно, так як номінальні втрати в міді роторному колі

$$\Delta P_{2H} = P_{ЭМ} \cdot S_H = 3I_{2H}^2 \cdot r_2, \text{ то}$$

$$r_2 = \frac{P_{ЭМ} \cdot S_H}{3I_{2H}^2} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_{2H} \cdot I_{2H} \cdot S_H}{3I_{2H}^2} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} \cdot S_H.$$

Активний опір фази статора наближено можна визначити за формулами:

$$r_1 \cong \frac{U_{1H} \cdot S_H}{\sqrt{3} I_{1H}}; \quad r_1 \cong \frac{U_{1H}}{k_{СХ} \cdot \sqrt{3} \cdot I_{H1}} \cdot (1 - \eta),$$

де $K_{СХ} = 1$ при з'єднанні обмотки в трикутник і $K_{СХ} = 3$ при з'єднанні в зірку.

Лекція №15. Розрахунок опорів для роторного кола АД.

15.1. Загальні положення.

Умови розрахунку пускових опорів для АД з фазним ротором практично аналогічні умовам розрахунку пускових опорів ДНЗ. Залежно від необхідної точності і наявних даних двигуна розрахунок можна виконати точним або наближеним методом. Розрахунок може бути графічним або аналітичним.

Для розрахунку задаються піковим (пусковим) і перемикаючим моментами. При точному методі пусковий момент M_1 приймається рівним $\sim 0,85M_{кр}$. Величина перемикаючого моменту M_2 зв'язується з числом ступенів пускового реостата, $M_2 \cong (1,2 \div 1,5)M_C$ або $M_2 \cong (1,2 \div 1,5)M_H$.

При наближеному методі розрахунку механічна характеристика двигуна вважається лінійною. Пусковий момент M_1 приймається рівним $\sim 0,7M_{кр}$. Задаються коливаннями моментів M_1 і M_2 і будується пускова діаграма, де спочатку проводиться початкова пускова характеристика, а потім інші характеристики до виходу на природну в точці «б» (рис.15.1).

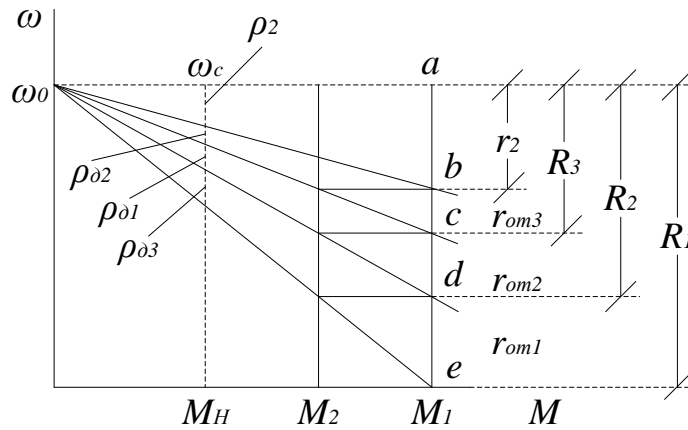


Рис.15.1.

Потім визначають номінальний опір ротора

$$r_{2H} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}},$$

тобто опір однієї фази роторному колі при нерухомому роторі, що обмежує струм в ньому до номінального значення I_{2H} .

Так як ковзання АД при певному струмі і моменті пропорційне опору роторного кола, що видно з виразу

$$S = \frac{m_2 \cdot I_2' \cdot r_2'}{m \cdot \omega_0},$$

то, маючи на увазі, що при нерухомому роторі $S = 1$, а при номінальному режимі $S = S_H$, можна написати співвідношення:

$$\frac{r_2}{r_{2H}} = \frac{S_H}{1},$$

звідки $r_2 = r_{2H} S_H$ або у відносних одиницях $\rho_2 = S_H$ (розділивши дві частини на R_{2H}).

Отриманий вираз показує, що опір на будь-якій характеристиці можна знайти множенням ковзання на цій характеристиці на опір R_{2H} . Відраховуючи при M_H ковзання між суміжними характеристиками, отримаємо частки опору $\rho_{\delta 1}$ і $\rho_{\delta 2}$ і т.д., за якими множенням на R_{2H} знаходяться абсолютні величини опору ступенів. Відраховуючи ж повні ковзання при M_H для штучних характеристик, знаходяться відповідні повні опори $R_1, R_2 \dots$, тобто

$$\begin{aligned} r_{om1} &= \rho_{\delta 1} \cdot r_{2H} \cdot & R_1 &= r_2 + r_{om1} + r_{om2} + r_{om3} \cdot \\ r_{om2} &= \rho_{\delta 2} \cdot r_{2H} \cdot & R_2 &= r_2 + r_{om2} + r_{om3} \cdot \\ r_{om3} &= \rho_{\delta 3} \cdot r_{2H} \cdot & R_3 &= r_2 + r_{om3} \cdot \end{aligned}$$

При обліку криволінійності механічних характеристик розраховується і будується природна механічна характеристика. Задаються моментами M_1 і M_2 , причому M_1 приймається рівним $\sim 0,85 M_{кр}$. Через точки перетину

вертикалей, відповідних моментам M_1 і M_2 з природною характеристикою проводиться промінь до перетину з горизонтальною лінією, що відповідає $\omega = \omega_0$ в точці 0 (рис.15.2).

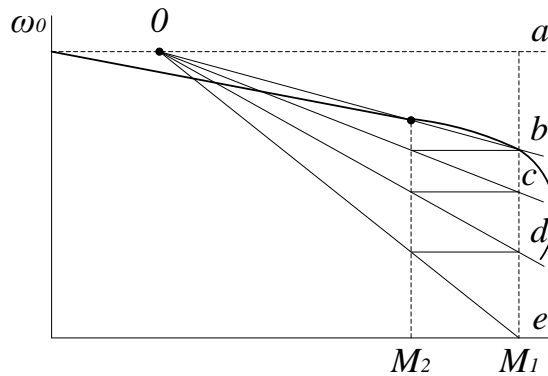


Рис.15.2.

Далі будуються промені з дотриманням рівності пікових і перемикаючих моментів на всіх ступенях. Число променів на 1 більше, ніж число ступенів реостата. Опір кола ротора знаходиться по співвідношенням

$$R_1 = r_2 \cdot \frac{ae}{ab} ; \quad R_2 = r_2 \cdot \frac{ad}{ab} ; \quad R_3 = \frac{ac}{ab} .$$

15.2. Аналітичний розрахунок опорів.

Розглянемо аналітичний метод припустивши лінійність механічної характеристики. Заданими можуть бути піки моментів M_1 і M_2 або число ступенів « m ». Якщо потрібно визначити « m », то задаються значеннями M_1 і M_2 і визначається число ступенів (в відносних одиницях)

$$m = \frac{\lg \frac{1}{\mu_1 \cdot S_H}}{\lg \frac{\mu_1}{\mu_2}} = \frac{\lg \frac{1}{\mu_1 \cdot S_H}}{\lg \lambda} .$$

Якщо « m » виходить не цілим, потрібно змінити μ_1 або μ_2 . Після цього визначається $\lambda = \frac{\mu_1}{\mu_2}$, а потім опори. Стосовно пускової діаграми (рис.15.2),

то

$$R_3 = \lambda \cdot r_2 .$$

$$R_2 = \lambda^2 \cdot r_2 .$$

$$R_1 = \lambda^3 \cdot r_2 .$$

Відключаючі опори ступенів визначаються шляхом послідовного обчислення опорів на суміжних ступенях

$$r_{om1} = R_1 - R_2 = \lambda^3 \cdot r_2 - \lambda^2 \cdot r_2 = r_2 \cdot \lambda^2 (\lambda - 1) .$$

$$r_{om2} = R_2 - R_3 = \lambda^2 \cdot r_2 - \lambda \cdot r_2 = r_2 \cdot \lambda \cdot (\lambda - 1) .$$

$$r_{омз} = R_1 - r_2 = \lambda \cdot r_2 - r_2 = r_2 \cdot (\lambda - 1).$$

Наведена вище формула для АД відрізняється від аналогічної формули для ДНЗ тим, що в ній замість відносного опору якоря $r_я$ стоїть ковзання S_H . Це впливає з того положення, що при номінальному M_H ковзання рівні частинам внутрішнього опору ротора.

Якщо число ступенів « m » задано і режим пуску нормальний, задаються перемикаючим моментом μ_2 , що на $(10 \div 20)\%$ перевищує μ_c і знаходиться λ

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{1}{\mu_2 \cdot S_H}}.$$

Потім робиться перевірка. Величина $\mu_1 = \lambda \mu_2$ повинна бути менше $\mu_{доп}$.

Якщо число ступенів задане і пуск передбачається форсованим, задаються піковим моментом μ_1 , і визначається $\lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{\mu_2 \cdot S_H}}$. Потім

робиться перевірка: величина $\mu_2 = \frac{\mu_1}{\lambda}$ повинна бути більшою за момент опору M_c .

Лекція №16. Електромеханічні властивості синхронного двигуна.

16.1. Загальні положення.

Хоча основною сферою застосування синхронних двигунів є нерегульований електропривод, проте при частотному керуванні вони використовуються і в регульованих електроприводах. Принципова схема СД зображена на рис.16.1.

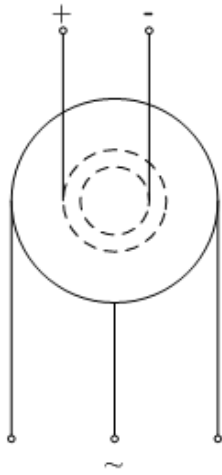


Рис.16.1.

Як правило, СД виконуються з явновираженими полюсами.

При роботі СД в двигунному режимі його ротор відстає від обертового магнітного поля на кут $\theta_{ел} = \phi_{0ел} - \phi_{ел} = \omega_{0ел} \cdot t - \omega_{ел} \cdot t$. При номінальному навантаженні цей кут дорівнює $\theta_{эл} = 20 - 30$ електричних градусів.

Рівняння кутової характеристики СД, як відомо з курсу електричних машин, має вигляд:

$$M = \frac{3U_1 \cdot E}{\omega_0 \cdot x_{1d}} \cdot \sin \theta_{эл} + \frac{3U_1^2}{2\omega_0} \cdot \left(\frac{1}{x_{1q}} - \frac{1}{x_{1d}} \right) \cdot \sin 2\theta_{эл} = M' + M'',$$

де ω_0 – кутова швидкість магнітного поля, x_{1q} і x_{1d} – індуктивні опору по поперечній і поздовжній осі машини. Кутова характеристика зображена на рис.16.2.

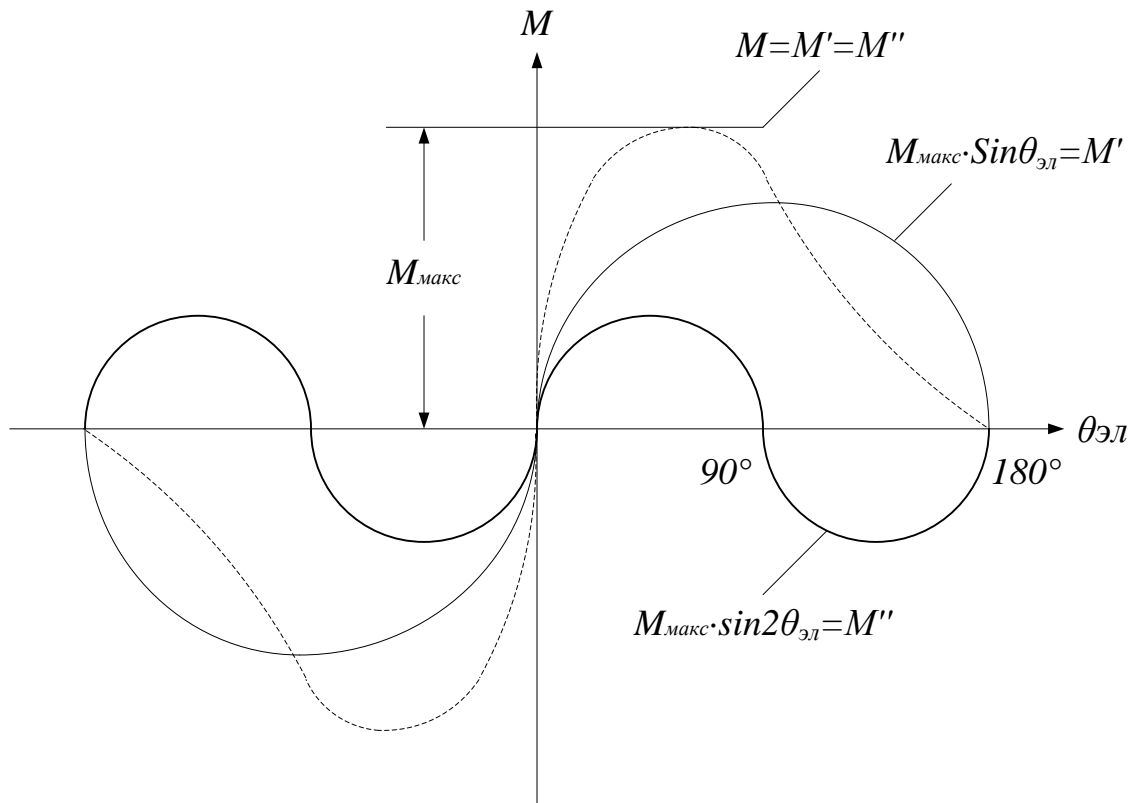


Рис.16.2.

Максимальний момент, що визначає перевантажувальну здатність двигуна, становить $(2 \div 3) M_H$, тобто СД менш чутливий до зниження напруги зовнішньої мережі, ніж АД, так як основний момент M' , зумовлений взаємодією обертаючого поля статора з полем ротора пропорційний U_1 , а реактивний момент M'' , хоча і пропорційний U_{12} , але майже не впливає на перевантажувальну здатність двигуна (2-га складова в рівнянні кутової характеристики).

Робочу ділянку кутової характеристики з достатньою для інженерних задач точністю можна замінити лінійною залежністю

$$M \cong M_H \cdot \frac{\theta_{эл}}{\theta_{эл.H}} = C_{эм} \cdot \theta,$$

де $C_{эм}$ - коефіцієнт жорсткості пружного електромагнітного зв'язку між полем статора і ротора.

Диференціюючи цей вираз, можна отримати наближене рівняння динамічної механічної характеристики СД.

$$\frac{dM}{dt} = C_{эм} \cdot \frac{d\theta}{dt} = C_{эм} \cdot (\omega_0 - \omega),$$

Так як $\theta = \frac{\omega_0 - \omega}{d/dt}$.

У раніше розглянутій двомасовій пружній механічній системі, було встановлено, що момент пружного взаємодії $M_{12} = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$.

Диференціювання цієї залежності дає рівняння, що збігається за формою з рівнянням $\frac{dM}{dt} = C_{\text{ЭМ}} \cdot (\omega_0 - \omega)$.

$$\text{Дійсно, } \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2).$$

Це підтверджує аналогію між електромагнітними взаємодіями в СД і механічній пружині. Тому механічну модель, що відображає особливості синхронного двигуна, можна представити у вигляді, зображеному на рис.16.3.

Тут електромагнітний зв'язок між полями статора і ротора СД замінений пружиною з жорсткістю C_{EM} , а наведений момент інерції ротора і механізму $J_{\text{пр}}$, представлений підвішеною на цій пружині масою «m». Очевидно, механічний аналог СД являє собою ідеальний коливальний контур, в якому виникаючі з тих чи інших причин коливання не загасають.

Дійсно, підвищена схильність до коливань при зміні навантаження, є характерною особливістю СД. Для цього їх проектують з демпферною обмоткою, що виконується у вигляді білячої клітки на полюсах ротора. При виникненні коливань ротора, тобто ковзання, вона створює асинхронний момент, який, в першому наближенні можна вважати пропорційним ковзанню. З урахуванням цього моменту результуючий момент СД в динамічному режимі можна представити у вигляді суми синхронного і асинхронного моментів.

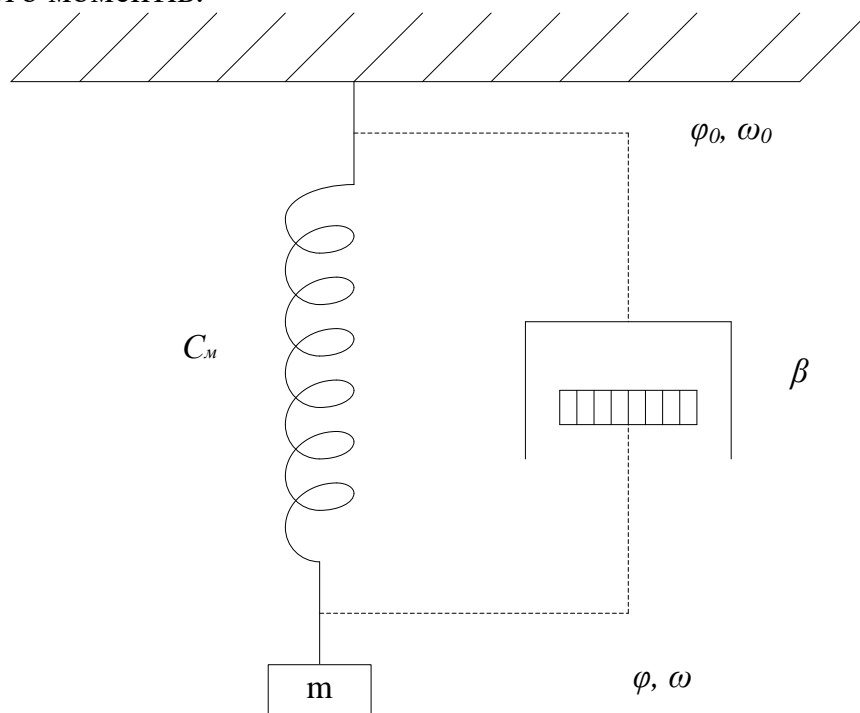


Рис.16.3.

$$M = M_{син} + M_{ас} = M_n \cdot \frac{\theta_{ЕЛ}}{\theta_{ЕЛ.Н}} + \frac{2 \cdot M_{кр}}{S_{кр}} \cdot S =$$

$$= C_{ем} \cdot \theta + \frac{2 \cdot M_{кр}}{S_{кр}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = C_{ем} \cdot \theta + \beta(\omega_0 - \omega).$$

16.2. Структурна схема СД.

Так як $\theta = \frac{\omega_0 - \omega}{\frac{d}{dt}} = \frac{\omega_0 - \omega}{p}$, де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор, рівняння

механічної характеристики СД в операторній формі можна записати у вигляді

$$M = \left(\frac{C_{ем}}{p} + \beta \right) \cdot (\omega_0 - \omega).$$

Структурна схема, що відповідає цьому рівнянню, наведена на рис.16.4. У наведених виразах β - це модуль жорсткості лінійної частини механічної характеристики для асинхронної складової моменту, зумовленою дією демпфер-ної обмотки.

З структурної схеми слідує, що асинхронний момент, створюваний демпфер-ною обмоткою, впливає, аналогічно в'язкому тертю. Тому схема механічного аналога СД з урахуванням наявності демпферної обмотки (рис.16.3) повинна бути доповнена механічним демпфером з в'язким тертям.

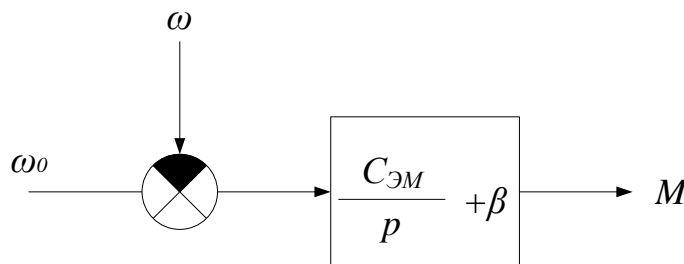


Рис.16.4.

Структурна схема, що відповідає цьому рівнянню, наведена на рис.16.4. У наведених виразах β - це модуль жорсткості лінійної частини механічної характеристики для асинхронної складової моменту, зумовленою дією демпфер-ної обмотки.

З структурної схеми слідує, що асинхронний момент, створюваний демпфер-ною обмоткою, впливає, аналогічно в'язкому тертю. Тому схема механічного аналога СД з урахуванням наявності демпферної обмотки (рис.16.3) повинна бути доповнена механічним демпфером з в'язким тертям.

При $p = 0$ отримаємо рівняння статичної механічної характеристики СД з $\omega = \omega_0 = \text{const}$ при будь-яких значеннях M . Дійсно, з виразу

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\frac{C_{эм} + \beta}{p}}$$

впливає, що при $p = 0$ і $\omega = \omega_0$ статична механічна характеристика має вигляд прямої (рис.16.5), що паралельна осі моментів в межах перевантажувальної здатності двигуна, тому що при навантаженні, що перевищує $M_{\text{макс}} = \lambda_H \cdot M_H$ двигун випадає із синхронізму.

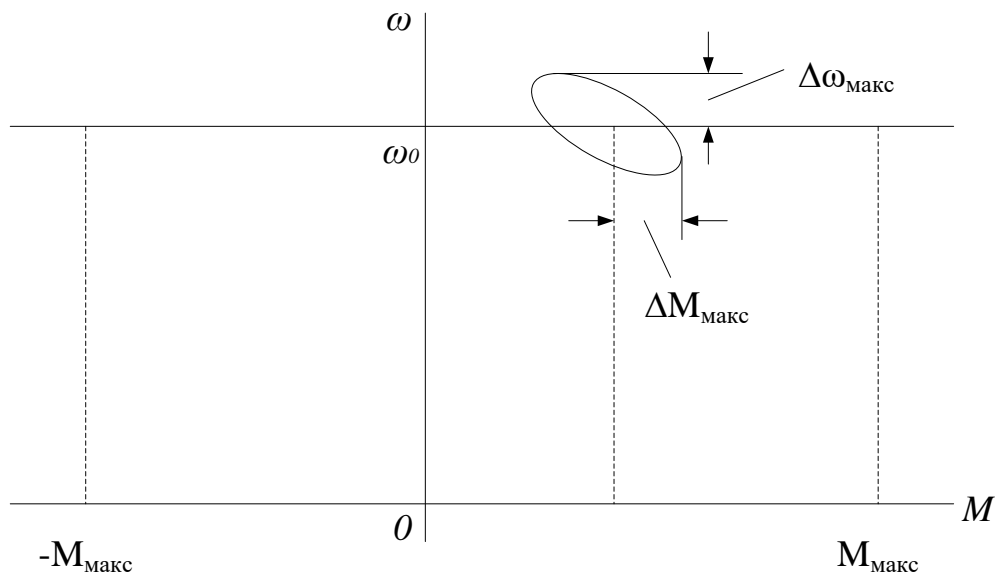


Рис.16.5.

У динамічних режимах, механічна характеристика СД не є абсолютно жорсткою. В усталеному динамічному режимі вимушених коливань змін моменту з амплітудою $\Delta M_{\text{макс}}$ і відповідних змін кута $\theta_{\text{сл}}$ відповідають певні амплітуди $\Delta \omega_{\text{макс}}$ коливань швидкості і динамічна характеристика має вигляд еліпса. Її динамічна жорсткість визначається співвідношенням:

$$\beta_{\text{дин}} = -\left(\frac{C_{эм}}{p} + \beta\right).$$

Лекція №17. Перехідні режими електроприводів.

17.1. Загальна характеристика перехідних режимів електроприводів, їх класифікація і поняття про оптимальних перехідних процесах.

Перехідним процесом або перехідним режимом електроприводу називається режим його роботи при переході від одного усталеного стану до іншого, коли змінюється швидкість, струм, момент, прискорення. Причинами виникнення перехідних режимів є або зміна навантаження, вплив на електропривод при управлінні ним, тобто пуск, гальмування, реверс і т. д.

Вони можуть виникнути в результаті аварії або інших випадкових причин, наприклад, при зміні величини напруги або частоти мережі, несиметрії напруги по фазах, зміну порядку проходження фаз, повному зникненні напруги, обриві проводів і т. д. У деяких механізмів, таких як кривошипно-шатунні преси, ножиці, підйомні столи деяких прокатних станів, усталених режимів взагалі немає, а їх робочі режими являють собою періодичні перехідні процеси.

Перехідні режими відіграють величезну роль у роботі електропривода і механізму, і часто їх характер зумовлює продуктивність механізму і якість продукції. Тому їх вивчення має велике практичне значення. Аналіз цих режимів дає можливість правильно розрахувати потужність електродвигуна і вибрати його, зменшити втрати енергії при пуску і гальмуванні, дозволяє виявити гранично допустиму з точки зору нагріву кількість включень в годину двигуна електроприводу, що працює більшу частину часу в перехідних режимах.

Лише обмежене число механізмів допускає можливість їх проектування електроприводу без урахування характеру протікання перехідних процесів. До них відносяться деякі рідко пускаючі і довготривалопрацюючі механізми з найпростішими пусковими пристроями, наприклад, вентилятори, насоси, а також механізми, у яких виробничий процес не складний, що до їх електроприводу взагалі не пред'являється будь-які особливі вимоги, крім забезпечення заданої потужності (бетонозмішувачі, каменедробарки тощо).

На протікання перехідних процесів значний вплив робить механічна, електромагнітна і теплова інерція. Механічна інерція, що характеризується електромеханічної сталої T_m , залежить як від інерційних мас і характеру навантаження M_c , так і від електромеханічних властивостей двигуна. Електромагнітна інерція характеризується електромагнітною постійною T_e , що залежить від L і R електричного кола. Теплова інерція характеризується постійною часу нагріву T_n , залежить від теплоємності машини і її тепловіддачі. Оскільки теплові процеси протікають значно повільніше електромагнітних та механічних, їх при аналізі перехідних процесів електропривода не беруть до уваги.

Якщо механічна інерція практично завжди відчутна і позначається на перехідних процесах, то електромагнітна інерція може бути і суттєвою і практично не впливати на характер протікання процесу. У зв'язку з цим, коли не потрібно дуже великої точності, враховується тільки механічна інерція. Перехідні процеси в цьому випадку називаються механічними.

Якщо враховується тільки електромагнітна інерція (наприклад, в колах збудження), перехідні процеси називаються електромагнітними, а якщо враховується механічна і електромагнітна інерція – електромеханічними.

Перехід з одного сталого стану в інший може відбуватися по різних траєкторіях. При керуванні електроприводом прагнуть вибирати такі, які забезпечують максимальну швидкодію, мінімум втрат енергії і динамічних

навантажень, максимум корисної роботи і оптимальні значення інших показників.

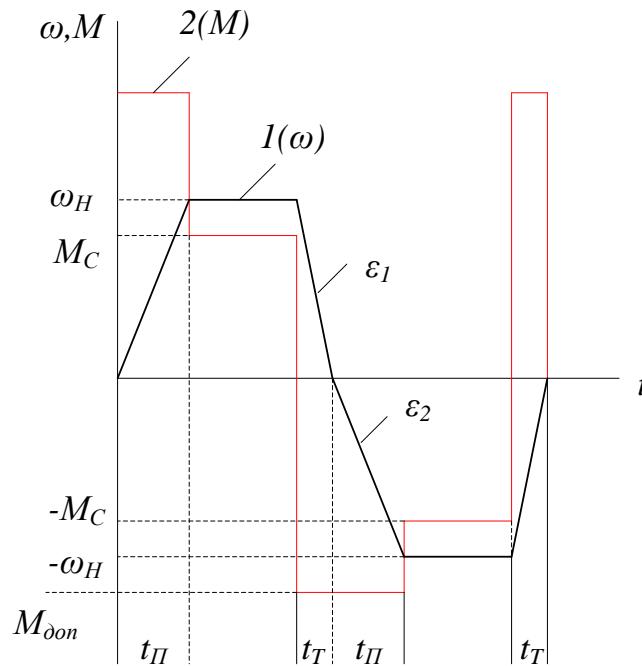


Рис.17.1.

Найбільш часто потрібно забезпечити зміну швидкості електроприводу за мінімальний час при обмеженні моменту двигуна. Такі перехідні процеси називаються оптимальними за швидкодією при обмеженні моменту. Цій умові при $M_c = \text{const}$ відповідає рівномірно прискорений характер зміни швидкості при $M = M_{\text{доп}} = \text{const}$ (див. криві 1 і 2 на рис.17.1).

Якщо $M_c = f(\omega)$, то швидкість при реверсі в процесі гальмування і пуску повинна змінюватися з різними прискореннями в разі реактивного M_c , як показано на рис.17.1.

Для деяких механізмів, наприклад, пасажирських ліфтів, перехідні процеси повинні протікати при строго обмеженому прискоренні. Умовою мінімальної тривалості перехідного процесу є підтримання сталості прискорення при різних навантаженнях. Такі перехідні процеси називаються оптимальними за швидкодією при обмеженні прискорення ε .

У цьому випадку залежність $\omega = f(t)$ повинна залишатися незмінною при різних M_c , а момент двигуна $M = M_c + J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_c + J_{\Sigma} \cdot \varepsilon$ при цих різних M_c буде змінюватися.

Однак, в ряді випадків момент двигуна не реагує на зміну навантаження. В цьому випадку для обмеження ε при будь-яких M_c допустимий пусковий момент двигуна необхідно вибрати з умови:

$$M_{\text{доп}} = J_{\Sigma_{\text{мин}}} \cdot \varepsilon_{\text{доп}} + M_{c_{\text{мин}}}.$$

Якщо $M_{\text{пуск}}$ вибраний відповідно до даного виразу і при різних навантаженнях залишається незмінним, то прискорення електроприводу при зростанні навантаження буде зменшуватися і при $M_c = M_{c_{\text{макс}}}$ прийме значення

$$\varepsilon_{\min} = \frac{M_{\text{доп}} - M_{\text{с.макс}}}{J_{\Sigma \text{макс}}}$$

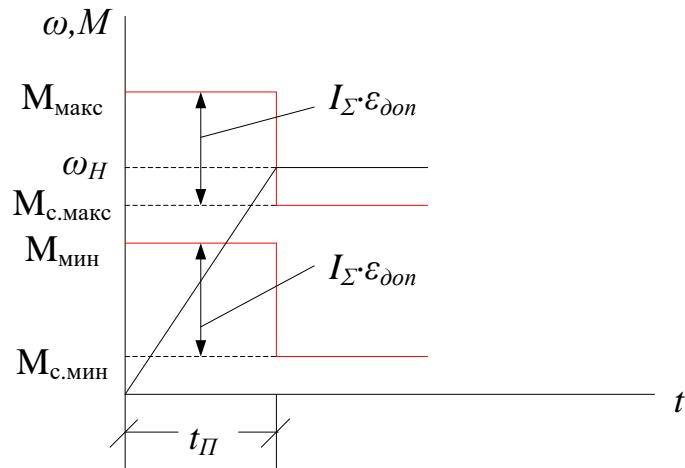


Рис.17.2.

Очевидно $\varepsilon_{\min} < \varepsilon_{\text{доп}}$ і час пуску в міру зростання навантаження збільшиться.

Для багатьох механізмів поряд з необхідністю обмеження M і ε потрібно забезпечити плавність перебігу перехідних процесів шляхом обмеження похідної $\frac{dM}{dt}$ або так званого ривка $\rho = \frac{d\varepsilon}{dt}$. Такі перехідні процеси називаються оптимальними при обмеженні моменту або прискорення і ривка.

Необхідність таких обмежень викликається різними причинами. Так, для двигунів постійного струму за умовами комутації необхідно обмежувати $\frac{di_{\text{я}}}{dt}$, отже, і $\frac{dM}{dt}$. Для пасажирських ліфтів обмеження ривка створює більш комфортні умови для людей, які перебувають в ліфті. Слід, тільки, мати на увазі, що обмеження похідної $\frac{dM}{dt}$ під час пуску електроприводу тягне за собою зниження швидкодії. Наприклад, при зменшенні $\frac{dM}{dt}$ зростає час пуску електроприводу.

17.2. Рівняння електромеханічного перехідного процесу електроприводу з лінійною механічною характеристикою при $M_c = \text{const}$ і $\omega_0 = \text{const}$.

У більшості застосовуваних у промисловості електроприводів, які отримують живлення від мережі, електромеханічні перехідні процеси протікають при незмінній напрузі U або частоті f_1 , тобто при $\omega_0 = \text{const}$. При цих умовах вони виникають у разі зміни керуючого впливу ω_0 або f_1 стрибком (пуск, гальмування, реверс) чи зміні навантаження. Для обмеження

кидків струму і моменту при пуску, гальмуванні до допустимих значень в коло якоря або ротора двигуна вводиться додатковий опір.

При цьому електромагнітна постійна $T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$ силового кола значно знижується, а електромеханічна постійна, навпаки, збільшується (зменшується жорсткість β). Тому при роботі двигуна на пускових характеристиках впливом електромагнітної інерції на перебіг перехідних процесів можна знехтувати, вважаючи $T_{\Sigma} \cong 0$. Необхідність обліку T_{Σ} зазвичай виникає при виході двигуна на природну характеристику, коли додаткові опору повністю виведені і вплив електромагнітної інерції може бути істотним.

Отримаємо рівняння перехідного процесу для загального випадку при $T_{\Sigma} \neq 0$ і ненульових початкових умовах. Електромеханічні перехідні процеси при жорстких механічних зв'язках, тобто $C_{12} = \infty$, описуються рівняннями:

$$M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega) - T_{\Sigma} \cdot \frac{dM}{dt}; \quad M - M_c = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Знайшовши M з другого рівняння і підставивши в перше, одержимо рівняння, розв'язане відносно швидкості ω .

$$T_{\Sigma} \cdot T_M \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta} = \omega_c.$$

Аналогічно можна отримати рівняння, розв'язане відносно моменту M .

$$T_{\Sigma} T_M \cdot \frac{d^2M}{dt^2} + T_M \cdot \frac{dM}{dt} + M = M_c.$$

Тут $T_M = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}$.

Корені характеристичного рівняння цих диференціальних рівнянь однакові і при $m = \frac{T_M}{T_{\Sigma}} < 4$ однакові:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot T_{\Sigma}} \pm \sqrt{\frac{1}{T_{\Sigma} \cdot T_M} - \frac{1}{4 \cdot T_{\Sigma}^2}} = -\alpha \pm j \cdot \Omega_p.$$

Загальний розв'язок цих рівнянь при $m < 4$ має вигляд

$$1) \quad \omega = \omega_c + (A \cdot \cos \Omega_p \cdot t + B \cdot \sin \Omega_p \cdot t) \cdot e^{-\alpha t}$$

$$2) \quad M = M_c + (C \cdot \cos \Omega_p \cdot t + D \cdot \sin \Omega_p \cdot t) \cdot e^{-\alpha t}$$

Постійні інтегрування A, B, C, D знаходяться з початкових умов.

При $t=0$ $\omega = \omega_{\text{поч}}$; $M = M_{\text{поч}}$: $\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\text{нач}} - M_c}{J_{\Sigma}}$.

Підставимо ці величини в рівняння 1 і 2

$\Omega_{\text{поч}} = \omega_c + A$; $M_{\text{поч}} = M_c + C$. Звідси $A = \omega_{\text{нач}} - \omega_c$; $C = M_{\text{поч}} - M_c$.

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 - \alpha \cdot A + \Omega_p \cdot B = \frac{M_{\min} - M_c}{J_{\Sigma}}.$$

$$B = \frac{(M_{\text{нач}} - M_c) + \alpha \cdot J_{\Sigma} \cdot (\omega_{\text{нач}} - \omega_c)}{J_{\Sigma} \cdot \Omega_p}.$$

$$\frac{dM}{dt} = 0 - \alpha \cdot C + \Omega_p \cdot D = \frac{\beta \cdot (\omega_0 - \omega) - M_{\max}}{T_{\vartheta}} = \frac{\beta \cdot \Delta\omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}}{T_{\vartheta}}.$$

Звідси

$$D = \frac{(\beta \cdot \Delta\omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}) + \alpha \cdot T_{\vartheta} \cdot (M_{\text{нач}} - M_c)}{\Omega_p \cdot T_{\vartheta}}.$$

Таким чином закони зміни ω і M будуть такими:

$$\omega = \omega_c + [(\omega_{\text{нач}} - \omega_c) \cdot \cos \Omega_p \cdot t + \frac{(M_{\text{нач}} - M_c) + J_{\Sigma} \cdot \alpha \cdot (\omega_{\text{нач}} - \omega_c)}{J_{\Sigma} \cdot \Omega_p} \cdot \sin \Omega_p \cdot t] \cdot e^{-\alpha t}$$

$$M = M_c + [(M_{\text{нач}} - M_c) \cdot \cos \Omega_p \cdot t + \frac{(\beta \cdot \Delta\omega_{\text{нач}} - M_{\text{нач}}) + \alpha \cdot T_{\vartheta} (\omega_{\text{нач}} - \omega_c)}{T_{\vartheta} \cdot \Omega_p} \cdot \sin \Omega_p \cdot t] \cdot e^{-\alpha t}$$

При $m = \frac{T_M}{T_{\vartheta}} > 4$ корені характеристичного рівняння $p_1 = -\alpha_1$, $p_2 = -\alpha_2$ і

загальний розв'язок рівнянь 1 і 2 буде таким:

$$\omega = \omega_c + A_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} + B_1 \cdot e^{-\alpha_2 t}.$$

$$M = M_c + C_1 \cdot e^{-\alpha_1 t} + D_1 \cdot e^{-\alpha_2 t}.$$

Коефіцієнти A_1, B_1, C_1, D_1 знаходяться аналогічно A, B, C, D .

Закони зміни ω і M будуть мати такий вигляд:

$$3) \quad \omega = \omega_c \cdot (1 - e^{-\alpha_1 t}) + \omega_{\text{нач}} \cdot e^{-\alpha_1 t} + \frac{(M_c - M_{\text{нач}}) - \alpha_1 \cdot J_{\Sigma} \cdot (\omega_{\text{нач}} - \omega_c)}{J_{\Sigma} \cdot \alpha_2} \cdot e^{-\alpha_2 t}.$$

$$4) \quad M = M_c \cdot (1 - e^{-\alpha_1 t}) + M_{\text{нач}} \cdot e^{-\alpha_1 t} + \frac{(M_{\text{нач}} - \beta \cdot \Delta\omega_{\text{нач}}) - \alpha_1 \cdot T_{\vartheta} \cdot (M_{\text{нач}} - M_c)}{T_{\vartheta} \cdot \alpha_2} \cdot e^{-\alpha_2 t}$$

При $m = \frac{T_M}{T_{\vartheta}} = 4$, що буває рідко, $p_1 = p_2 = \alpha$ і загальний розв'язок

диференціальних рівнянь 1 і 2 має вигляд:

$$\omega = \omega_c + (A_2 + B_2 \cdot t) \cdot e^{-\alpha t}.$$

$$M = M_c + (C_2 + D_2 \cdot t) \cdot e^{-\alpha t}.$$

Коефіцієнти A_2, B_2, C_2, D_2 знаходяться з початкових умов.

Отримані загальні залежності $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$ в окремих випадках істотно спрощуються, якщо до початку перехідного процесу режим роботи електро-приводу був сталим. У всіх випадках, коли двигун працює на

реостатних характеристиках, величина T_e дуже мала і її можна вважати нульовою. Якщо електромеханічний зв'язок в системі електроприводу є жорстким, рівняння перехідного процесу можна одержати з співвідношень 3 і 4, прийнявши $\alpha_1 = -\frac{1}{T_M}$; $\alpha_2 = \infty$. Вони мають вигляд

$$\omega = \omega_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$M = M_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

Лекція №18. Перехідний процес електроприводу з лінійною механічною характеристикою при одно- і багатоступінчастому пуску при $M_c = const$; $\omega_0 = const$.

18.1. Загальні положення.

При пуску в одну ступінь перехідний процес описується рівняннями

$$\omega = \omega_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad M = M_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

якщо збільшення швидкості відбувається не від $\omega = 0$, а від якогось початкового усталеного значення, як показано на рис.18.1, а.

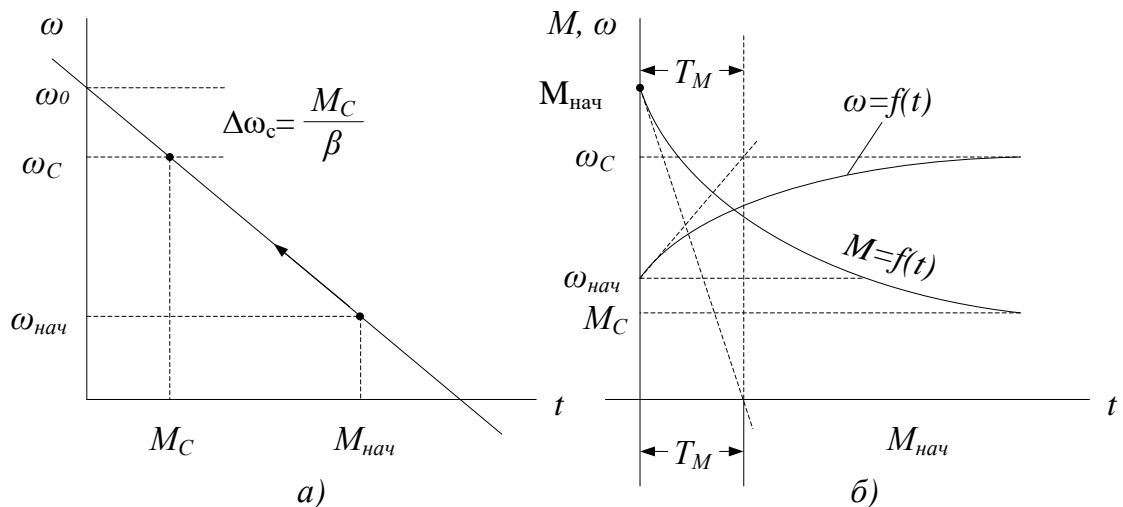


Рис.18.1.

Закон зміни прискорення

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon = \varepsilon_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

де $\varepsilon_{поч}$ - початкове прискорення

$$\varepsilon_{нач} = \frac{\omega_c - \omega_{нач}}{T_M}.$$

Зменшення ε в міру збільшення швидкості пояснюється безперервним зменшенням динамічного моменту $M_{дин}$. Криві $\omega(t)$ і $M(t)$ зображені на рис.18.1, б.

Якщо розгін йде з нерухомого стану, тобто коли $\omega_{поч} = 0$, то

$$\omega = \omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right).$$

$$M = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}.$$

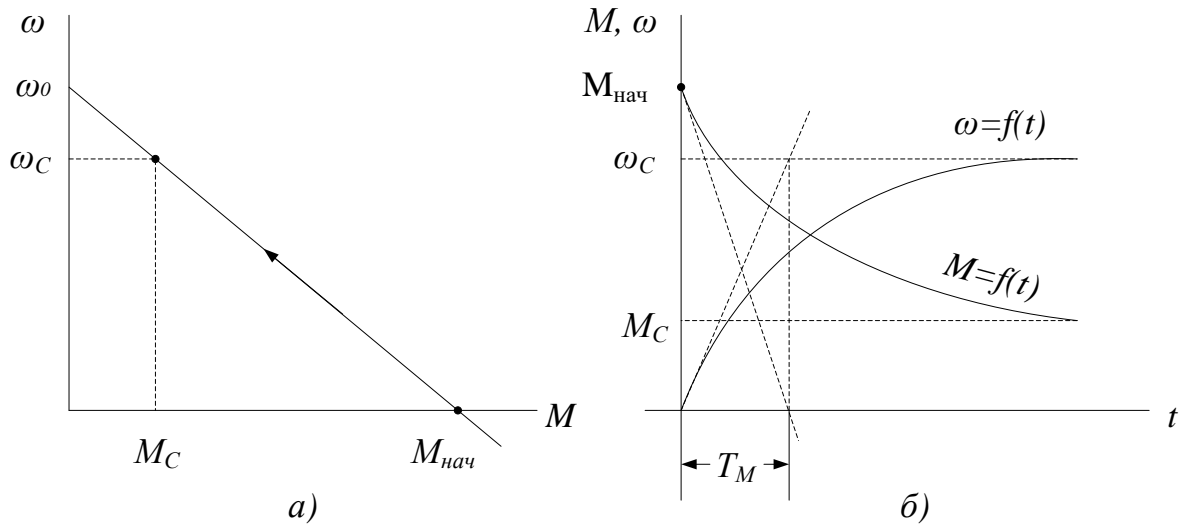


Рис.18.2.

Час розгону на будь-якій ділянці до будь-якої проміжної швидкості $\omega_{кін}$

$$t = T_m \cdot \ln \frac{\omega_{нач} - \omega_c}{\omega_{кон} - \omega_c} = T_m \cdot \ln \frac{M_{нач} - M_c}{M_{кон} - M_c}.$$

$$\omega_{c1} = \omega_0 - \frac{R_{я} + R_1}{(k\phi)^2} \cdot M_c.$$

$$\omega_{H1} = \omega_0 - \frac{R_{я} + R_1}{(k\phi)^2} \cdot M_H.$$

Задаючись часом t від 0 до знайденого за формулою, можна побудувати криві $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$. Вони зображені на рис.18.1, б.

Так як $\omega_{кон} = \omega_c$, то $t = \infty$. Тому практично процес вважається завершеним, коли різниця між усталеним і поточними значеннями швидкості знижується до 2%, тобто $\omega_{кон} = \omega_c - 0,02 \cdot (\omega_c - \omega_{нач})$ або $M_{кон} = M_c - 0,02 \cdot (M_c - M_{нач})$.

При $\omega_{поч} = 0$, $\omega_{кон} = \omega_c - 0,02\omega_c = 0,98\omega_c$. Тому

$$t = T_m \cdot \ln \frac{0 - \omega_c}{0,98 \cdot \omega_c - \omega_c} = T_m \cdot \ln \frac{-\omega_c}{-0,02\omega_c} = T_m \cdot \ln 50 \equiv 4 \cdot T_m$$

Зазвичай при розрахунку приймається $t=(3 \div 11)T_m$.

Що стосується T_m , її можна визначити, провівши дотичну в будь-якій точці кривої $\omega=f(t)$ або $M=f(t)$, як показано на рис.18.1,б і рис.18.2,б, або використовуючи такі вирази:

$$T_m = \frac{I_\Sigma}{\beta}; T_i = I_\Sigma \cdot \frac{R_{\beta \Sigma}}{(k\phi)^2}; T_m = I_\Sigma \cdot \frac{\omega_0}{M_H} \cdot S_H; T_m = I_\Sigma \cdot \frac{\omega_0 - \omega_H}{M_H}.$$

18.2. Розрахунок пускових діаграм.

Для розрахунку перехідного процесу при багатоступеневому пуску спочатку будується пускова діаграма за раніше викладеними правилами задавшись пусковим і перемикаючим моментами. Вона зображена на рис.18,3,а.

Для будь-якої ступені розгону час, протягом якого момент змінюється від M_1 до M_2 може бути визначено за формулою

$$t_x = T_{MX} \cdot \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c}.$$

Постійна часу для будь-якої ступені розгону

$$T_{MX} = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_0 - \omega_{HX}}{M_H}.$$

Закони зміни ω і M при розгоні на будь-якому ступені визначаються згідно з раніше наведеними виразами.

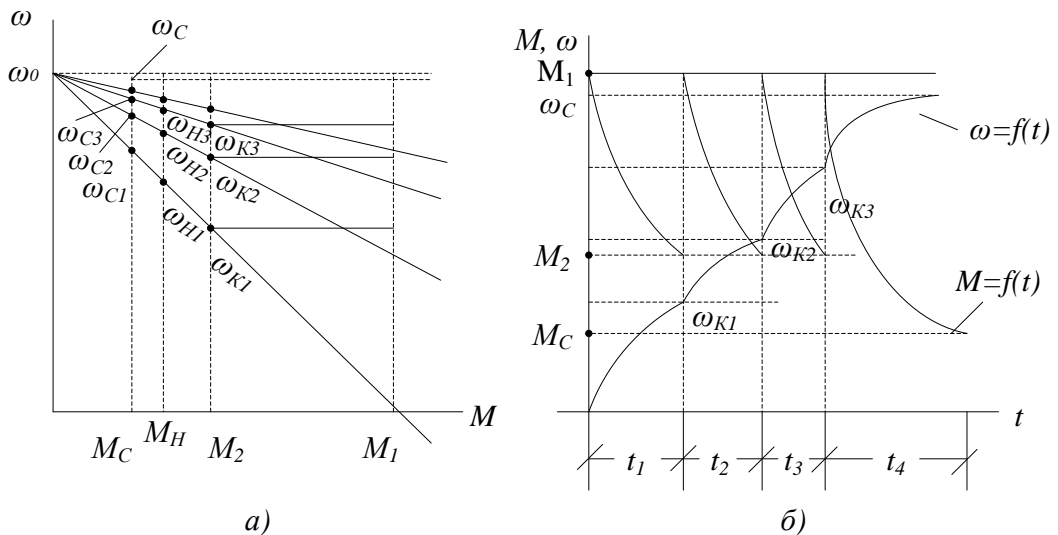


Рис.18.3.

Для прикладу розрахуємо перехідний процес на першій і другій ступені.

Закон зміни швидкості на цій ступені: $\omega = \omega_{c1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M1}}}\right) + 0$.

Закон зміни моменту на цій ступені: $M = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M1}}}\right) + M_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$.

Значення ω_{H1} і ω_{c1} перебувають з графіка рис.18.3 або теоретично:

$$\omega_{c1} = \omega_0 - \frac{R_1}{(k\phi)^2} \cdot M_c; \quad \omega_{H1} = \omega_0 - \frac{R_1}{(k\phi)^2} \cdot M_H.$$

Тут R_1 – повний опір якірного або роторного кола ДНЗ або АД.

Задаючись часом t від 0 до t_1 , можна розрахувати за наведеними формулами і побудувати криві $\omega=f(t)$ та $M=f(t)$.

Постійна часу для другої ступені: $T_{M2} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0 - \omega_{H2}}{M_H}$.

Час розгону на другій ступені: $t_2 = T_{M2} \cdot \ln \frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c}$.

Закон зміни швидкості і моменту на цій щаблі

$$\omega = \omega_{c2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) + \omega_{кон1} \cdot e^{-\frac{t}{T_{M2}}}; \quad M = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M2}}}\right) + M_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{M2}}}.$$

Значення ω_{H2} і ω_{c2} знаходяться з пускової діаграми аналогічно як і на першій ступені і т. д.

Час розгону при виході на природній характеристиці до швидкості ω_c приймається рівним $t_H = (3 \div 11) T_M$, де T_M замість ω_{Hx} підставляється ω_H .

Лекція №19. Перехідні процеси електроприводу з лінійною механічною характеристикою при $M_c = \text{const}$; $\omega_0 = \text{const}$ в гальмівних режимах.

19.1. Загальні положення.

Розглянемо спочатку реверс, який полягає в гальмуванні проти-вмиканням подальшою зміною напрямку обертання і розгоні в проти-лежну сторону. Якщо реверс здійснюється при активному моменті опору $M_c = \text{const}$, перехідний процес описується рівняннями, наведеними раніше для двигунного режиму, з тією різницею, що в цих рівняннях потрібно поставити знак мінус перед ω_c і перед $M_{Поч}$.

$$\omega = -\omega_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

$$M = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) - M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

На рис.19.1 зображена механічна характеристика, що ілюструє перехід з двигунного режиму в режим противмикання (а) і відповідні криві перехідного процесу $\omega(t)$ і $M(t)$.

Двигун при переході його в режим противмикання гальмується по лінії BC. Потім, якщо його не відключити від мережі, буде розганятися в зворотному напрямку по лінії CD, досягає швидкості ідеального холостого ходу ($-\omega_0$) і та момент як опір активний, переходить в режим рекуперації з віддачею енергії в мережу (лінія DE). Рівновага настане у т.Е, де $M=M_c$ і швидкість $-\omega_c$. Такий процес може бути, якщо в разі підйому важкого вантажу двигун гальмується противмиканням і при $\omega=0$ не відключається і не загальмовується механічними гальмами.

При реактивному моменті опору процес розбивається на два етапи. На першому етапі, що є гальмівним, момент M_c і момент двигуна діють відповідно, забезпечуючи ефективне гальмування. Закон зміни ω і M описуються тими ж рівняннями що і при активному M_c . Час гальмування до $\omega=0$

$$t_T = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{нач} - (-\omega_c)}{\omega_c} = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{нач} + \omega_c}{\omega_c}.$$

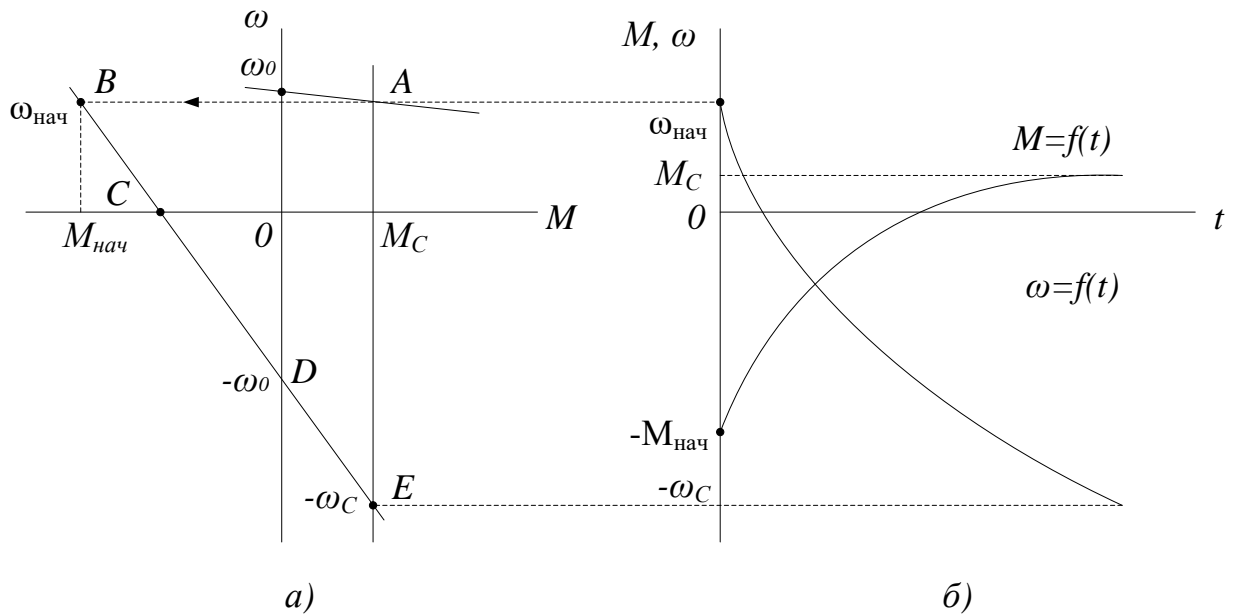


Рис.19.1.

На другому етапі відбувається розгін в протилежному напрямку (після гальмування і зупинки), якщо потрібен реверс. Знак M_c змінюється на протилежний. Рівняння, що описують перехідний процес матимуть такий самий вигляд, як для режиму пуску, тільки $\omega_{поч} = 0$, $M_{поч} = M_p$, $\omega_c = -\omega'_c$, тобто

$$\omega = -\omega'_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right); \quad M = -M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) - M_n \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

де M_{Π} – пусковий момент.

Час реверсу

$$t_{\text{рев}} = t_m + t_n = T_M \cdot \ln \frac{\omega_{\text{нач}} + \omega_c}{\omega_c} + T_M \cdot \ln 50.$$

Механічні характеристики, відповідні даному режиму і криві перехідного процесу наведені на рис.19.2.

При переході швидкості через 0 динамічний момент $M_{\text{дин}}$ стрибком змінюється від значення $M_{\text{дин}} = - (M_{\Pi} + M_c)$ до $M_{\text{дин}} = - (M_{\Pi} - M_c)$, що викликає відповідну зміну прискорення і в кривих $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$ з'являється злам.

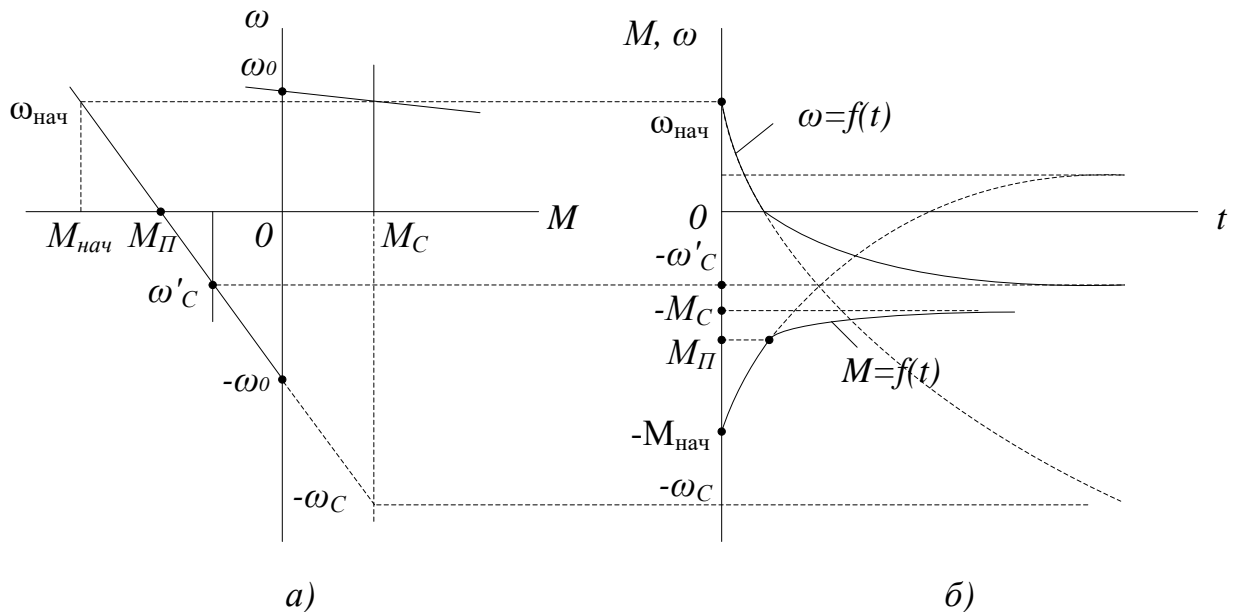


Рис.19.2.

При динамічному гальмуванні закони зміни ω і M описуються тими ж рівняннями, що і для реверсу, тобто

$$\omega = -\omega_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) - \omega_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad M = M_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) - M_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}},$$

де ω_c – стала швидкість, яка визначається точкою перетину механічної характеристики динамічного гальмування і вертикалі $M_c = \text{const}$.

У разі активного M_c точка "В", що відповідає сталій швидкості $-\omega_{c2}$, відноситься до випадку, коли цей момент на початку процесу є гальмівним, що має місце, наприклад, при підйомі вантажу, а точка "С" зі сталою швидкістю ω_{c1} – до випадку, коли цей момент є рушійним, наприклад, при спуску вантажу (рис.19.2).

19.2. Гальмування електроприводу.

У разі гальмування при підйомі вантажу під дією гальмівного моменту двигуна і M_c привід спочатку буде гальмується і зупиниться, тому що момент двигуна стане рівним 0, але тому що M_c є активним і буде продовжує діяти в тому ж напрямку, під його дією система буде обертатися у зворотний бік. При цьому M_c з гальмівного перетвориться в рушійний, а гальмівний

момент двигуна змінить свій знак і буде продовжувати діяти як гальмівний. Стала швидкість $-\omega_{c2}$ настане при рівності моменту двигуна і M_c тобто в точці "В". Криві перехідного процесу для цього випадку зображені на рис.19.3. Час гальмування до зупинки.

$$t_m = T_m \cdot \ln \frac{\omega_{нач} - \omega_c}{-\omega_c}$$

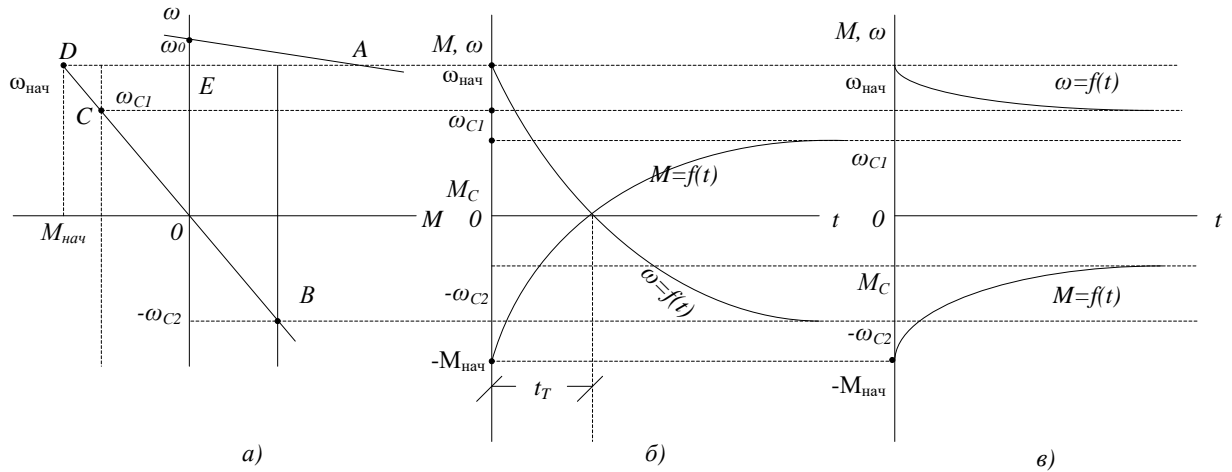


Рис.19.3.

Якщо активний момент опору M_c на початку гальмування був рушійним (гальмування при спуску вантажу), то на початку гальмування гальмівний момент двигуна (відрізок ED на рис. 19.3,а) більший за рушійний статичний момент і має місце уповільнення, що супроводжується зменшенням гальмівного моменту двигуна. При швидкості ω_{c1} $M = M_c$, настає сталий режим гальмівного спуску вантажу зі швидкістю ω_{c1} . В цьому випадку загальмувати систему до зупинки шляхом динамічного гальмування не можна (рис.19.3,в).

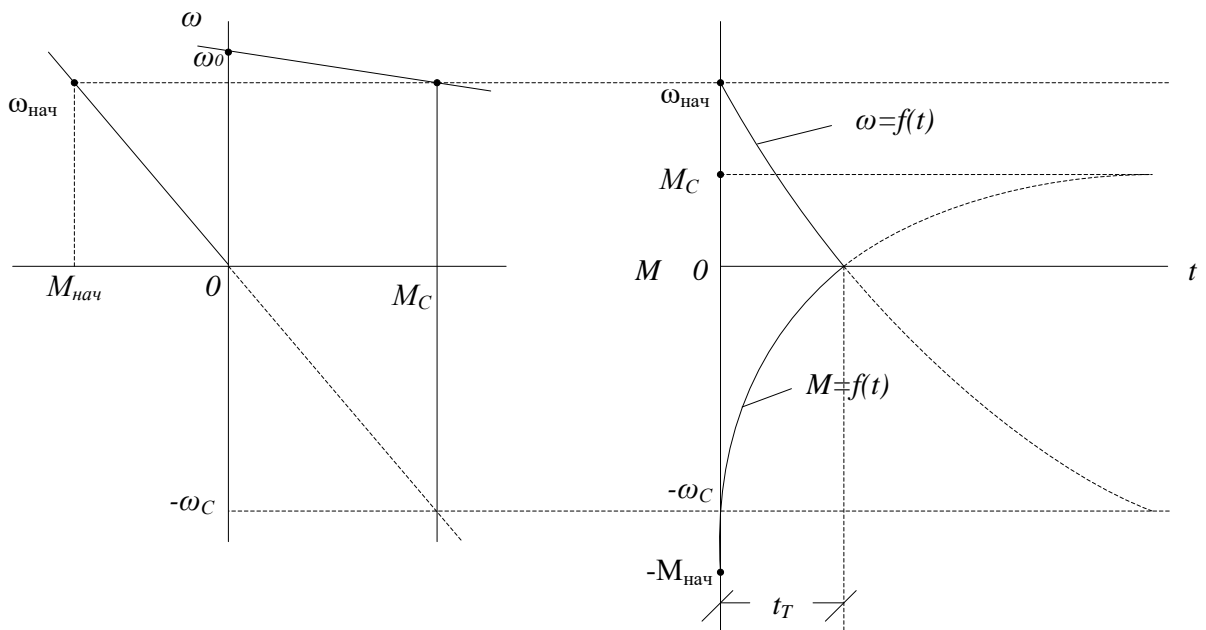


Рис.19.4.

При реактивному M_c динамічне гальмування відбувається так само, як і при підйомі вантажу. Різниця лише в тому, що при $\omega = 0$ дія M_c припиниться, і тому момент двигуна теж стане рівним 0, система зупиниться. Відповідні цьому випадку механічні характеристики і криві $\omega(t)$ і $M(t)$ зображені на наведених рис. 19.4. Процес буде протікати так, ніби швидкість ω прагнула б стати рівною $-\omega_c$, але припиниться при $\omega = 0$. Тому відповідні відрізки кривих на рисунку зображені пунктиром.

Лекція №20. Переходні процеси електропривода з лінійною механічною характеристикою.

20.1. Переходні процеси при $\omega_0 = \text{const}$, $M_c = f(\omega)$.

У випадку лінійності M_c від ω , тобто при $M_c = k\omega$ диференціальне рівняння, що визначає поведінку електроприводу, має:

$$\omega_0 = \omega \cdot \left(1 + \frac{\Delta\omega_y}{\omega_y} \right) + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

де ω_y – швидкість усталеного режиму при $M_c = M_y$, а $\Delta\omega_y$ – спад швидкості при усталеному режимі (рис.20.1).

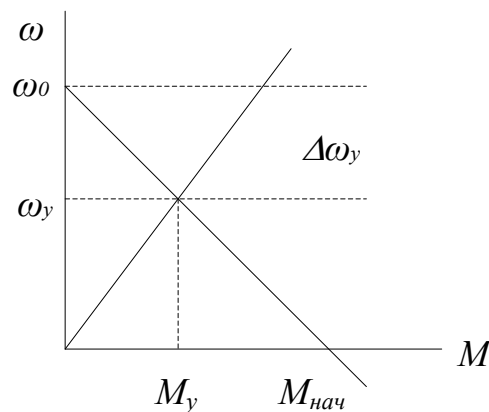


Рис.20.1.

Враховуючи, що $\omega_y + \Delta\omega_y = \omega_0$ і перемножуючи обидві частини рівняння на $\frac{\omega_y}{\omega_0}$, отримаємо

$$\omega_0 \cdot \frac{\omega_y}{\omega_0} = \omega \cdot \frac{\omega_y}{\omega_0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\omega_y}{\omega_y} \right) + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{\omega_y}{\omega_0} \text{ або}$$

$$\omega_y = \omega + T_M \cdot \frac{\omega_y}{\omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \omega + T'_M \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

$$\text{де } T'_M = T_M \cdot \frac{\omega_y}{\omega_0}.$$

Розв'язок цього рівняння відносно ω і M дає закони зміни ω і M

$$\omega = \omega_y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'_M}}) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T'_M}}; \quad M = M_y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T'_M}}) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T'_M}}$$

Тривалість перехідного процесу $t = T'_M \cdot \ln \frac{\omega_{нач} - \omega_y}{\omega_{кон} - \omega_y}$.

Тут $T'_M = T_M \cdot \frac{\omega_y}{\omega_0}$ – це час, протягом якого електропривод розженеться до ω_y при постійному моменті, рівному пусковому M_p .

При $M_c = M_0 + K_1\omega$ і $M_c = M_0 - K_1\omega$ (рис.20.2) перехідний процес описується цими ж рівняннями, що і при $M_c = K\omega$, але в них $T'_M = T_M \cdot \frac{\omega_y}{\omega'}$.

При вентиляторному моменті опору диференціальне рівняння, що відображає перехідний процес, має вигляд:

$$\omega_0 = \omega \cdot (1 + \omega \cdot \frac{\Delta\omega_y}{\omega_y}) + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

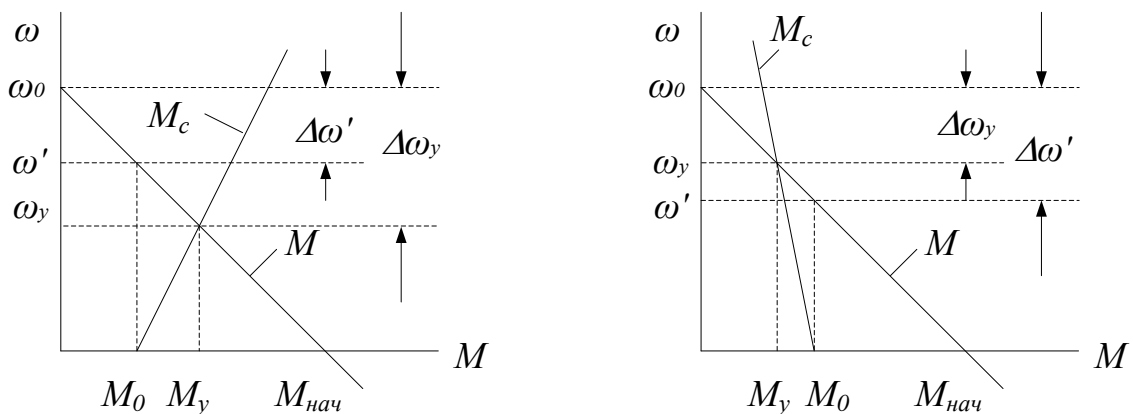


Рис.20.2.

Хоча це рівняння розв'язати можна, проте кінцеві результати малопридатні для практичного використання. Тому на практиці частіше використовуються графічні і графоаналітичні методи. Природно, що такі методи дають лише наближені результати, однак, при ретельному виконанні їх точність достатня для вирішення практичних завдань. Правда, такі методи мають і такий недолік: вони не дають можливості отримати загальні висновки. Рішення може бути знайдено лише для випадків, коли значення всіх параметрів електроприводу відомі.

20.2. Перехідні процеси при $\omega_0=f(t)$ і $M_c=const$

При пуску електроприводу включенням його в мережу на повну напругу $U = const$ і $f_1 = const$ перехідні процеси виникають при стрибку напруги, або як прийнято говорити, при стрибку керуючого впливу $\omega_0 = const$. Для

обмеження кидків струму і моменту в розімкнутих системах в якірне або роторне коло двигуна доводиться вводити додатковий опір.

У замкнених системах (Г-Д, ТП-Д, ТПЧ-АД та ін.) є можливість формувати перехідні процеси, близькі до оптимальних, шляхом плавної зміни керуючого впливу. Вони протікають в цьому випадку при $\omega_0 = f(t)$. При цьому є можливість обмежувати темп наростання керуючого впливу допустимим значенням $\omega_0 = \varepsilon_0 t$, де ε_0 – допустиме з тих чи інших причин прискорення електроприводу.

Проаналізуємо особливості перехідних процесів при лінійній зміні керуючого впливу в часі, тобто при лінійній зміні U_d або f_1 , при якому $\omega_0 = \omega_{0\text{поч}} + \varepsilon_0 t$.

Якщо підставити значення $\omega_0(t)$ в раніше отримане диференціальне рівняння, що визначає перехідний процес при $\omega_0 = \text{const}$, одержимо

У разі $\frac{T_M}{T_\gamma} > 2$ впливом електромагнітної інерції можна знехтувати, вважаючи $T_\gamma \cong 0$. Тоді

$$T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \Delta\omega_c = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 \cdot t - \Delta\omega_c.$$

Права частина цього рівняння – частковий розв’язок, що відповідає сталому режиму, який настане після загасання вільних складових. Для цього режиму загальний характер руху такий:

$$T_\gamma \cdot T_M \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - \Delta\omega_c = \omega_{0\text{кон}} + \varepsilon_0 t - \Delta\omega_c.$$

Тут $\omega = a + bt$, де a і b – невизначені коефіцієнти, що знаходяться з початкових умов.

Маючи на увазі, що $\frac{d\omega}{dt} = a + b = \varepsilon_0$, можна написати

$$T_M \cdot \varepsilon_0 + a + bt = \omega_{0\text{нач}} + \varepsilon_0 \cdot t - \Delta\omega_c.$$

При $t = 0$

Загальне розв’язок диференціального рівняння щодо ω

$$a = \omega_{0\text{нач}} - T_M \cdot \varepsilon_0 - \Delta\omega_c.$$

Загальне розв’язок диференціального рівняння щодо ω

$$\omega = a + b \cdot t + A \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} = \omega_{0\text{нач}} - T_M \cdot \varepsilon_0 - \Delta\omega_c + \varepsilon_0 \cdot t + A \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

При $t=0$ $\omega_{\text{нач}} = \omega_{0\text{нач}} - T_M \cdot \varepsilon_0 - \Delta\omega_c + A$, звідки

$$A = \omega_{\text{нач}} - (\omega_{0\text{нач}} - T_M \cdot \varepsilon_0 - \Delta\omega_c).$$

Остаточно закон зміни швидкості

$$\omega = \varepsilon_0 \cdot t + (\omega_{0\text{нач}} - T_M \cdot \varepsilon_0 - \Delta\omega_c)(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + \omega_{\text{нач}} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Диференціальне рівняння системи щодо моменту при має вигляд з урахуванням динамічного моменту

$$T_M \cdot \frac{dM}{dt} + M = M_c + J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = M_c + T_M \cdot \varepsilon_0 \cdot \beta.$$

а його розв'язок щодо моменту:

$$M = (M_c + T_M \cdot \beta \cdot \varepsilon_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Скористаємося отриманими загальними виразами для $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$ для аналізу перехідних процесів електроприводу з лінійною механічною характеристикою при реактивному моменті M_c , обмежившись лише режимом пуску. Зобразимо механічні характеристики, на яких електропривод працює в процесі пуску, а поруч будуть зображуватися криві перехідного процесу.

Процес пуску розбивається на 3 етапи. На першому етапі двигун нерухомий ($\omega = 0$), а зростання ω_0 викликає лінійне зростання його моменту.

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) - T_s \frac{dM}{dt} = \beta(\omega_0 - \omega) = \beta(\omega_{нач} + \varepsilon_0 \cdot t) = \beta \cdot \varepsilon_0 \cdot t.$$

Так як $\omega_{поч} = 0$, $\omega = 0$

Перший етап закінчується, коли $M = M_c$. Час запізнювання (див. рис.20.3).

$$t = t_3 = \frac{M}{\beta \cdot \varepsilon_0} = \frac{\Delta\omega_c}{\varepsilon_0}.$$

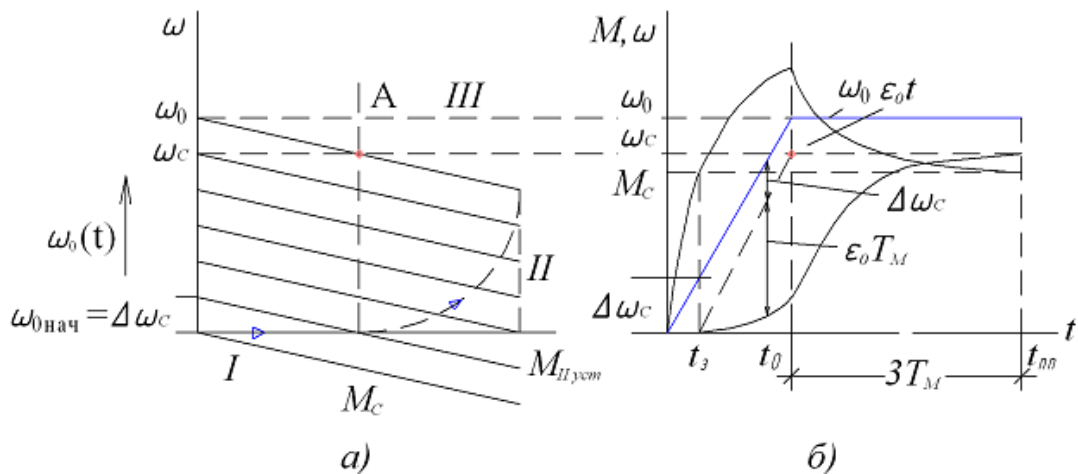


Рис.20.3.

Після досягнення моментом двигуна значення, рівного M_c , двигун приходить в обертання і починається другий етап (II), який закінчиться, коли ω_0 перестане змінюватися, тобто стане рівною $\omega_0 = \text{const}$. Початкові умови для другого етапу: $\omega_{поч} = 0$; $\omega_{0поч} = \Delta\omega_c$; $M_{поч} = M_c$.

Переносючи початок координат в точку t_3 і відраховуємо час звідси. Отже, закони зміни ω і M будуть такими при $t = 0$

$$\omega = \varepsilon_0 \cdot t + (\Delta\omega_c - \Delta\omega_c - T_M \cdot \varepsilon_0)(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + 0 = \varepsilon_0 \cdot t - T_M \cdot \varepsilon_0(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}).$$

$$M = (M_c + T_M \cdot \beta \cdot \varepsilon_0)(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + M_c \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} = M_c + T_M \cdot \beta \cdot \varepsilon_0(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}).$$

Криві, що відображають процес на цьому етапі зображені на рис. 20.3,б.

В кінці другого етапу ($t = t_0$) двигун виходить на характеристику, що відповідає $\omega_0 = \text{const}$. До цього він послідовно переходить з однієї характеристики на іншу, кожній з яких відповідає своя ω_0 (рис.20.3,а).

Залежності $\omega = f(t)$ і $M = f(t)$ дозволяють побудувати фазову траєкторію, тобто динамічну характеристику.

На третьому етапі (III) двигун працює при постійній напрузі (незмінній частоті f_1) при $\omega_0 = \text{const}$. Відбувається дотягування двигуна до швидкості ω_c , що відповідає сталому режиму в точці А. На цьому етапі закони зміни ω і M описуються рівняннями, що відповідають $\omega_0 = \text{const}$, тобто сталості керуючого впливу (постійної гапруги U мережі або постійної частоти f_1).

$$\omega = \omega_c(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad M = M_c(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Початок координат при цьому треба перенести в точку t_0 , тобто час на цьому етапі відраховується від t_0 . Загальний час перехідного процесу $t_{III} = t_3 + t_0 + 3T_M$.

Лекція №21. Регулювання координат електропривода.

21.1. Вимоги до координат електроприводу і формування його статичних та динамічних характеристик.

Управління рухом електроприводу і технологічним процесом установки, як правило, вимагає регулювання кількох координат, різних на різних етапах роботи. В залежності від задач управління регулювання координат може здійснюватися з метою:

- а) підтримання заданого рівня змінної;
- б) зміни змінної за заданим законом;
- в) обмеження змінної допустимим значенням;
- г) відпрацювання законів руху, що задаються на вході системи з необхідною точністю.

Можливі наступні способи управління змінними:

- а) параметричні способи, використовувані в розімкнених системах;
- б) способи автоматичного управління, засновані на зміні підводиться до двигуна напруги, а для двигунів змінного струму ще й частоти при використанні зворотних зв'язків, що має місце в замкнутих системах.

Хоча параметричні способи, засновані на зміні параметрів кіл двигунів, широко застосовуються в сучасному електроприводі, однак можливості їх обмежені, оскільки у багатьох випадках при такому регулюванні не можна забезпечити необхідні режими роботи і показники.

Тому область розімкнутих систем електроприводу звужується і вони замінюються замкнутими системами з зворотними зв'язками.

Автоматичне регулювання змінних здійснюється за відхиленням змінної від заданого значення за допомогою негативного зворотного зв'язку по регульованій змінній (це основний спосіб регулювання).

21.2. Основні показники способів регулювання координат електропривода.

Для зіставлення між собою можливих способів регулювання координат використовуються такі узагальнені показники:

1. Точність (стабільність) регулювання.
2. Діапазон регулювання.
3. Плавність регулювання.
4. Динамічні показники якості регулювання.
5. Економічність регулювання.
6. Допустиме навантаження при регулюванні.

Точність регулювання або інакше точність підтримки заданої змінної X визначається можливими відхиленнями її від заданого значення під дією збурюючих факторів, наприклад, змінення навантаження при регулюванні швидкості, зміну швидкості при регулюванні моменту і т. д. У розімкнутих системах оцінкою точності може служити відношення найбільшого відхилення (рис.21.1) регульованої величини до середнього значення

$$\Delta x_{\max}^* = \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\text{ср}}} = \frac{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot 2}{(x_{\max} + x_{\min}) \cdot 2} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max} + x_{\min}} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2 \frac{(x_{\max} + x_{\min})}{2}}$$

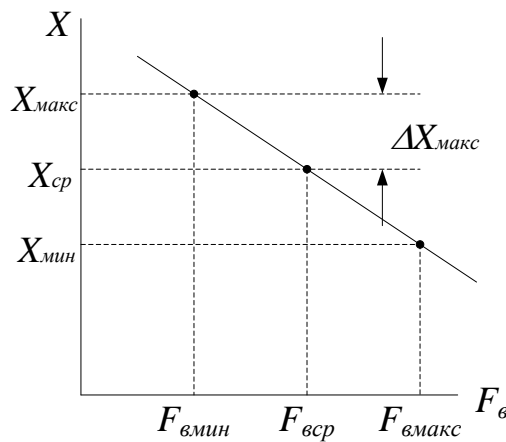


Рис.21.1.

Чим жорсткіша залежність X від F_v , тим точніше регулювання.

Діапазон регулювання характеризує межі зміни середніх значень змінної X , можливі при даному способі регулювання (рис.21.2)

$$D = \frac{x_{\text{ср.макс}}}{x_{\text{ср.мин}}}$$

Зазвичай D позначається в числах, наприклад $D = 100 : 1$; $D = 30 : 1$.

Верхня межа регулювання змінної обмежується максимально допустимим або максимально реалізованим значенням змінної, а нижня межа – необхідною точністю підтримання заданої змінної і можливістю практичної реалізації при даному способі регулювання.

Наприклад, верхня межа регулювання швидкості двигуна обмежується механічною міцністю якоря або ротора, а для двигунів постійного струму ще й умовами комутувань, оскільки із збільшенням швидкості зростає реактивна ЕРС в комутованій секції обмотки якоря. Потрібно мати на увазі, що зниження середнього значення регульованої змінної призводить до зростання відносної помилки $\Delta x_{\text{макс}}^*$ регулювання.

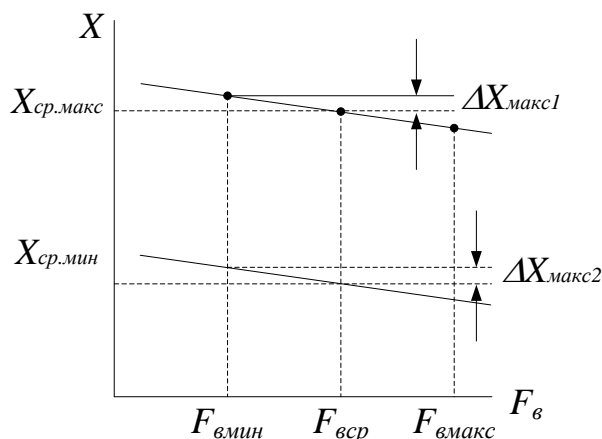


Рис.21.2.

Якщо показане на рис.21.2 значення $x_{\text{ср.хв}}$ вважати мінімально допустимим за умовами точності регулювання, то йому при заданій допустимій відносній помилці $\Delta x_{\text{доп}}^*$ відповідає співвідношення

$$\Delta x_{\text{макс2}}^* = \frac{\Delta x_{\text{макс2}}}{x_{\text{ср.мін}}} < \Delta x_{\text{доп}}^*.$$

Плавність регулювання характеризується числом дискретних (проміжних) значень регульованої змінної, одержуваних при даному способі регулювання в діапазоні регулювання. Вона тим вище, чим менший стрибок змінної при переході від даного її значення до найближчого можливого значення. Іноді для оцінки плавності використовується поняття коефіцієнта плавності, під яким розуміється відношення двох сусідніх значень змінної

$$k_{\text{пл}} = \frac{x_i}{x_{i-1}}. \text{ Чим ближче } k_{\text{пл}} \text{ до одиниці, тим плавніше регулювання.}$$

При автоматичному регулюванні координат електропривода важливе значення мають динамічні показники якості регулювання, оцінювані за характером перехідного процесу при стрибку керуючого впливу. Головним показником швидкодії, безпосередньо впливає на продуктивність ряду механізмів, є час пуску і гальмування електропривода. Швидкодія характеризується такими показниками, як час запізнювання t , час регулювання t_p , за яке змінна перший раз досягає усталеного значення $x_{\text{уст}}$,

час максимуму $t_{\text{макс}}$, загальний час перехідного процесу t_{III} , за яке згасають всі її вільні складові (рис.21.3).

Перерегулювання являє собою динамічну похибку і характеризується максимальним відхиленням $\Delta x_{\text{макс}}$ від $x_{\text{уст}}$ при $t_{\text{макс}}$, віднесеним до сталого значення регульованої змінної

$$\Delta x_{\text{макс}}^* = \frac{\Delta x_{\text{макс}}}{x_{\text{уст}}}$$

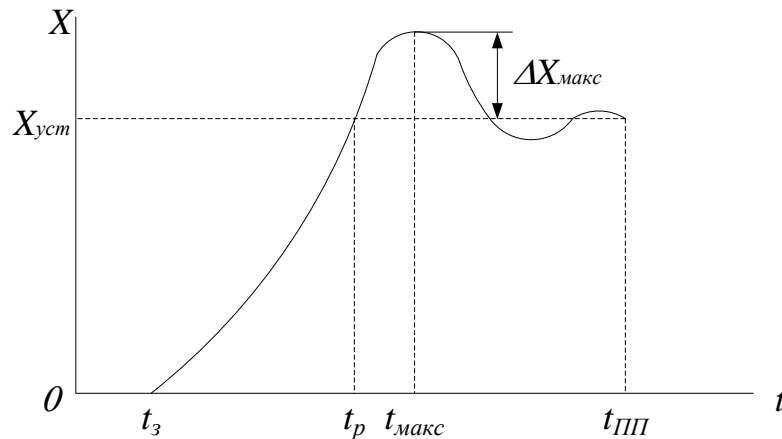


Рис.21.3.

Однією з головних змінних, необхідності регулювання, яка диктується технологічними вимогами, в більшості випадків є швидкість електропривода. При її регулюванні необхідно знати, які механічні навантаження можуть бути допустимі на валу двигуна. Тому одним з найважливіших показників є допустиме навантаження. Необхідність її оцінки виникає у зв'язку з тим, що M_c приводиться механізму в загальному випадку також залежить від швидкості.

Допустиме навантаження залежить від методу регулювання швидкості, обмежується нагріванням двигуна, викликаним втратами енергії в ньому. Вони ж визначаються головним чином величиною споживаного струму. Зазвичай вважається, що двигун працює нормально, якщо при тривалому навантаженні струми в колах його обмоток не перевищує номінального значення. В цьому випадку двигун не нагрівається вище допустимої температури. Для визначення допустимого навантаження (допустимого моменту) необхідно знайти його величину, що відповідає номінальному струму головного кола двигуна при різних швидкостях, і тим самим встановити залежність $M_{\text{доп}}=f(\omega)$.

Дуже суттєвим є забезпечення відповідності закону зміни M_c і характеру залежності гранично допустимого за умовами нагріву моменту двигуна від швидкості. Раціональне використання двигуна при регулюванні швидкості буде в тому випадку, коли еквівалентний момент по нагріванню при зміні робочої швидкості буде змінюватися за таким же законом, що і M_c . При відсутності цього двигун буде погано використовуватися в тепловому

відношенні в одній частині діапазону зміни швидкості і може виявитися перевантаженим в іншій.

Момент і потужність, що розвивається двигуном, залежить від методу регулювання. Регулювання можливо при сталому момені і при сталій потужності, тобто розрізняються дві зони регулювання (див. рис.21.4).

Зона I відповідає регулювання при сталому моменту. Наприклад, в разі застосування ДНЗ при номінальному струмі і магнітному потоці $\Phi = \Phi_H$
 $M_{\text{дон}} = M_H = K\phi_H \cdot I_H = \text{const}$.

Потужність P_2 на валу двигуна в цій зоні змінюється за лінійним законом, тобто пропорційна швидкості

$$P_2 = M \cdot \omega.$$

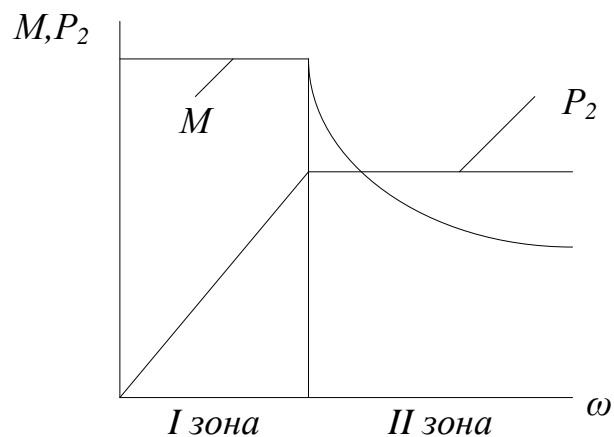


Рис.21.4.

Зона II відповідає регулюванню з постійною потужністю. У цьому випадку (стосовно ДНЗ при ослабленні магнітного потоку) зі збільшенням швидкості момент змінюється за законом гіперболи, тобто навантаження двигуна необхідно зменшити так, щоб при будь-якій даній швидкості момент дорівнював M_c .

Лекція №22. Система генератор–двигун постійного струму (Г–Д).

22.1. Загальні положення.

Принципова схема системи Г–Д без зворотних зв'язків зображена на рис. 22.1. В якості керованого перетворювача в ній використовується генератор постійного струму незалежного збудження, що приводиться в обертання асинхронним або синхронним двигуном, який називається приводним або мережевим. В якості приводного двигуна до робочої машини може використовуватись також двигун незалежного збудження (ДНЗ).

Пуск системи здійснюється включенням мережевого двигуна, що обертає генератор. Приводний двигун перед цим має бути повністю збуджений, тобто його Φ повинен бути дорівнює Φ_H . Напруга на обмотці збудження генератора повинна дорівнювати нулю.

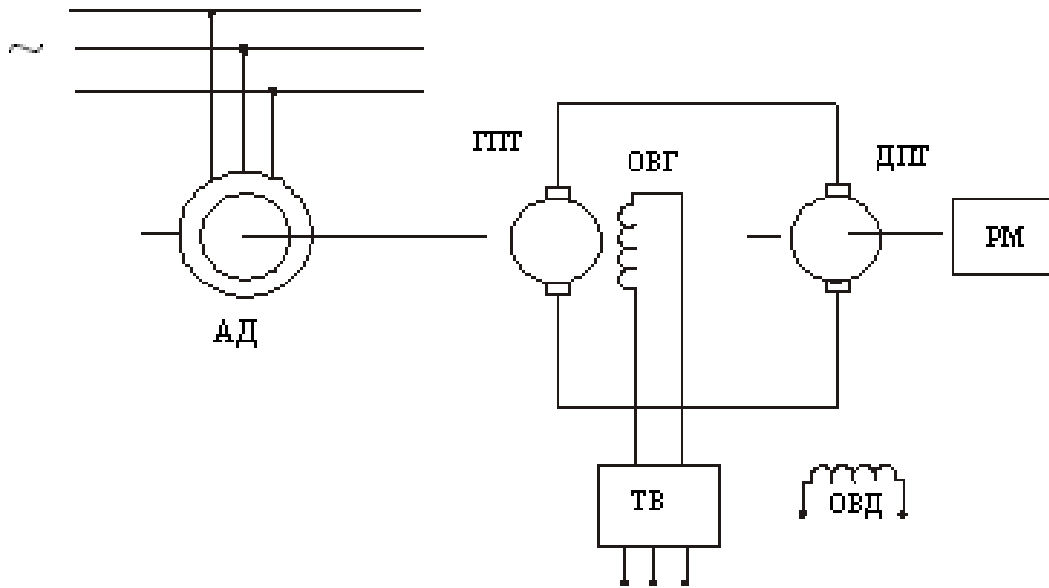


Рис.22.1.

При подачі напруги на обмотку збудження генератора і її збільшенні, він буде розвивати ЕРС, з'явиться напруга на обмотці якоря ДПС, і останній буде розганятися. При номінальному збудженні генератора напруга на якорі ДПС повинна бути номінальною (при холостому ході ДПС).

У разі застосування АД із збільшенням навантаження на валу приводного ДПС зростає гальмівний момент ГПС, що викликає зниження швидкості приводного АД, отже, зниження швидкості ГПС і його ЕРС, що, в свою чергу позначається і на напрузі якоря ДПС і його швидкості. У потужних електроприводах по системі Г-Д це зниження становить (1,5...2)%.

Перевагою асинхронного приводного двигуна є простота, надійність, дешевизна. Перевагою приводного СД є його вища стабільність до коливань напруги мережі, можливість працювати з випереджаючим струмом. Зазвичай СД використовується при потужності генератора порядку сотень і тисяч кВт.

Живлення обмотки збудження ГПС в сучасних системах Г-Д, здійснюється від тиристорного або транзисторного перетворювачів, що володіють високою швидкістю і великим коефіцієнтом підсилення по потужності. Залежність вихідної напруги тиристорного збудника від напруги управління U_y зображена на рис.22.2.

Її робочу ділянку без особливої похибки можна вважати лінійною. Динамічні процеси в ТЗ описуються рівнянням.

$$K_{Т.В} \cdot U_y = U_{ВГ} + \frac{L_{ТВ}}{R_{ТВ}} \cdot \frac{dU_{ВГ}}{dt} = U_{ВГ} \cdot (1 + T_{ТВ} \cdot \rho),$$

де $K_{Т.В} = \frac{E_{ВГ}}{U_y}$ - коефіцієнт посилення ТЗ по напрузі; $T_{ТЗ}$ – електромагнітна постійна ТЗ, що не перевищує 0,01 с.

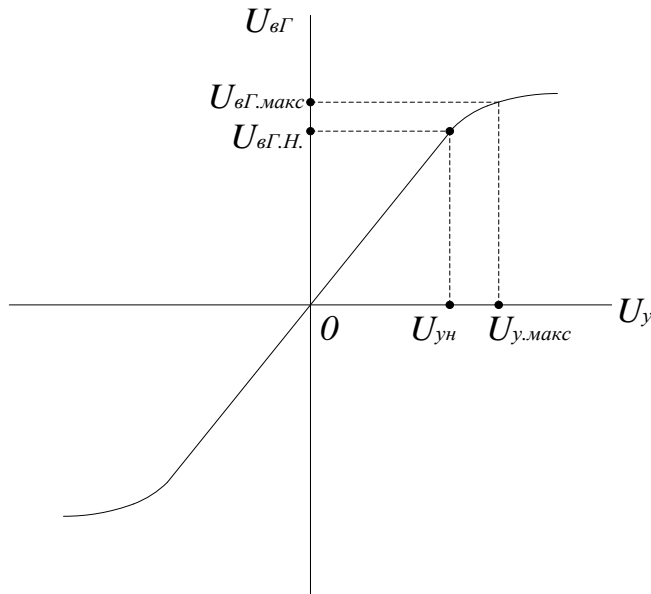


Рис.22.2.

Її робочу ділянку без особливої похибки можна вважати лінійною. Динамічні процеси в ТЗ описуються рівнянням.

$$K_{Т.В.} \cdot U_y = U_{ВГ} + \frac{L_{ТВ}}{R_{ТВ}} \cdot \frac{dU_{ВГ}}{dt} = U_{ВГ} \cdot (1 + T_{ТВ} \cdot \rho),$$

де $K_{Т.В.} = \frac{E_{ВГ}}{U_y}$ - коефіцієнт посилення ТЗ по напрузі; $T_{ТВ}$ – електромагнітна постійна ТЗ, що не перевищує 0,01 с.

Нехтуючи гістерезисом магнітного кола генератора, і вважаючи його ненасиченим, для лінійної залежності $E_{Г} = f(U_{ВГ})$, якою можна замінити петлю гістерезису (рис.22.3), можна написати:

$$K_{Г} \cdot U_{ВГ} = e_{Г} + \frac{L_{ВГ}}{R_{ВГ}} \cdot \frac{de_{Г}}{dt} = e_{Г} \cdot (1 + T_{ВГ} \cdot \rho),$$

де $K_{Г} = \frac{E_{Г}}{U_{ВГ}}$ - коефіцієнт посилення генератора по напрузі при $\omega_{Г} = \text{const}$;

$T_{ВГ} = T_{В} = \frac{L_{ВГ}}{R_{ВГ}}$ - електромагнітна постійна кола збудження генератора.

Отримане з рівняння рівноваги ЕРС в якірному колі

$$e_{Г} - e = i_{Я} \cdot R_{Я\Sigma} + L_{Я\Sigma} \cdot \frac{di_{Я}}{dt} = i_{Я} \cdot R_{Я\Sigma} \cdot (1 + T_{Я} \cdot \rho),$$

де $e_{Г}$ і e – відповідно ЕРС генератора і протидії ЕРС двигуна.

Оскільки $e_{Г} = k \cdot \Phi \cdot \omega_0$, а $e = k \cdot \Phi \cdot \omega$, де Φ – потік двигуна, то

$$k \cdot \Phi \cdot (\omega_0 - \omega) = i_{Я} \cdot R_{Я\Sigma} \cdot (1 + T_{Я} \cdot \rho).$$

У цих виразах $R_{Я\Sigma} = R_{ЯГ} + R_{ЯД}$; $L_{Я\Sigma} = L_{ЯГ} + L_{ЯД}$.

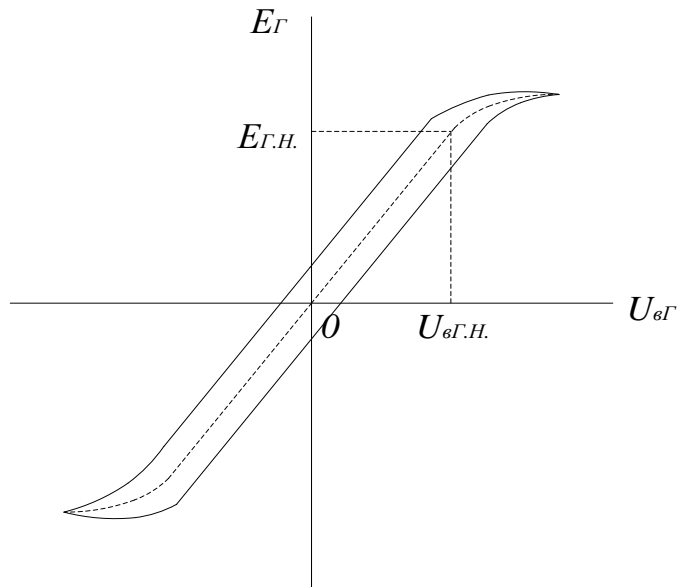


Рис.22.3.

Рівняння механічної характеристики двигуна в системі Г-Д можна Виразивши струм I_a через момент двигуна отримаємо:

$$k \cdot \Phi \cdot (\omega_0 - \omega) = \frac{R_{я\Sigma} \cdot M}{k \cdot \Phi} \cdot (1 + T_{я} \cdot \rho) \quad \text{або}$$

$$\frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{я\Sigma}} \cdot (\omega_0 - \omega) = M \cdot (1 + T_{я} \cdot \rho),$$

$$\text{або } \beta \cdot (\omega_0 - \omega) = M \cdot (1 + T_{я} \cdot \rho).$$

Тут β - модуль статичної жорсткості механічної характеристики двигуна в системі Г-Д.

У сталому режимі $p = 0$ і рівняння статичної механічної характеристики запишемо у вигляді:

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta} \quad \text{або} \quad \omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{(k \cdot \phi)^2} \cdot M.$$

Сімейство механічних характеристик двигуна в системі Г-Д, що відповідають різним значенням потоку збудження генератора, отже, різним значенням ЕРС при синхронному приводному двигуні, зображено на рис.22.4.

Жорсткість основної характеристики двигуна в 2 рази менша, ніж при живленні його від мережі з $U = \text{const}$, внаслідок того, що в якійного кола крім опору обмотки якоря двигуна є ще й опір якійного кола генератора, а вони приблизно однакові, тому що потужність генератора лише трохи більша потужності двигуна. Але швидкість ідеального холостого ходу, двигуна в розімкнутій системі Г-Д більша, ніж під час роботи від мережі з $U = \text{const}$, тому що номінальна ЕРС генератора, що визначає ω_0 двигуна, більша, ніж номінальна напруга двигуна, що визначає ω_0 під час роботи від мережі, тобто

$$\omega_{0(\Gamma Д)} = \frac{E_{ГН}}{k \cdot \phi} > \omega_0 = \frac{U_H}{k \cdot \phi}, \text{ бо } E_{ГН} = U_H + I_{Я} \cdot R_{ЯГ}.$$

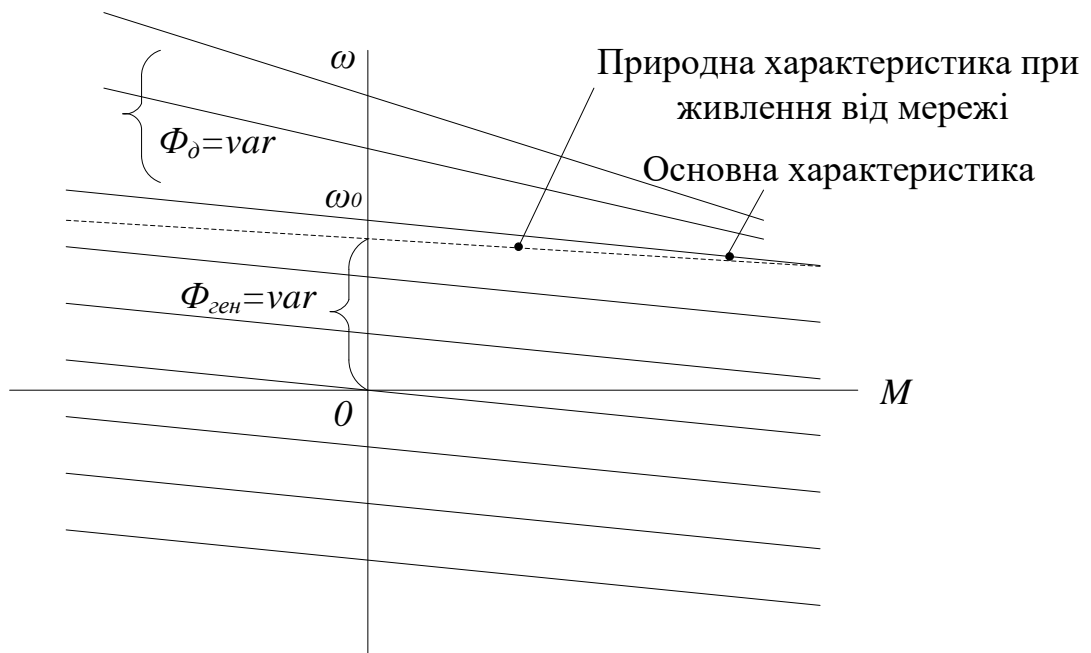


Рис.22.4.

Змінюючи потік збудження генератора, отже, його ЕРС, можна здійснити безперервне плавне керування моментом і швидкістю електропривода у всіх 4-х квадрантах координатної системи при $\beta = \text{const}$. В розімкнутій системі Г-Д за рахунок зміни потоку генератора, отже, його ЕРС, можна отримати діапазон регулювання швидкості двигуна приблизно 10:1. Змінюючи потік двигуна (послаблюючи його, можна збільшити швидкість приблизно ще в 3 рази. Таким чином загальний діапазон регулювання швидкості в розімкнутій системі Г-Д приблизно 30:1. На рис.22.4 показані характеристики двигуна і в зоні зміни потоку двигуна. Вони розташовані вище основної і жорсткість їх змінюється.

22.2. Механічні характеристики двигуна в системі Г-Д.

Механічні характеристики двигуна в системі Г-Д при асинхронному приводному двигуні будуть не паралельні, оскільки при зміні навантаження на валу приводного двигуна буде змінюватися швидкість приводного двигуна, отже, і ЕРС генератора, що, в свою чергу, позначається і на швидкості приводного двигуна. Зазвичай непаралельністю характеристик при розрахунках нехтують.

Двигун в системі Г-Д може працювати у всіх режимах. Двигунному режиму відповідають механічні характеристики в першому і третьому квадрантах. Режиму динамічного гальмування відповідає одна характеристика, що проходить через початок координат. Режиму противмикання відповідає область між віссю моментів і характеристикою

динамічного гальмування у 2-му і 4-му квадрантах. Генераторному режиму з рекуперацією енергії в мережу відповідає область у 2-му і 4-му квадрантах між віссю швидкостей і характеристикою динамічного гальмування.

Основним способом гальмування двигуна в системі Г-Д є рекуперативне. Для отримання цього режиму необхідно зменшувати або зняти збудження генератора. ЕРС двигуна стане більше ЕРС генератора. Двигун перетвориться в генератор. Струм в якірному колі, який визначається

різницею $I_{я} = \frac{E_{Г} - E_{ДВ}}{R_{яΣ}}$, змінить напрямок на протилежний. Генератор

перетвориться в двигун, що працює з ослабленим магнітним потоком. Швидкість його збільшиться і він розкручуватиме ротор приводного двигуна, якщо він асинхронний, з вищою за синхронну швидкість. Приводний двигун перетвориться в генератор і буде віддавати в мережу активну енергію, споживаючи реактивну. Якщо ж приводним двигуном є синхронний, то швидкість його не може зрости, оскільки вона визначається

частотою напруги мережі, до якої він підключений ($\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{\rho_{п}}$). Але під дією

обертального моменту генератора, що перетворився в двигун, вісь магнітного поля його ротора буде не відставати, а випереджати вісь магнітного поля статора і він перетвориться на генератор, віддаючи в мережу активну енергію. Що стосується реактивної енергії, то він буде її споживати, якщо працює в режимі недозбудження, а якщо він перезбуджений, то буде віддавати її в мережу

За допомогою наведених вище рівнянь динаміки для кола збудження генератора, тиристорного збудника, рівняння механічної характеристики двигуна і рівняння руху електроприводу при жорстких механічних зв'язках, можна побудувати структурну схему системи Г-Д, яка зображена на рис.22.5.

З неї випливає, що при зміні керуючого впливу стрибком ЕРС генератора і швидкість ω_0 двигуна в системі Г-Д змінюються згідно із законом, визначається перехідною функцією аперіодичної ланки з постійною $T_{Г} = T_{В}$.

До переваг системи Г-Д відносяться наступні:

1. Відсутні громіздкі пускові реостати і втрати в них.
2. Легка керованість електродвигуном.
3. Управління процесами перенесено в коло збудження, які мають невеликі струми, що полегшує і здешевлює апаратуру.
4. Порівняно високий діапазон регулювання швидкості ($\sim 30:1$) навіть в розімкнутій системі.
5. Відносно невелике споживання реактивної потужності навіть при асинхронному приводному двигуні.

Недоліки системи Г-Д:

1. Висока встановлена потужність, що перевищує в 3-4 рази потужність приводного двигуна.
2. Висока початкова вартість машинного обладнання.

3. Велика займана площа і необхідність громіздких фундаментів в потужних системах.
4. Підвищений шум при роботі машин.
5. Підвищена крутизна механічних характеристик.
6. Порівняно низький ККД, що дорівнює добутку ККД машин, що входять в систему.

Лекція №23. Розрахунок статичних механічних характеристик в системі Г-Д.

23.1. Розрахунок характеристик в системі Г-Д без зворотніх зв'язків.

Розрахунок статичних механічних характеристик систем Г-Д без зворотніх зв'язків можна виконати використовуючи рівняння:

$$\omega = \frac{E_G}{k \cdot \phi} - \frac{R_{\Sigma}}{k \cdot \phi} \cdot I_A \quad \text{і} \quad \omega = \frac{E_G}{k \cdot \phi} - \frac{R_{\Sigma}}{(k \cdot \phi)^2} \cdot M.$$

Порядок розрахунку механічної характеристики наступний:

1. Визначається номінальна ЕРС генератора, що відповідає номінальному навантаженні двигуна

$$E_{ГН} = k \cdot \phi \cdot \omega_H + I_{ЯН} \cdot R_{\Sigma} = E_{ДВ} + I_H \cdot R_{\Sigma} = U_H + I_{ЯН} \cdot R_{ЯГ}.$$

2. Визначається ω_0 двигуна, відповідна основній характеристиці:

$$\omega_0 = \frac{E_{ГН}}{k \cdot \phi}.$$

У цих виразах $R_{\Sigma} = R_{ЯГ} + R_{ЯД}$; Φ – потік двигуна.

3. За рівняння механічної характеристики знаходиться швидкість $\omega_{нроз}$ двигуна при номінальному навантаженні $M = M_H$. Через 2 точки з координатами $\omega = \omega_0$; $M = 0$ і $\omega = \omega_{нрасч}$; $M = M_H$ проводиться основна характеристика.

4. Для розрахунку характеристик, відповідних іншим ω_0 , визначається ЕРС генератора при заданих швидкостях ω_X і відповідна цій ЕРС швидкість ω_{0X} :

$$E_{ГХ} = k \cdot \phi \cdot \omega_X + I_H \cdot R_{\Sigma}.$$

Далі розрахунок ведеться у відповідності до п.3.

5. Визначається потік збудження генератора, що створює ЕРС $E_{ГХ}$:

$$\phi_{ГХ} = \frac{E_{ГХ}}{K_G \cdot \omega_{HG}},$$

де $K_G = \frac{N \cdot \rho_{II}}{2 \cdot \pi \cdot a}$, ω_{HG} – швидкість обертання генератора, N , ρ_{II} , a – число витків обмотки якоря генератора, число пар його полюсів і число пар паралельних віток обмотки якоря.

6. За кривою намагнічування генератора знаходяться відповідний потоку $\Phi_{ГХ}$ струм збудження $I_{зХ}$.

7. Розраховується необхідна напруга збудження

$$U_{BX} = I_{BX} \cdot R_B,$$

де $I_{BX} = i_{BX}^* \cdot I_{BH}$, якщо залежність потоку від струму дана у відносних одиницях.

23.2. Система тиристорний перетворювач - двигун (ТП-Д).

Принципова схема системи ТП-Д зображена на рис.23.1.

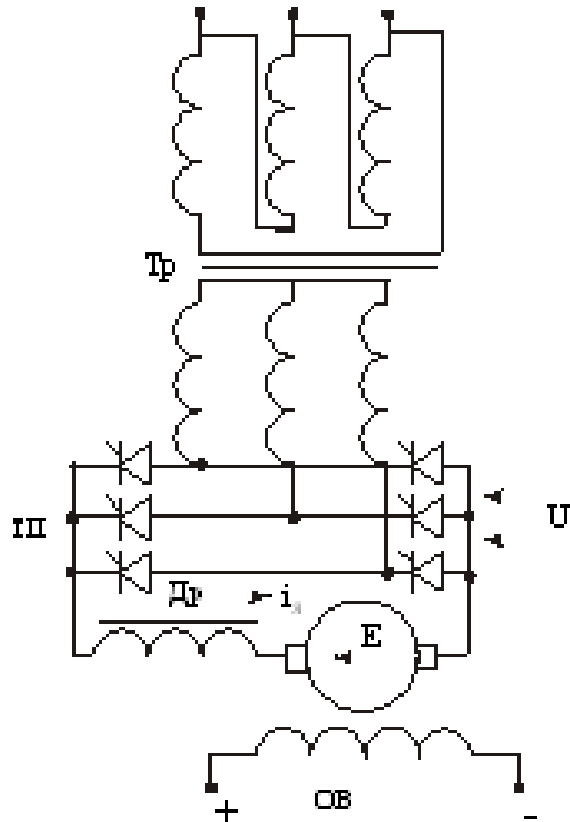


Рис.23.1.

Тут двигун постійного струму незалежного збудження живиться від тиристорного перетворювача.

Часова діаграма напруг мережі живлення до кривих випрямленої напруги представлена на рис. 23.2. Тут α – кут затримки відкривання вентилів, γ – кут комутації, U_d – середнє значення випрямленої напруги, $E_{дв} = E$ - ЕРС двигуна.

Середнє значення випрямленої напруги

$$U_d = \sqrt{2} \cdot U_{2л} \cdot \sin \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha,$$

де m – число пульсацій випрямленої напруги (для мостової трифазної схеми $m=6$); $U_{2л}$ – діюче значення лінійного напруга вторинної обмотки живильного транс-форматора (або мережі в безтрансформаторних схемах), U_{d0} – максимальне значення середньої випрямленої напруги при $\alpha = 0$.

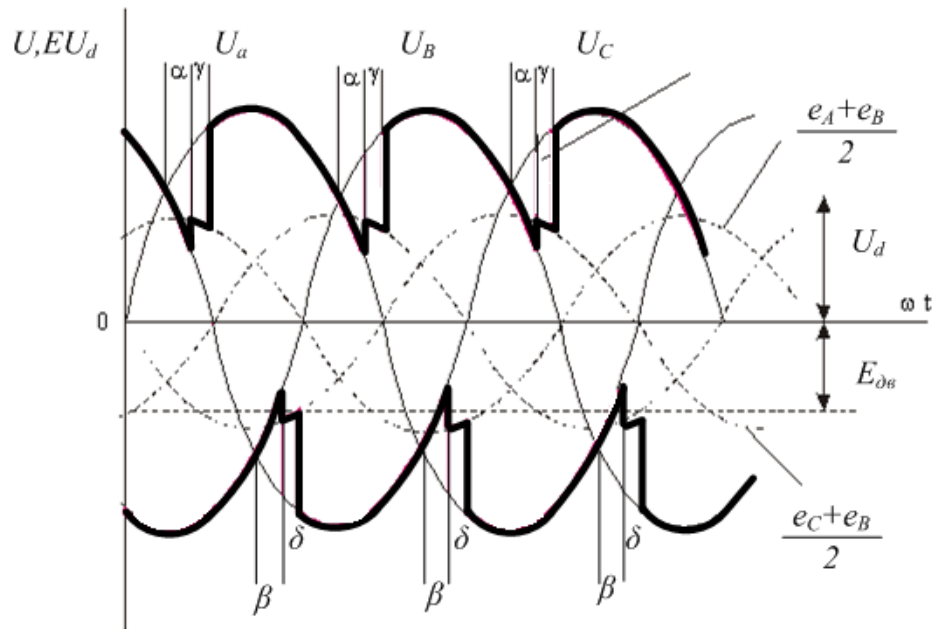


Рис.23.2.

Залежність ЕРС ТП від напруги керування U_k при лінійній характеристиці СІФК представлена на рис. 23.3.

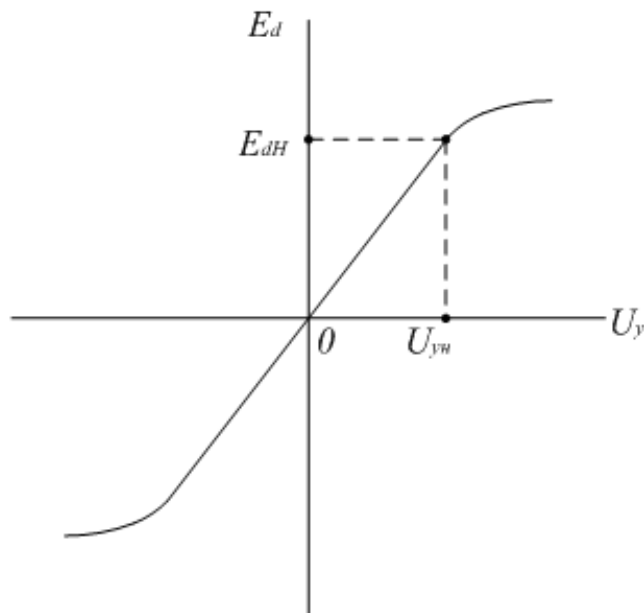


Рис.23.3.

При її заміні лінеаризованою ТП як динамічна ланка системи електроприводу в режимі безперервного струму описується рівнянням

$$K_n \cdot U_y = e_d + \frac{L_{ТП}}{R_{ТП}} \cdot \frac{de_d}{dt} = e_d \cdot (1 + T_n \cdot p),$$

де $K_n = \frac{E_d}{U_y} = const$ - коефіцієнт підсилення ТП по напрузі; $T_n = \frac{L_{ТП}}{R_{ТП}}$ - мала

постійна часу ТП, що враховує дискретність, запізнювання і наявність фільтрів у СІФК.

Рівняння електричної рівноваги в якірного кола системи ТП-Д

$$e_d - e = R_{я\Sigma} \cdot i_{я} + \frac{L_{я\Sigma}}{R_{\mathcal{E}}} \cdot \frac{di_{я}}{dt} = i_{я} \cdot R_{\mathcal{E}}(1 + T_{я} \cdot p),$$

$$\text{де } R_{\mathcal{E}} = \frac{mX_{TP}}{2\pi} + R_{я} + R_{op} + 2R_{mp} + R_{cp.в}.$$

Тут $R_{\mathcal{E}}$ – еквівалентний опір якірного кола випрямленого струму; R_{TP} – активний опір фази трансформатора, приведений до вторинного кола; $R_{я\Sigma}$ – опір якірного кола двигуна $R_{я\Sigma} = R_{я} + R_{он} + R_{ко}$; $R_{с.др}$ – опір згладжувального дроселя; $R_{ср.в}$ – усереднений опір вентилів; $X_m = X_2 + X_1 \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2$ – індуктивний опір фази трансформатора, зумовлений полями розсіювання, а x_2 і x_1 – індуктивні опор вторинної та первинної обмоток трансформатора; Φ – магнітний потік двигуна.

Приймаючи, що $e_d = K\phi_{об} \cdot \omega_0$; $e = K\phi_{об} \cdot \omega$; $i_d = i_{я} = \frac{M}{K\phi}$ отримаємо рівняння механічної характеристики двигуна для будь-якого режиму роботи

$$K\phi(\omega_0 - \omega) = R_{я\Sigma} \cdot \frac{M}{K\phi} (1 + T_{я} \cdot p) \text{ або } \frac{(K\phi)^2}{R_{я\Sigma}} (\omega_0 - \omega) = M(1 + T_{я} \cdot p).$$

$$\text{Оскільки } \frac{(K\phi)^2}{R_{\mathcal{E}}} = \beta, \text{ то } M(1 + T_{я} \cdot p) = \beta(\omega_0 - \omega).$$

Звідси випливає, що в режимі безперервного струму механічні характеристики двигуна в системі ТП-Д при прийнятих допущеннях аналогічні характеристикам системи ГД.

При $p = \frac{d}{dt} = 0$, отримаємо рівняння статичних механічних характеристик

$$M = \beta(\omega_0 - \omega) \text{ або } \omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta}.$$

Для режиму безперервного струму рівняння механічних характеристик можна записати у вигляді:

$$\omega = \frac{U_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_B}{K\phi} - \frac{R_{\mathcal{E}}}{(K\phi)^2} M.$$

Сімейство статичних механічних характеристик при різних кутах α , зображено на рис.23.4. Це прямі, що відтинають на осі ординат відрізки, відповідні швидкості ідеального холостого ходу

$$\omega'_0 = \frac{U_{d0} \cdot \cos \alpha - \Delta U_B}{K\phi}.$$

Однак при живленні двигуна від однокомплектного ТП або двокомплектного ТП при роздільному керуванні комплектами вентилів в

області малих навантажень струм стає переривчастим, причому при $U_k=0$ і $\alpha = \frac{\pi}{2}$ середнє значення U_d не дорівнює нулю. Виникає зона переривчастих струмів, причому вона тим більше, чим більше кут α (див. рис.23.4 пунктирна лінія).

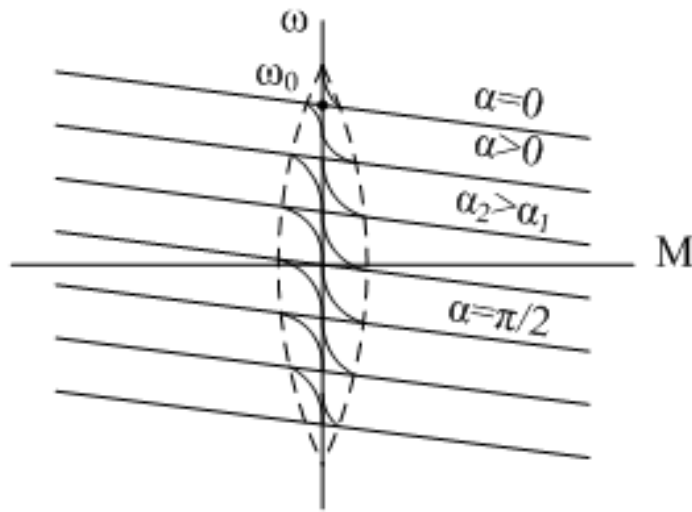


Рис.23.4.

Поява зони переривчастих струмів зумовлено тим, що в певні проміжки часу миттєве значення випрямленої напруги ТП стає менше зустрічно діючої ЕРС двигуна, що видно з графіка випрямленої напруги на рис.23.2, різниця U_{d-e} стає від'ємною. Струм при цьому повинен змінити напрям на протилежний. Але оскільки вентиля володіють односторонньою провідністю, вони закриваються і струм через них припиняється. Струм з'являється знову, коли U_d стане більшою за ЕРС. При великих навантаженнях незважаючи на те, що в певні проміжки часу миттєве значення U_d стає меншою за ЕРС двигуна, струм не переривається, є безперервним. Пояснюється це тим, що при великих навантаженнях запас електромагнітної енергії в колі випрямленого струму значний. Виникаюча при зникненні струму ЕРС самоіндукції додається з миттєвою випрямленою напругою ТП і в сумі вони перевищують ЕРС двигуна і струм не переривається. При малих навантаженнях виникає ЕРС самоіндукції виявляється недостатньою для підтримки струму і він переривається.

Переходу від режиму безперервного струму до переривчастого відповідає режим навчально-безперервного струму, що є граничним між двома зазначеними. Величина граничного струму залежить від кута α і параметрів схеми

$$J_{d.zp} = \frac{E_{d0} \cdot \sin \alpha}{X_{TP} + 2\pi f_1 \cdot L_d} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m}\right) = \frac{E_{d0} \cdot \sin \alpha}{\omega \cdot L_{я.у}} \left(1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m}\right).$$

Граничні струми (моменти) лежать на дузі еліпса, зміщеного по осі ординат на величину $\frac{\Delta U_B}{K\phi}$. Відзначимо, що якщо двигун живиться від нереверсивного ТП, як показано на рис.23.1, то система електроприводу стає

неповнокерованою. Відповідно до цього механічні характеристики в другому і третьому квадраті не існують.

При наявності зони переривчастих струмів механічні характеристики в цій зоні аналітично не беруться. Вони нагадують механічні характеристики двигуна послідовного збудження, як показано на рис.23.4. При зменшенні навантаження швидкість двигуна зростає і збільшується його ЕРС, що є протидіючою і викликає зменшення струму навантаження перетворювача. Це призводить до зменшення падіння напруги на внутрішніх опорах схеми, а також до зменшення втрат середньої напруги, зумовленого явищем комутації. У зв'язку з цим U_d зростає. При ідеальному холостому ході зникають всі падіння напруги. Напруга на двигуні (за час імпульсу струму) наближається до амплітуди напруги перетворювача напруги змінного струму та швидкість двигуна зростає. Тому в зоні малих і нульових навантажень механічні характеристики двигуна мають м'який характер, як у ДПЗ, що і видно на рис.23.4. Швидкість ідеального холостого ходу для цих характеристик може бути визначена з виразів:

$$\omega_0 = \frac{E_{2\phi.m} - \Delta U_\epsilon}{K\phi} \text{ при } 0 < \alpha < \frac{\pi}{m} \text{ і}$$

$$\omega_0 = \frac{E_{2\phi.m} \cdot \cos(\alpha - \frac{\pi}{m}) - \Delta U_\epsilon}{K\phi} \text{ при } \alpha > \frac{\pi}{m}.$$

Тут $E_{2\phi.m}$ – амплітуда фазної ЕРС вторинної обмотки живильного трансформатора або амплітуда фазної напруги мережі живлення (в безтрансформаторних схемах); ΔU_ϵ – падіння напруги в вентилях.

Використовуючи рівняння динаміки ТП, рівняння рівноваги ЕРС в якірному колі, рівняння механічної характеристики і рівняння руху електроприводу при жорстких механічних зв'язках, а так само представляючи рівняння динаміки ТП $K_{\Pi} \cdot U_y = e_d(1 + T_{\Pi} \cdot p)$ у вигляді

$$K'_{\Pi} \cdot U_y = \omega_0(1 + T_{\Pi} \cdot p), \text{ де } K'_{\Pi} = \frac{K_{\Pi}}{K\phi} = \frac{E_d}{U_y \cdot K\phi}, \text{ можна зобразити}$$

структурну схему системи ТП-Д, яка має вигляд рис.23.5.

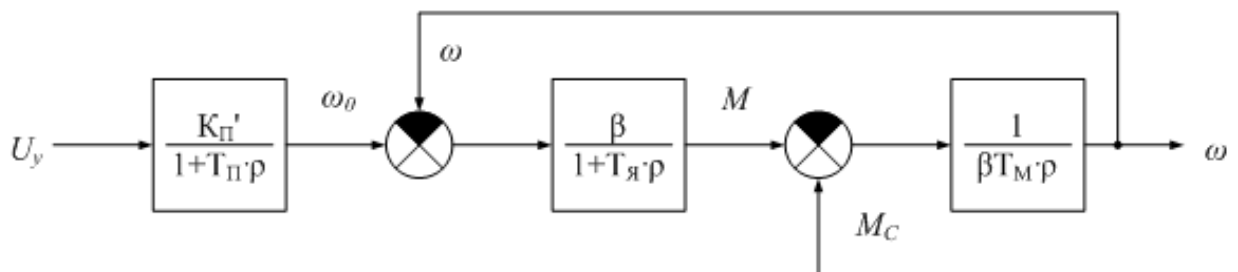


Рис.23.5.

Двигун в системі ТП-Д може працювати у всіх режимах. Як в системі Г-Д двигунному режиму відповідає область в 1 і 3 квадратах, режиму динамічного гальмування відповідає характеристика, що проходить через

початок координат при $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Режиму противмикання відповідає область, що лежить між віссю моментів і характеристикою динамічного гальмування. Режиму рекуперації відповідає область між віссю ординат у 2 і 4 квадратах і характеристикою динамічного гальмування.

Лекція №24. Розрахунок статичних механічних характеристик в системі ТП-Д.

24.1. Розрахунок статичних механічних характеристик системи ТП-Д.

Розрахунок статичних механічних характеристик системи ТП-Д без зворотних зв'язків виконується за рівнянням механічної характеристики

$$\omega = \frac{U_{d0} \cdot \cos \alpha_i}{K\phi} - \frac{R_9}{(K\phi)^2} \cdot M,$$

де $\omega = \frac{U_{d0} \cdot \cos \alpha_i}{K\phi} - \frac{R_9}{(K\phi)^2} \cdot M.$

При $m = 6$ $E_{d0} = U_{d0} = 2,311U_{2\phi}$; $m = 3$ $E_{d0} = U_{d0} = 1,17U_{2\phi}$;

Порядок розрахунку наступний:

1. Визначається еквівалентний опір якірного ланцюга

$$R_9 = \frac{mX_{mp}}{2\pi} + 2R_{mp} + R_{Я\Sigma} + R_{сд} + 2R_{y.дp},$$

де X_{mp} , R_{mp} – індуктивний і активний опір фази трансформатора, приведені до його вторинної обмотки.

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{к.з}}{m_1 \cdot I_{1н}^2 \cdot K_{mp}^2}; \quad X_{mp} = \frac{U_{к \%} \cdot U_{1\phi}}{100 \cdot I_{1н} \cdot K_{mp}^2}.$$

Тут $\Delta P_{к.з}$ - втрати к.з. трансформатора; m_1 - число фаз; $U_{кз}$ - напруга к.з. трансформатора;

$$K_{mp} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} - \text{коефіцієнт трансформації трансформатора.}$$

Опір згладжувальнрго і зрівняльного дроселів

$$R_{с.д} \cong \frac{\Delta U_{с.д.}}{I_{дн}}; \quad R_{y.д} = \frac{\Delta U_{y.д.}}{I_{дн}},$$

де $\Delta U_{с.д.} = \Delta U_{y.д.} \cong (0,005 - 0,01)U_{дн}$ - падіння напруги на дроселях при $I_{дн}$.

2. Визначається кут затримки відкриття вентилів, необхідний для забезпечення роботи двигуна з усталеною швидкістю.

$$\alpha_i = \arccos \frac{U_{di}}{U_{d0}} = \arccos \frac{K\phi\omega_{ci} + I_c \cdot R_9}{U_{d0}}.$$

Тут $I_{ci} = \frac{M_{ci}^l}{K\phi}$ - струм статичного навантаження, якому відповідає

приведений момент M_{ci}' , який визначається за характеристикою $\omega_c=f(M_c)$ при даній ω_{ci} .

3. Задаючись моментом M за рівнянням розраховуються механічні характеристики системи.

24.2. Коефіцієнт потужності та техніко-економічні показники системи ТП-Д.

Внаслідок специфіки режиму роботи вентилів відбувається спотворення форми кривої струму, споживаного ТП з мережі, а при регулюванні вихідної напруги перетворювача виникає додаткове спотворення форми кривої струму і зсув по фазі між напругою і струмом, оскільки струм через вентиля починає проходити пізніше, ніж за відсутності регулювання. Відключення вентилів, тобто припинення струму, також відбувається відповідно пізніше. При достатній індуктивності якірного кола струм через вентиля продовжує протікати в тому ж напрямку навіть при зміні знака напруги.

Найважливішим енергетичним показником вентиляного перетворювача вентиляного електропривода, є коефіцієнт потужності, який характеризує використання живильної системи. При синусоїдальній напрузі U та струму I він дорівнює косинусу кута зсуву по фазі між струмом і напругою. У вентиляних установках напруга за формою кривої близька до синусоїди (насправді крива первинної напруги несинусоїдна, що є наслідком несинусоїдності споживаного з мережі струму).

Відношення активної потужності P до повної S характеризує використання живильної енергосистеми і називається коефіцієнтом потужності вентиляного електропривода

$$\chi = \frac{P_1}{S} = \frac{3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{3U \cdot I},$$

де $S = U \cdot I = \sqrt{P_1^2 + Q^2 + N^2}$.

Тут N – потужність спотворення, викликана струмами, що протікають в мережі змінного струму. Негативний ефект потужності N схожий з ефектом реактивної потужності – збільшення втрат і зменшення ККД.

Так як $U = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2}$; $I = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2}$, то

$$\chi = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U \cdot I} = v_u \cdot v_I \cdot \cos \varphi_1 = v \cdot \cos \varphi_1,$$

де v_u , v_I – коефіцієнти спотворення напруги і струму, а v – коефіцієнт потужності спотворення. У безтрансформаторних схемах при достатній індуктивності в колі випрямленого струму $\alpha=\varphi_1$ і $\cos \varphi_1=\cos \alpha$

$$\text{У трансформаторних схемах } \cos \varphi_1 = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \cong \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right).$$

З достатнім наближенням можна вважати, що

$$\chi = v \cdot \cos \varphi_1 = v \cdot \cos \alpha = v \cdot \frac{U_d}{U_{d0}} = v \cdot \frac{\omega}{\omega_0},$$

так як напрузі U_d відповідає швидкість ω при даному куті регулювання, а напрузі U_{d0} – швидкість ω_0 при тому ж куті регулювання.

Звідси випливає, що χ вентильного електроприводу залежить від швидкості при регулюванні і навантаження на валу, тобто він пропорційний ступеню зниження швидкості.

Зниження ω і відповідно збільшення кута α , а також збільшення струму навантаження призводить до зменшення χ . На рис.24.1 наведені залежність χ від ω при номінальному навантаженні системи ТП-Д і $\cos \varphi$ системи Г-Д (для порівняння). Видно, що коефіцієнт потужності системи ТП-Д поступається системі Г-Д.

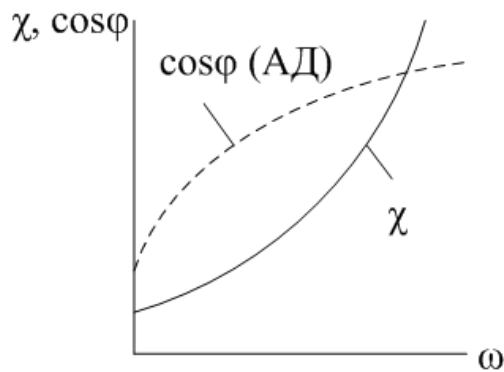


Рис.24.1.

З метою підвищення значення χ застосовуються методи штучної комутації вентилів і спеціальні резонансні фільтри, що забезпечують резонанс напруг на відповідній гармоніці і малий опір для цієї гармоніки на вході перетворювача.

ККД системи ТП – Д

$$\eta = \frac{P_{эм}}{P_c} = \frac{E_d \cdot I_d}{P_c} = \frac{\omega \cdot M}{P_c}.$$

Для режиму неперервного струму електромагнітна потужність дорівнює

$$P_{эм} = (E_d - \Delta U_B - I_d \cdot R_{Я}) \cdot I_d = (E_d - \Delta U_B - I_d \cdot R_{Я\Sigma}) \cdot I_d.$$

Потужність, що споживається з мережі

$$P_c = \left(E_d - \frac{X_{mp} \cdot m}{2\pi} \cdot I_d\right) \cdot I_d.$$

Тоді

$$\eta = \frac{(E_d - \Delta U_B - I_d \cdot R_{Я\Sigma}) I_d}{\left(E_d - \frac{m \cdot x_m}{2\pi}\right) \cdot I_d} \cong \frac{E_d}{E_d - \frac{m \cdot x_m}{2\pi}} = \frac{\omega}{\omega + \frac{\Delta U_\epsilon + I_d \cdot R_{Я\Sigma}}{K\phi}}.$$

Аналіз цього виразу показує, що ККД системи ТП-Д залежить як від навантаження двигуна, так і від швидкості при регулюванні. Порівняння наведених на рис.2.2 залежностей η від ω при номінальному навантаженні на валу двигуна показує, що він вищий, ніж в системі ГД.

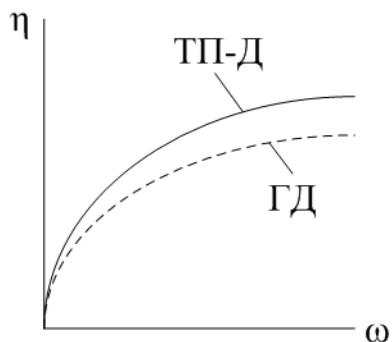


Рис.2.2.

Недоліки системи ТП-Д:

1. Значне спотворення кривої струму, споживаного перетворювачем з мережі;
2. Зменшення коефіцієнта потужності перетворювача при зменшенні швидкості. Цей недолік стає особливо помітним і важливим при великих потужностях електроприводу.
3. Неминучі при регулюванні кута α коливання реактивної потужності, що призводять до коливань напруги в мережі живлення, так само особливо помітні при великій потужності електроприводу.

- Основні переваги системи ТП-Д:
1. Висока швидкодія перетворювача, тому що $T_{п} \leq 0,1$ с;
 2. Більш високий ККД у порівнянні з системою Г-Д;
 3. Незначна потужність управління;
 4. Великий термін служби;
 5. Малі габарити і вага перетворювача.

Лекція №25. Закони частотного регулювання асинхронними двигунами.

25.1. Загальні визначення.

Використання асинхронного двигуна в регульованому електроприводі, особливо при його частотному управлінні, представляє особливий інтерес. Для реалізації цього способу керування живлення двигуна необхідно здійснювати від керованого перетворювача частоти. В якості перетворювачів частоти можуть використовуватися синхронні генератори, що обертаються зі змінною швидкістю, асинхронні перетворювачі частоти і статичні перетворювачі, що виконуються на базі автономних інверторів напруги і струму, а також на базі силових транзисторів.

При частотному управлінні АД виникає необхідність регулювати не тільки частоту, але і величину напруги, причому напруга має регулюватися не лише у функції частоти, але ще й у функції навантаження. Регулювання напруги тільки в функції частоти з урахуванням характеристик механізму може бути реалізоване у розімкнутих системах частотного управління, а в функції частоти і навантаження – лише в замкнутих системах. Верхня межа регулювання частоти, отже, швидкості двигуна, обмежується міцністю кріплення обмоток ротора і помітним збільшенням втрат в сталі статора. Нижня межа обмежена складністю реалізації джерела живлення з низькою

частотою і можливістю нерівномірності обертання двигуна. Як правило, напруга регулюється лише вниз по відношенню до номінальної, а частота – вгору і вниз по відношенню до основної (номінальної).

При виборі співвідношення між частотою і напругою, що підводиться до статора АД, найчастіше виходять з умови збереження переважувальної здатності двигуна для будь-якої з його регулювальних характеристик. Основним законом частотного регулювання є закон Костенко

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \cdot \sqrt{\frac{M'_c}{M_c}},$$

де M_c і M'_c – статичні моменти опору відповідні швидкості двигуна при частотах f_1 та f'_1 , а U_1 і U'_1 – відповідні цим частотам напруги.

У відносних одиницях цей закон має вигляд:

$$V_1 = \varphi_1 \cdot \sqrt{\mu_c},$$

де $V_1 = \frac{U'_1}{U_1}; \varphi_1 = \frac{f'_1}{f_1}; \mu_c = \frac{M'_c}{M_c}$.

З нього випливає, що закон зміни напруги визначається не тільки частотою джерела живлення, але і характером зміни моменту опору механізму на валу двигуна при зміні кутової швидкості. Відповідно до формули Бланка

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^x$$

або в відносних одиницях

$$\mu_c = \mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot v^x = \mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot \varphi^x,$$

так як

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{\rho_{II}}; \quad \omega_H = \frac{2\pi f_{H1}}{\rho_{II}} \quad \text{і} \quad \frac{\omega}{\omega_H} = v = \frac{2\pi f_1}{\rho_{II}} \cdot \frac{\rho_{II}}{2\pi f_{H1}} = \frac{f_1}{f_{H1}} = \varphi_1.$$

Основний закон тепер можна представити у вигляді:

$$V_1 = \varphi_1 \cdot \sqrt{\mu_c} = \varphi_1 \cdot \sqrt{\mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot \varphi_1^x}.$$

При постійному моменті на валу двигуна M_c , отже і μ_c , не залежить від швидкості, а значить і частоти. Тому $x = 0$ і

$$V_1 = \varphi_1 \cdot \sqrt{\mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot \varphi_1^0} = \varphi_1 \quad \text{або} \quad \frac{V_1}{\varphi_1} = const, \quad \frac{U_1}{f_1} = const.$$

Отриманий закон – це закон пропорційного управління. Механічні характеристики двигуна при цьому законі зображені на рис.25.1.

Жорсткість характеристик зберігається порівняно високою. Однак при значному зниженні чистоти (нижче $0,5f_{1H}$) зменшується критичний момент, отже переважувальна здатність двигуна.

Пояснюється це падінням напруги на активному опорі r_1 статора, в результаті чого до намагнічуючого кола двигуна підводиться тим менша напруга, чим менша частота, що, в свою чергу зменшує магнітний потік, від

величини якого залежить $M_{кр}$. Плавне регулювання до $f_1 = 0$ при цьому законі неможливо. Неможливо також забезпечити сталу роботу двигуна при $M_c = const$ в широкому діапазоні регулювання частоти.

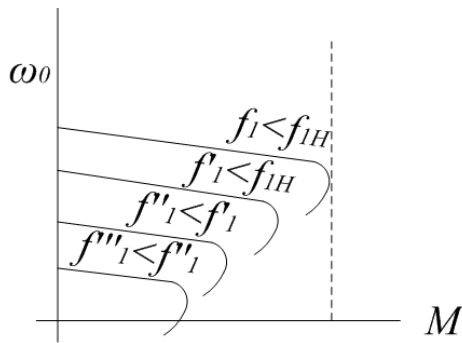


Рис.25.2.

Закон пропорційного регулювання доцільний тільки для великих двигунів, у який r_1 малий, а для малопотужних двигунів він малоефективний, тому що вже при $\phi_1 < 0,5$ перевантажувальна здатність їх помітно знижується (у них великий r_1). Втрати в двигуні більші, ніж при основному законі.

При ідеальному вентиляторному моменті опору $x = 2, \mu_0 = 0$ і

$$V_1 = \phi_1 \cdot \sqrt{0 + (1 - 0) \cdot \phi_1^2} = \phi_1 \sqrt{\phi_1^2} \text{ або } \frac{V_1}{\phi_1^2} = const .$$

Механічні характеристики при цьому законі зображені на рис.25.2.

При постійній потужності статичного навантаження $P_c = const$

$$M_c = \frac{P_c}{\omega} = \frac{M_H \omega_H}{\omega} \text{ або } \mu_c = \frac{1}{\phi_1} .$$

В цьому випадку нехтуючи величиною $\mu_0 x = -1$ і закон управління має вигляд або.

Механічні характеристики при цьому законі зображені на рис.25.2.

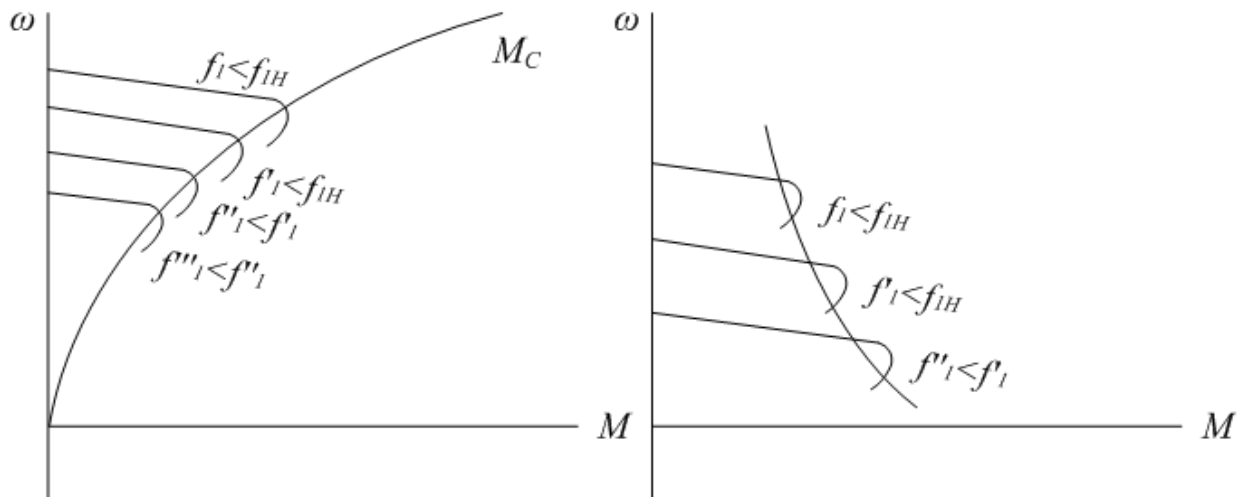


Рис.25.2.

Перераховані закони легко реалізуються в розімкнутих системах електроприводу, тому що напругу тут потрібно змінити тільки в функції частоти. Але змінювати напругу не тільки в функції частоти, але ще і в функції напруги, можливо тільки в замкнутих системах електроприводу, що містять зворотні зв'язки. У цьому випадку повинні використовуватися

закони, що забезпечують компенсацію падіння напруги на опорах обмоток статора і ротора двигуна, тому що падіння напруги залежить від навантаження. Тобто закони, що дозволяють підтримувати постійними потокозчеплення статора, ротора і взаємної індукції.

Тому напругу, що підводиться до статора і зміну частоти (навіть при її сталості) необхідно регулювати таким чином, щоб компенсувати падіння напруги на всіх елементах схеми заміщення АД, які є принципово важливими з точки зору передачі електромагнітної потужності. Цим самим можна забезпечити сталість потокозчеплення ψ , ψ_{12} і ψ_2 .

25.2. Система ПЧ-АД з електромашинним і статичним перетворювачем частоти і основні техніко-економічні показники.

25.1. Загальні положення.

У разі електромашинного перетворювача частоти асинхронні двигуни отримують живлення від синхронного генератора (СГ), що приводиться в обертання ДПС незалежного збудження, який, у свою чергу, отримує живлення від ТП або генератора постійного струму незалежного збудження. Як електромашинні перетворювачі частоти застосовуються і асинхронні перетворювачі, що обертаються асинхронним двигуном, який в ряді випадків поєднаний з перетворювачем в одному корпусі (для живлення електропил в лісовій промисловості).

В якості прикладу на рис.25.3. зображена схема одночасного частотного регулювання асинхронного ряду короткозамкнених АД, які отримують живлення від СГ, швидкість якого, отже, частота вихідної напруги регулюється по системі ТП-Д.

Така схема застосовується в тих випадках, коли потрібно одночасно синхронно змінювати швидкість ряду короткозамкнених АД, а саме, для живлення рольгангів прокатного стану. У цій схемі забезпечується закон

пропорційного регулювання, тобто $\frac{U_1}{f_1} = const$.

Управління і регулювання швидкості ведеться в цій схемі по двох каналах: канал управління частотою, що впливає на швидкість СГ і канал керування напругою, що впливає на збудження СГ. Перший канал має структуру системи ТП-Д і володіє значною інерційністю, зумовленою механічною інерцією агрегату (ДПС-СГ). Другий канал також інерційний у зв'язку з наявністю електромагнітної інерції кола збудження СГ. Регулювання напруги на статорах АД здійснюється зміною потоку збудження СГ, а регулювання напруги – зміною швидкості обертання якоря СГ.

Більш досконалими є системи зі статичними перетворювачами частоти. У цих системах в самому перетворювачі два ступені перетворення енергії – ступінь перетворення змінного струму в постійний і ступінь інвертування. Ці дві ступені в самостійному вигляді присутні в ПЧ з ланкою постійного струму (рис. 25.4.), а в НПЧ функції випрямлення та інвертування суміщені в

реверсивному пере-творювачі постійного струму, випрямлена напруга якого змінюється системою управління. Принципова схема електроприводу з НПЧ зображена на рис.25.4,б.

Відомо, що ТПЧ може володіти або властивостями джерела напруги (АН), або джерела струму (РТА). У першому випадку перетворювач має канал управління напругою і канал управління частотою. У другому випадку ТПЧ крім каналу управління частотою має канал керування струмом. Канал управління частотою можна вважати практично безінерційним. Канал управління напругою або струмом впливає на УВ і його швидкодія визначається швидкодією випрямляча.

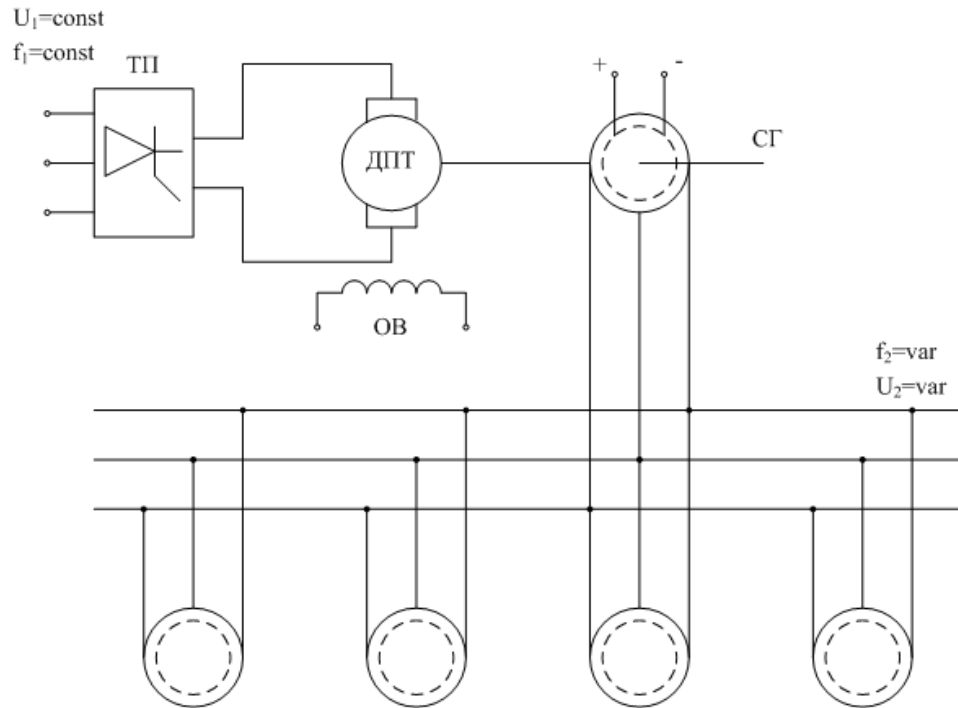


Рис.25.3.

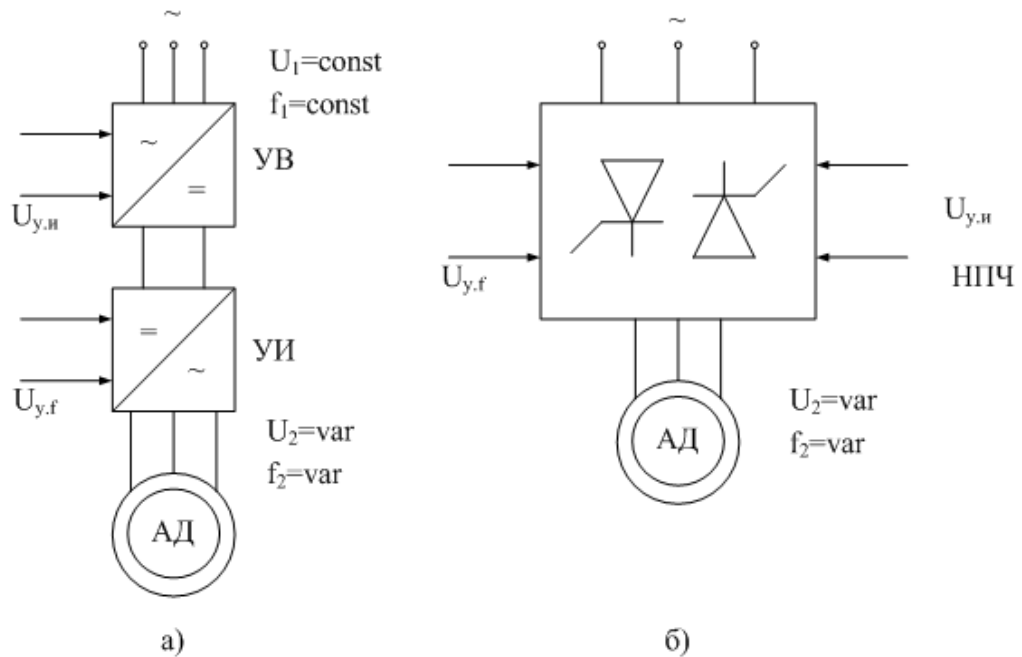


Рис.25.4.

Регулювання вихідної напруги ТПЧ здійснюється впливом на УВ шляхом зміни кута α , а частоту напруги регулювання шляхом зміни тривалості провідного стану тиристорів керованого інвертора.

Динамічні властивості системи ПЧ-АД як об'єкта управління гірші, ніж властивості регульованих електроприводів постійного струму в зв'язку з відсутністю незалежного каналу регулювання магнітного потоку, аналогічного обмотці збудження ДНЗ. Так, при живленні АД від АН потокозчеплення Ψ_1 , Ψ_{12} , і Ψ_2 складно залежать від U , f , і S_a , що було видно під час розгляду питання про статичні характеристики АД при частотному управлінні.

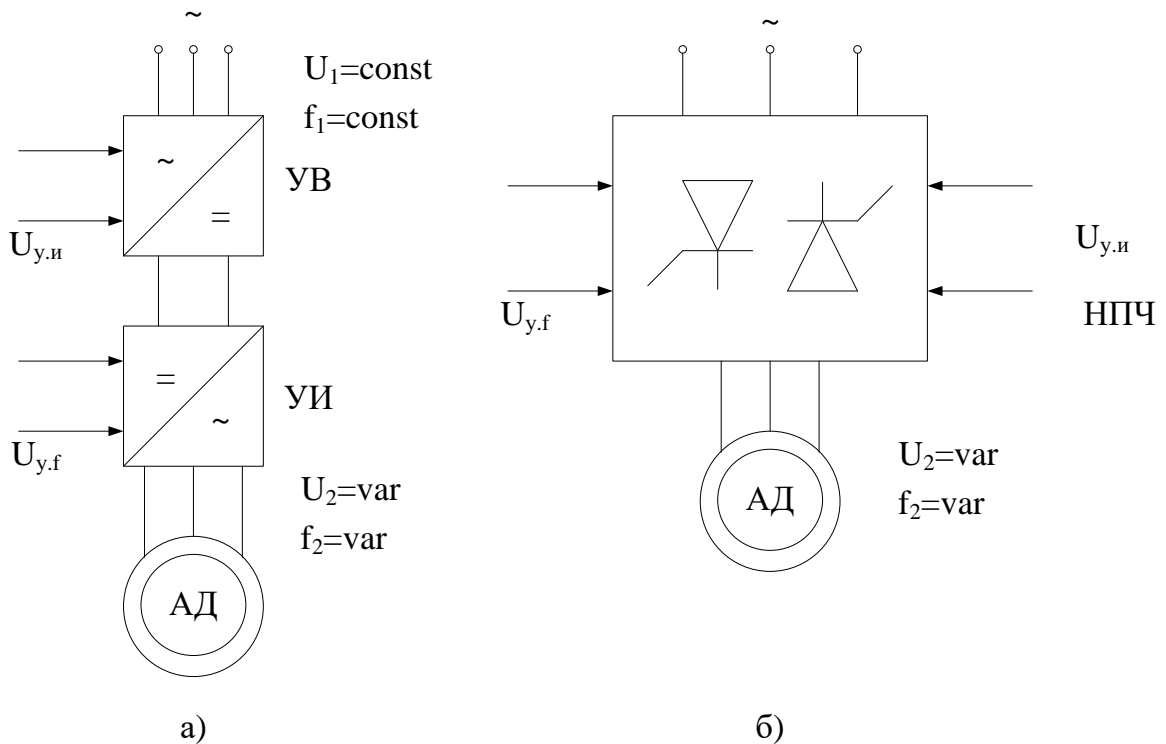


Рис.25.5.

ККД системи ПЧ-АД з тиристорним перетворювачем, які мають ланка постійного струму, трохи нижчі, ніж в системі ТП-Д з-за подвійного перетворення енергії. Коефіцієнт потужності близький до значення цього коефіцієнта системи ТП-Д, якщо в якості ланки постійного струму використовується ТП. Він досить високий тільки в системах з некерованим випрямлячем.

Найбільш близькими до системи ТП-Д по габаритних показниках володіє система з НПЧ.

Лекція №26. Нагрів електродвигунів та основи їх вибору потужності.

За умовами нагрівання розрізняють вісім режимів роботи електродвигунів, що позначаються S1, S2, ... S8.

S1. Тривалий номінальний режим.

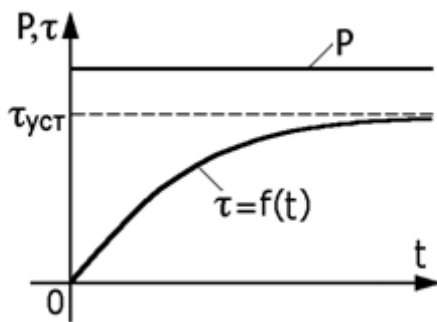


Рис.26.1.

Характеризується тим, що за час роботи з номінальним навантаженням температура перегріву двигуна τ досягає усталеного значення $\tau_{уст}$. Під температурою перегріву розуміють різницю $\tau = t^\circ - t_{навк.сер}$. Ідеалізована навантажувальна діаграма $P = f(t)$ і крива $\tau = f(t)$ зображені на рис.26.1. В такому режимі працює електропривод таких механізмів, як вентилятори, насоси, транспортери.

S2. Номінальний короткочасний режим.

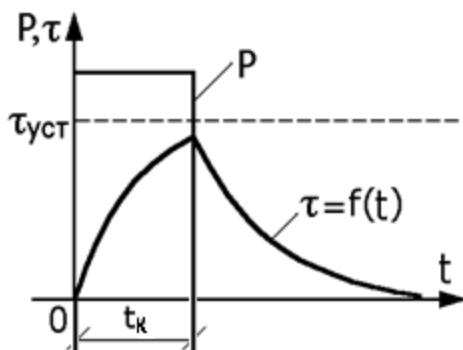


Рис.26.2.

Цей режим характеризується тим, що за час короткочасної роботи t_k з номінальним навантаженням температура перегріву двигуна не досягає усталеного значення, а за час вимкненого стану двигун встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

Ідеалізована навантажувальна діаграма електроприводу і крива зміни температури перегріву представлені на рис.26.2. В такому режимі працює, наприклад, електропривод механізмів з моментом опору, обумовленим в'язким тертям. Тривалість короткочасної роботи стандартизована і становить 15, 30, 60, 90 хвилин.

S3. Номінальний повторно-короткочасний режим.

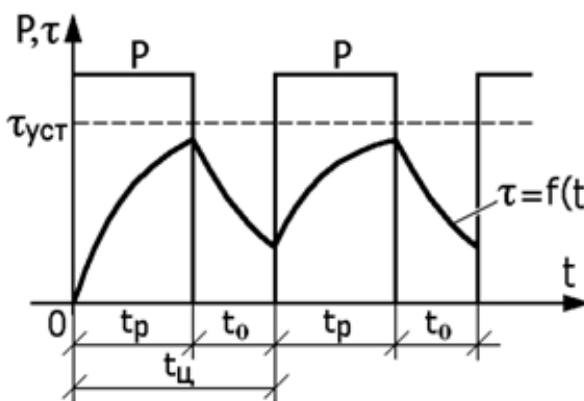


Рис.26.3.

Характеризується тим, що за час роботи з номінальним навантаженням температура перегріву не досягає усталеного значення, а за час паузи, двигун не встигає охолонути до температури навколишнього середовища. Ідеалізована навантажувальна діаграма і крива $\tau = f(t)$ зображені на рис.26.3. Для характеристики цього режиму прийнятий символ ТВ% (тривалість включення).

$$ТВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\%$$

Використовується і поняття відносної тривалості вмикання ϵ

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0} = \frac{t_p}{t_u}$$

Час циклу не повинна перевищувати 10 хвилин. Стандартні значення ПВ%: 15%, 25%, 110%, 60%.

S4. Номінальний повторно-короткочасний режим з частими пусками.

Характеризується тим же, що і режим S3, але в цьому режимі на нагрівання двигуна істотно впливають пускові втрати. Ідеалізована навантажувальна діаграма і крива $\tau = f(t)$ зображені на рис.26.4.

$$TB\% = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_n + t_p}{t_u} \cdot 100\%$$

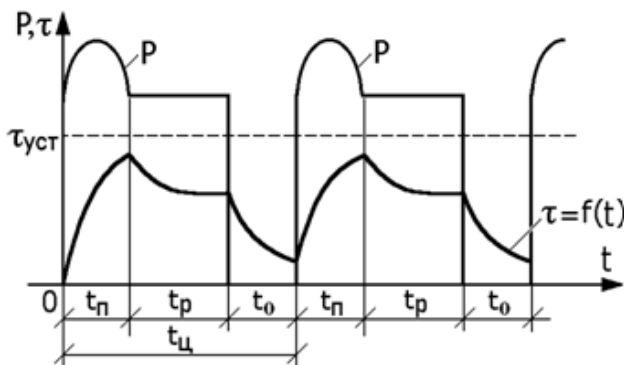


Рис.26.4.

Нормовані значення ТВ% ті ж, що і для режиму S3. Стандартне число пусків в годину 30, 60, 120, 240. Для цього режиму використовується також такий показник, як коефіцієнт інерції, що представляє відношення сумарного приведенного до вала двигуна моменту інерції всієї системи електроприводу, до моменту інерції ротора або якоря самого двигуна. Нормовані значення коефіцієнта інерції 1,2; 1,6; 2,5; 11; 6,3; 10.

S5. Номінальний повторно-короткочасний режим з частими пусками і електричним гальмуванням.

Цей режим також характеризується тим же, що і режим S3, але в цьому режимі на нагріванні двигуна сильно позначаються втрати при пуску і гальмуванні.

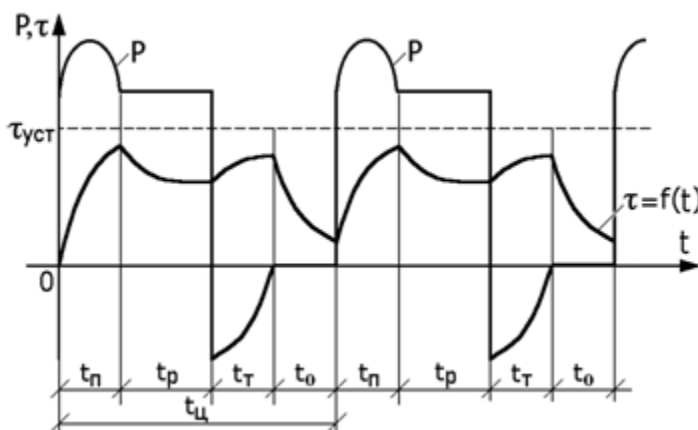


Рис.26.5.

Ідеалізована навантажувальна діаграма і крива $\tau(t)$ приведена на рис. 26.5.

Нормоване значення ТВ% і число пусків такі ж, що і для режиму S4. Значення коефіцієнта інерції F_y 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 11.

$$TB\% = \frac{t_n + t_p + t_m}{t_n + t_p + t_m + t_0} \cdot 100\%$$

S6. Номінальний повторно-короточасний режим.

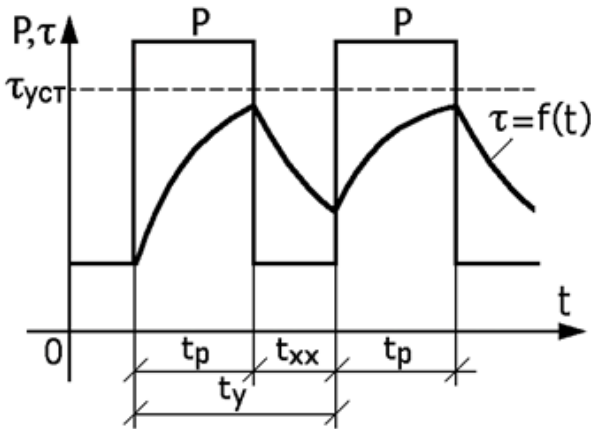


Рис.26.6.

Характеризується тим, що за час роботи з номінальним навантаженням температура перегріву двигуна не досягає усталеного значення, а за час холостого ходу він не охолоджується до температури навколишнього середовища. Для позначення цього режиму використовується символ $TH\%$ (тривалість навантаження). Відповідний графік $P = f(t)$ і $\tau = f(t)$ зображені на рис.26.6.

$$TH\% = \frac{t_p}{t_p + t_{xx}} \cdot 100\% .$$

Тривалість циклу не повинна перевищувати 10 хвилин. Нормовані значення $TH\% = 15, 25, 110, 60\%$.

S7. Номінальний перемежовується режим з частими реверсами.

Характеризується тим, що періоди незмінною номінального навантаження чергуються з періодами реверсу, причому періоди навантаження не настільки тривалі, щоб температура перегріву могли досягти сталих значень.

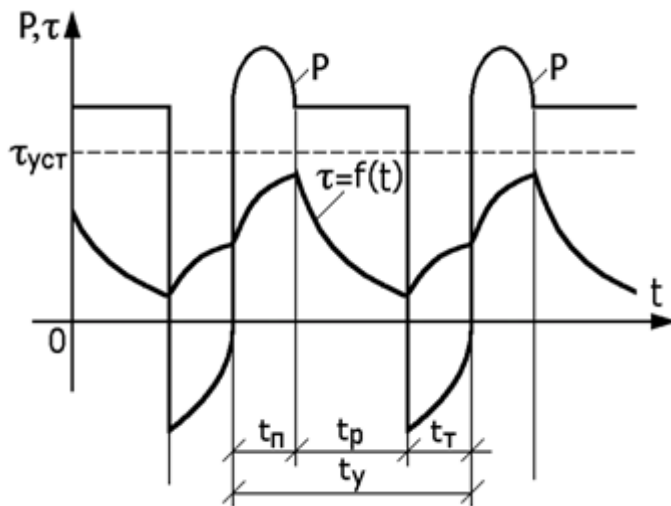


Рис.26.7.

В цьому режимі втрати при реверсі істотно впливають на нагрів двигуна, що працює без зупинки.

Число реверсів в годину 30, 60, 120, 240. Коефіцієнтом інерції такої ж, що і в режимі S5. Ідеалізована навантажувальна діаграма і крива $\tau(t)$ приведена на рис. 26.7.

S8. Номінальний різкозмінний режим з двома і більше швидкостями.

Даний режим характеризується числом циклів в годину, коефіцієнтом інерції і тривалістю навантаження на окремих ділянках роботи.

$$TH_1\% = \frac{t_n + t_{p1}}{t_y} \cdot 100\%; \quad TH_2\% = \frac{t_{m1} + t_{p2}}{t_y} \cdot 100\%; \quad TH_3\% = \frac{t_{m1} + t_{p3}}{t_y} \cdot 100\%.$$

Нормовані значення числа циклів у годину час: 30, 60; 120, 2110.
Коефіцієнт інерції: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 11.

Це режим, при якому періоди з одним навантаженням і відповідною йому кутовою швидкістю чергуються з періодами роботи з іншим навантаженням і відповідною йому кутовою швидкістю.

Втрати енергії при переході з однієї швидкості на іншу в цьому випадку істотно впливають на нагрів двигуна, але періоди навантаження на кожній з кутових швидкостей не настільки тривалі, щоб температура перегріву двигуна могла досягти сталого значення. Ідеалізована навантажувальна діаграма і крива $\tau(t)$ приведена на рис.26.7.

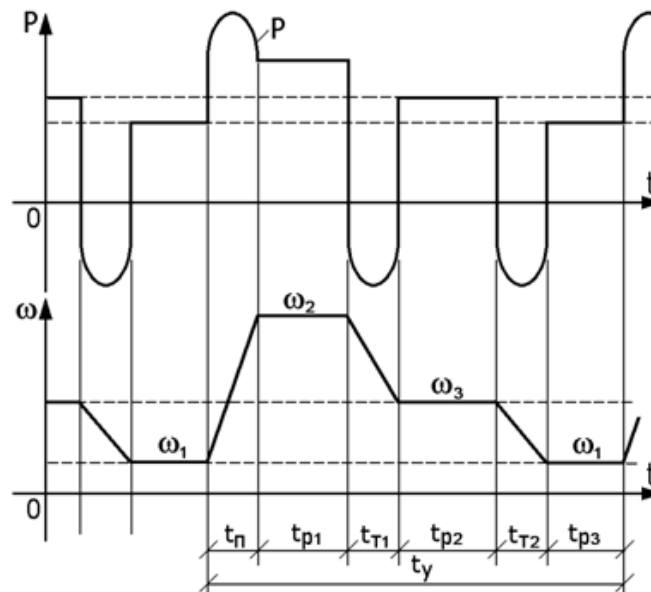


Рис.26.8.

Лекція №27. Нагрівання і охолодження двигунів при тривалому режимі роботи з постійним навантаженням.

27.1. Загальні положення.

Умови нагрівання окремих частин машини, що мають ізоляцію, різні. Більшому нагрівання піддаються ті частини обмотки, які знаходяться у внутрішніх областях машини. Виділення тепла і напрямок теплових потоків усередині її змінюється при переході від режиму навантаження до режиму холостого ходу, оскільки двигун є неоднорідним тілом. Ці обставини дуже ускладнюють теплові розрахунки, якщо не прийняти деяких припущень. Тому двигун вважають тілом однорідним з нескінченною теплопровідністю, передача тепла в ньому і навколишнє середовище відбувається головним чином за рахунок теплопровідності.

Для отримання закону зміни температури перегріву двигуна, складемо рівнянням теплового балансу.

Позначимо: Q – кількість тепла, що виділяється в двигуні в одиницю часу; A - тепловіддача в навколишнє середовище, тобто кількість тепла, що віддається двигуном навколишнє середовище; C - теплоємність двигуна як

однорідного тіла, тобто кількість тепла, необхідне для підвищення його температури на 1°C .

Рівняння теплового балансу має вигляд

$$Q \cdot dt = A \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\tau.$$

Разділивши змінні, знаходимо:

$$(Q - A\tau)dt = C \cdot d\tau; \quad dt = \frac{C \cdot d\tau}{Q - A\tau}; \quad t = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau) + K.$$

При $t = 0$ в загальному двигун міг мати перегрів τ_0 ,

$$0 = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_0) + K; \quad K = \frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_0);$$

Звідси

$$t = -\frac{C}{A} [\ln(Q - A\tau) - \ln(Q - A\tau_0)] = -\frac{C}{A} \ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0};$$

$$e^{-\frac{A}{C}t} = \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0}; \quad \tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{A}{C}t} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{A}{C}t} \text{ або}$$

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_H}},$$

де $\tau_y = \frac{Q}{A}$ - встановлена температура перегріву, яке досягається при $t = \infty$,

$T_H = \frac{C}{A}$ - постійна нагріву, тобто час, протягом якого двигун нагрівся б до сталої температури τ_y , якби не було тепловіддачі в навколишнє середовище. Дійсно, при $A = 0$ рівняння теплового балансу набуває вигляду:

$$Q \cdot dt = C \cdot d\tau,$$

звідки

$$t = \frac{C}{Q} \cdot \tau = \frac{C}{Q} \cdot \tau_y = \frac{C}{Q} \cdot \frac{Q}{A} = \frac{C}{A} = T_H.$$

Якщо двигун нагрівається від температури навколишнього середовища, тобто $\tau_0=0$, то закон зміни τ такий

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right).$$

На основі цього і попереднього рівнянь на рис.3.1 побудовані відповідні криві.

У реальних умовах, тобто при наявності тепловіддачі температура пере-гріву двигуна за час T_H досягне лише значення $\tau=0,632\tau_y$. Для визначення T_H , якщо відома крива $\tau = f(t)$, на цій кривій знаходиться точка, відповідна $\tau = 0,632\tau_y$, з якої проводиться перпендикуляр на вісь абсцис (див. рис.27.2). Величину T_H можна знайти графічно провівши дотичну до експоненти $\tau = f(t)$ в будь-якій точці, наприклад, з початку координат, що так само показано на рис.27.2.

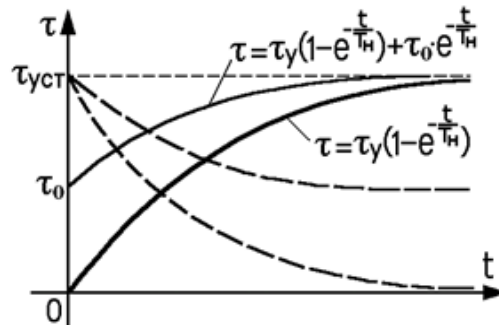


Рис.27.1.

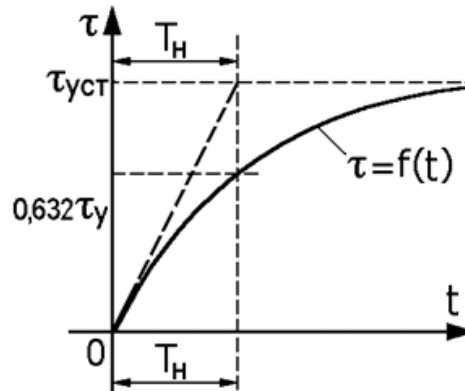


Рис.27.2.

Реальна крива нагріву відрізняється від теоретичної, тобто експоненти, тим, що на початку процесу нагрівання двигун нагрівається швидше, ніж за законом експоненти. І лише починаючи з $\tau=(0,5\div 0,6)\tau_y$ дійсна крива наближається до теоретичної. Тому при необхідності визначення T_H за реальною кривою проводяться дотичні до неї на початку координат, при $\tau=0,5\tau_y$ і $\tau=(0,8\div 0,9)\tau_y$. T_H знаходиться як середнє значення з трьох, отриманих методом дотичних.

Для отримання залежності $\tau=f(t)$ при охолодженні двигуна від τ_{y1} до τ_{y2} , можна скористатися раніше отриманим рівнянням, підставивши в нього замість $\tau_y-\tau_{y2}$, а замість $\tau_0-\tau_1$. Тоді закон зміни τ при охолодженні двигуна запишеться у вигляді

$$\tau = \tau_{y2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{y1} \cdot e^{-\frac{t}{T_H}} .$$

При охолодженні до температури навколишнього середовища $\tau_{y2} = 0$ і рівняння набуває вигляду

$$\tau = \tau_{y1} \cdot e^{-\frac{t}{T_H}}$$

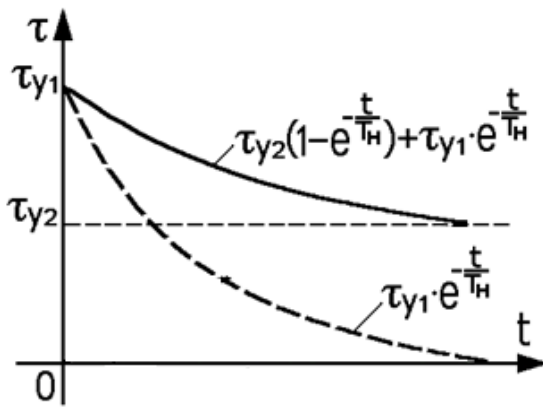


Рис.27.2.

Наведені рівняння справедливі лише в разі, якщо двигун охолоджується стороннім вентилятором, тобто має незалежне охолодження. Якщо ж він охолоджується природним шляхом в рівняння необхідно підставляти замість T_H величину T_0 , яка в 2-3 рази більша за T_H .

Чисельне значення постійної T_H 15-20 хв для двигунів невеликої потужності. Для великих двигунів T_H може бути значно більше 1 години.

Слід зазначити, що T_H не залежить від навантаження двигуна. При різних навантаженнях його нагрівання буде відбуватися за різними кривим (рис.27.2). Стала ж температура перегріву буде тим вищою, чим більше завантажений двигун, тому що більшому навантаженню відповідають великі втрати.

27.2. Нагрівання двигунів при короткочасному режимі роботи з постійним навантаженням.

Механізми, що працюють в короткочасному режимі випускається мало. Тому, найчастіше для роботи в короткочасному режимі доводиться використувати двигуни режиму S1. Але якщо такий двигун навантажити номінальною потужністю, то максимальна температура, яку він матиме в кінці робочого періоду, тобто в кінці часу t_k , буде менше $\tau_{доп}$. Отже, двигун буде недо-використаний по нагріванню.

Для того, щоб він в тепловому відношенні був використаний повністю, його потрібно перевантажити так, щоб за час t_k він був нагрітий до $\tau_{доп}$. Інакше кажучи, можна взяти двигун меншої потужності, ніж потрібно для короткочасної роботи (наприклад, потужністю 10 кВт замість 15 кВт, а навантажити потужністю 15 кВт).

Для кількісної оцінки перевантаження використовуються коефіцієнти термічного (теплого) і механічного перевантаження. У тривалому режимі з номінальним навантаженням температура перегріву асимптотично наближається до гранично допустимої для даного класу ізоляції.

$$\tau_{уст} = \tau_{доп} = \frac{Q_{\infty}}{A} = \frac{\Delta P_{\infty}}{A},$$

де $Q_{\infty} = \Delta P_{\infty}$ - втрати при довготривалому режимі з номінальним навантаженням.

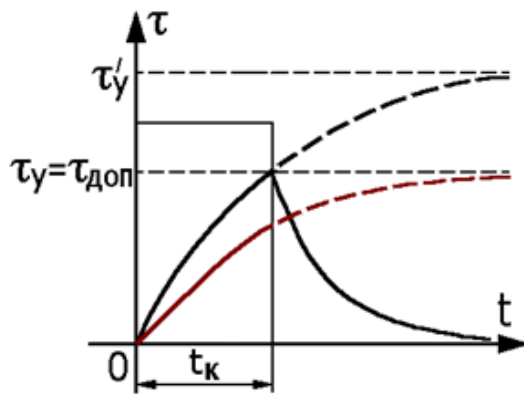


Рис.27.3.

При короткочасній роботі двигуна режиму S1 з перевантаженням ця ж температура буде досягнута за час t_k (див. рис.27.3). Оскільки за цей час навантаження залишається постійною, то t_k і коефіцієнт термічного перевантаження δ можна знайти з рівняння нагріву

$$\tau_{уст} = \tau_{доп} = \frac{\Delta P_k}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right) = \tau'_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right)$$

де ΔP_k - допустимі втрати при короткочасному режимі двигуна режиму S1, при короткочасній роботі з перевантаженням.

Прирівнявши ці рівності і перетворивши, маємо

$$\frac{\Delta P_{\infty}}{A} = \frac{\Delta P_k}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}} \right) = \frac{\Delta P_k}{A} - \frac{\Delta P_k}{A} \cdot e^{-\frac{t_k}{T_H}}$$

Звідси

$$e^{-\frac{t_k}{T_H}} = \frac{\Delta P_k - \Delta P_{\infty}}{\Delta P_k}; \quad t_k = T_H \cdot \ln \frac{\Delta P_k}{\Delta P_k - \Delta P_{\infty}} = T_H \cdot \ln \frac{\delta}{\delta - 1},$$

де

$$\delta = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_{\infty}} = \frac{Q_k}{Q_{\infty}} = \frac{\tau'_{уст}}{\tau_{уст}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_k}{T_H}}} - \text{коефіцієнт термічного наванта-$$

ження.

За величиною δ може бути визначений і коефіцієнт механічної перевантаження двигуна X , який представляє відношення допустимого за умовами нагріву моменту $M^{(k)}$ при короткочасному навантаженні P_k до номінального моменту $M^{(H)}$ при тривалій роботі з номінальним навантаженням P_H , а також ступінь перевантаження двигуна по струму

$$X = \frac{M^{(k)}}{M^{(H)}} \text{ або } X = \frac{I_k}{I_H}. \text{ Для цього у виразі для } \delta \text{ розділимо втрати на постійні}$$

K і змінні V

$$\delta = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\infty}} = \frac{K + V_H \left(\frac{I_{\kappa}}{I_H} \right)^2}{K + V_H} = \frac{a + x^2}{a + 1},$$

де $a = \frac{\kappa}{V_H}$ - коефіцієнт втрат; V_H - номінальні змінні втрати.

Звідси можна знайти допустиму тривалість короткочасної роботи двигуна режиму S1 при заданій ступеня перевантаження двигуна по струму або потужності і допустиму перевантаження двигуна по струму при заданій тривалості t_{κ} .

$$t_{\kappa} = T_H \ln \frac{a + x^2}{x^2 - 1}; \quad x = \sqrt{\frac{1 + a \cdot e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa}}{T_H}}}} \quad \text{або} \quad x = \sqrt{\delta + a(\delta - 1)} = \sqrt{\delta(a + 1) - a}.$$

Якщо знехтувати постійними втратами, то $x = \sqrt{\delta}$.

При необхідності визначення T_H , і знаючи каталожні дані двигуна короткочасного режиму її можна знайти з виразу для t_{κ} :

$$T_H = \frac{t_{\kappa}}{\ln \frac{\delta}{\delta - 1}} = \frac{t_{\kappa}}{\ln \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\kappa} - \Delta P_{\infty}}} = \frac{t_{\kappa}}{\ln \frac{P_{\kappa} \left(\frac{1}{\eta_{\kappa}} - 1 \right)}{P_{\kappa} \left(\frac{1}{\eta_{\kappa}} - 1 \right) - P_H \left(\frac{1}{\eta_H} - 1 \right)}},$$

де η_{κ} и η_H - ККД двигуна при роботі в короткочасному режимі з перевантаженням і номінальний ККД.

Визначимо, тепер, допустиме навантаження двигуна короткочасного режиму по моменту або потужності якщо дійсне час короткочасної роботи $t_{\kappa, \text{дейс}}$ відрізняється від каталожного $t_{\kappa, \text{кат}}$. При цьому вважаємо, що за час $t_{\kappa, \text{кат}}$ і навантаженні відмінною від номінальної, двигун нагріється до такої ж допустимої температури, що і за час $t_{\kappa, \text{кат}}$ і номінальному навантаженні.

$$\tau_{\text{дон}} = \frac{\Delta P_H}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\kappa, \text{кат}}}{T_H}} \right) = \frac{\Delta P_{\kappa}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\kappa, \text{дейс}}}{T_H}} \right),$$

$$\text{звідки} \quad \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_H} = \frac{1 - e^{-\frac{t_{\kappa, \text{кат}}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{\kappa, \text{дейс}}}{T_H}}}.$$

$$\text{Так як } \Delta P_H = \kappa + V_H, \text{ и } \Delta P_{\kappa} = \kappa + V_H \cdot x^2 = \kappa + V_H \cdot \left(\frac{M_{\text{дон}}}{M_H} \right)^2 \text{ то}$$

$$M_{дон} = M_H \sqrt{(a+1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{к.кат}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{к.действ}}{T_H}}} - a} \quad \text{або} \quad P_{дон} = P_H \sqrt{(a+1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{к.кат}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{к.действ}}{T_H}}} - a}.$$

Відзначимо, що використовувати двигуни тривалого режиму для роботи в короткочасному режимі недоцільно.

Пояснюється це тим, що якщо прагнути повністю використовувати їх по нагріванню в короткочасному режимі, то їх навантаження повинне бути більше номінального. Однак, перевантажувальна здатність, яка визначається електричними і механічними властивостями машини, зменшується, тому що ці властивості не залежать від теплового режиму двигуна. Крім того, якщо час t_k невеликий, то для повного використання двигуна по нагріванню необхідно значно перевантажити його по моменту.

Інакше кажучи, оскільки в режимі S2 двигун, призначений для тривалого режиму, може працювати з більшим навантаженням, ніж в режимі S1, то можна вважати, що його потужність в короткочасному режимі підвищується, тобто $P_{к.ном} > P_{осн.ном}$. Максимальне ж значення струму і моменту при короткочасному перевантаженні не залежить від теплового режиму.

Тому перевантажувальна здатність двигуна режиму S1 при роботі в режимі S2 буде нижчою, ніж в режимі S1, тобто

$$\lambda_{I(k)} = \frac{I_{макс}}{I_{к.ном}} < \lambda_{I(\infty)} = \frac{I_{макс}}{I_{осн.ном}}.$$

Якщо зобразити криві залежності коефіцієнта перевантаження λ по потужності (моменту) від відношення $\frac{t_k}{T_H}$, то виявляється, що вже при $\frac{t_k}{T_H} > 0,35$ $\lambda > 2,5$ (рис.27.4), тобто для того, щоб двигун тривалого режиму повністю використовувався в тепловому відношенні при $\frac{t_k}{T_H} < 0,35$, його потрібно перевантажити по потужності (моменту) більше, ніж в 2,5 рази. Однак не всі двигуни нормального виконання, призначені для тривалого режиму, допускають таке перевантаження.

Тому потужність двигуна довелося б вибирати не з умов нагрівання, а за умовами допустимого перевантаження по моменту (потужності), що веде до його недовикористання по нагріванню.

Крім того, не всі частини двигуна мають однакові T_H . При тривалому режимі це не суттєво.

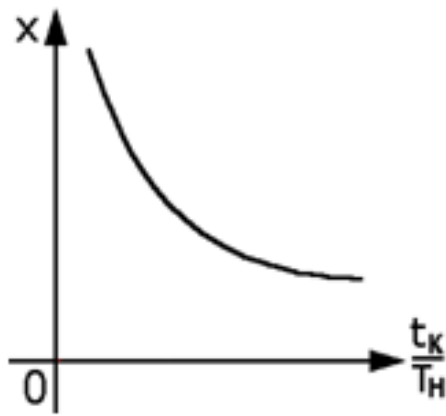


Рис.27.4.

У короткочасному режимі в разі двигуна постійного струму колектор і обмотки збудження обмежують навантаження, в той час як якір допускає подальше її підвищення. У двигунах тривалого режиму температура всіх частин досягає сталого значення протягом часу $> (4-5) T_H$. При роботі такого двигуна в режимі S2 температура перегріву не досягне усталеного значення, причому до кінця робочого періоду нагрівання окремих частин машини може бути різним.

Наприклад, на рис.27.5 наведені криві нагріву обмотки збудження (1), колектора (2) і обмотки якоря (3).

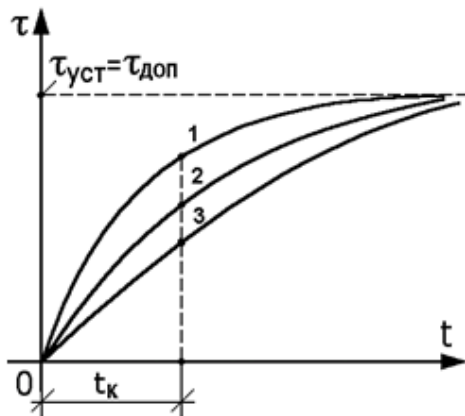


Рис.27.5.

Видно, що допустима тривалість короткочасної роботи визначається умовами нагріву елемента машини, що має найменшу T_H (в даному випадку обмотки збудження). З цієї причини в двигунах, призначених для коротко-часної роботи, при їх розрахунках втрати в окремих елементах перерозподіляють таким чином, щоб до кінця часу t_k температура перегріву всіх елементів машини досягала гранично-допустимого значення.

Недоцільність використання двигунів режиму S1 в режимі S2 визначається ще й енергетичними міркуваннями. Двигуни режиму S1 розраховуються і конструюються таким чином, щоб максимальний ККД був при номінальному режимі.

Відомо, що максимальному ККД відповідає умова рівності змінних і постійних втрат. При роботі ж цих двигунів в режимі S2 з перевантаженням змінні втрати будуть більші постійних і ККД буде меншим.

Недоцільно також використовувати двигуни режиму S2 для роботи в тривалому режимі, тому що вони мають підвищені постійні втрати і будуть сильно грітися. В окремих випадках при наявності великих постійних втрат вони не можуть працювати тривалий час навіть вхолосту.

Двигуни, призначені для короткочасної роботи, розраховуються інакше, ніж двигуни режиму S1. Для них характерна підвищена перевантажувальна здатність, а якщо це машини постійного струму, то вони мають посилену конструкцію колектора і обмотки збудження.

Лекція №28. Попередній вибір двигунів за потужністю.

28.1. Загальні положення.

Для правильного вибору двигуна необхідно мати його навантажувальну діаграму. Але на початковій стадії проектування електроприводу проектуваль-нику відома лише навантажувальна діаграма робочої машини та її тахограма. Для розрахунку та побудови навантажувальної діаграми двигуна необхідно зробити розрахунок його перехідних процесів, що вимагає знання сумарного приведенного моменту інерції всієї системи привід – робоча машина.

Момент інерції системи в основному визначається моментом інерції самого двигуна. Тому, поки двигун не вибраний, не можна приступити до розрахунку перехідних процесів, отже, не можна побудувати і навантажувальну діаграму електропривода. У зв'язку з цим доводиться вибирати двигун, попередньо виходячи з навантажувальної діаграми робочої машини.

Двигуну в процесі роботи доводиться долати в перехідних режимах не тільки статичне, а й динамічне навантаження, тому що статичне навантаження при роботі робочої машини не залишається постійним. Тому середньоквадратичне значення моменту двигуна виходить більше, ніж середнє значення статичного моменту опору, і при попередньому виборі його номінальний момент приймається більшим, ніж середнє значення M_c . Зазвичай рекомендується приймати, $M_H = (1,1 \div 1,3)M_{c.cp}$,

$$\text{де } M_{c.cp} = \frac{\sum_0^{t_u} M_{cx} \cdot t_x}{t_u}, \quad t_x - \text{тривалість циклу.}$$

Можуть бути використані і такі формули для орієнтованого визначення M_H двигуна.

$$M_H = \frac{M_{c.cp} + M_{c.кв}}{2} \quad \text{або} \quad M_H = \sqrt{M_{c.cp} \cdot M_{c.кв}}$$

де $M_{c.кв}$ - середньоквадратичне значення статичного моменту опору, що визначається за навантажувальною діаграмою робочої машини.

По знайденому орієнтованому значенню M_H і основній швидкості, яка повинна бути задана, визначається необхідна номінальна потужність двигуна $P_H = M_H \cdot \omega_{оч}$ по каталогу вибирається двигун і розраховується момент інерції системи

$$J_{\Sigma} = \delta \cdot J_{об} + J_m \cdot \frac{1}{j_m^2}.$$

Далі проводиться розрахунок перехідних процесів і будується навантажувальна діаграма електроприводу $M = f(t)$ або $I = f(t)$.

Потім робиться перевірка обраного двигуна по перевантажувальній здатності $M_H \geq \frac{M'_{с.макс}}{\lambda_M}$.

Тут $M'_{с.макс}$ – приведений максимальний статичний момент опору; λ_M – каталожна перевантажувальна здатність двигуна. Після цього робиться перевірка двигуна по нагріванню (визначається $M_{доп}$ або $P_{доп}$).

28.2. Перевірка допустимого навантаження двигуна за методом середніх втрат

Сутність цього методу полягає у визначенні середніх втрат $\Delta P_{ср}$ в двигуні при заданому графіку навантаження і порівнянні їх з номінальними втратами попередньо обраного двигуна. При цьому передбачається, що при рівності $\Delta P_{ср} = \Delta P_H$ двигун буде працювати з допустимою для нього температурою, тому що

$$\tau_{доп} = \frac{Q_{ср}}{A} = \frac{Q_H}{A} = \frac{\Delta P_{ср}}{A} = \frac{\Delta P_H}{A}.$$

Розглянемо процес нагріву двигуна, що працює по деякому циклічному графіку (рис.28.1). Цей графік і подібні йому відповідає переміжному режиму S6. По закінченні великого числа циклів двигун досягне сталого теплового стану.

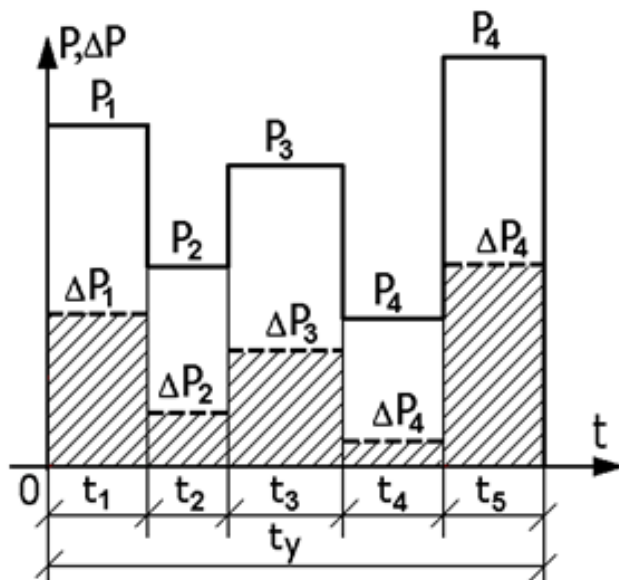


Рис.28.1.

При цьому температура нагріву ізоляції буде однаковою як на початку, так і в кінці циклу, а в проміжку буде змінюватися по сталому експоненціальному закону. При невеликій тривалості циклу в порівнянні з T_H відхилення температури за t_c від початкового і кінцевого значень буде невелика. Це дає підставу максимальним значенням температури перегріву вважати її значення на початку і в кінці циклу. Температура перегріву в кінці останньої ділянки циклу може бути отримана на основі запису ряду послідовних значень температур перегріву в кінці окремих ділянок циклу роботи:

$$\tau_{\kappa 1} = \frac{\Delta P_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_H}} \right) + \tau_{нач.ц} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_H}} ;$$

$$\tau_{\kappa 2} = \frac{\Delta P_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_H}} \right) + \tau_{\kappa 1} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_H}} ;$$

.....

$$\tau_{\kappa n} = \frac{\Delta P_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_H}} \right) + \tau_{\kappa(n-1)} \cdot e^{-\frac{t_n}{T_H}} .$$

Якщо в цій системі виключити значення температур перегріву в кінці кожної проміжної ділянки при $i < n$, то температура перегріву в кінці останньої ділянки циклу буде

$$\tau_{\kappa n} = \tau_{нач.у} \cdot e^{-\frac{t_y}{T_H}} + \frac{\Delta P_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_H}} \right) \cdot e^{-\frac{t_y - t_1}{T_H}} + \frac{\Delta P_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_H}} \right) \cdot e^{-\frac{t_y - (t_1 + t_2)}{T_H}} + \dots + \frac{\Delta P_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_H}} \right) \cdot e^0$$

Беручи до уваги рівність температур перегріву на початку і кінці циклу $\tau_{\kappa n} = \tau_n = \tau_{нач}$, можна записати

$$\tau_n \left(1 - e^{-\frac{t_y}{T_H}} \right) = \frac{\Delta P_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_H}} \right) \cdot e^{-\frac{t_y - t_1}{T_H}} + \frac{\Delta P_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_H}} \right) \cdot e^{-\frac{t_y - (t_1 + t_2)}{T_H}} + \dots + \frac{\Delta P_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_H}} \right) .$$

Виразивши τ_n через середні втрати $\tau_n = \frac{\Delta P_{cp}}{A}$, отримаємо

$$\frac{\Delta P_{cp}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_y}{T_H}} \right) = \frac{\Delta P_1}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_H}} \right) \cdot e^{-\frac{t_y - t_1}{T_H}} + \frac{\Delta P_2}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_H}} \right) \cdot e^{-\frac{t_y - (t_1 + t_2)}{T_H}} + \dots + \frac{\Delta P_n}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T_H}} \right) .$$

Це вираз говорить, що процес нагрівання двигуна при змінному навантаженні, можна замінити деяким режимом з постійним навантаженням, що створює те ж нагрівання. Для визначення ΔP_{cp} , що відповідають тривалому режиму з постійним навантаженням, розкладемо все експоненціальні функції в ряд Маклорена ($e^{-x} = 1 - \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \dots$).

Нехтуючи всіма членами ряду крім перших двох, отримаємо

$$\frac{\Delta P_{cp}}{A} \cdot \frac{t_y}{T_H} = \frac{\Delta P_1}{A} \cdot \frac{t_1}{T_H} + \frac{\Delta P_2}{A} \cdot \frac{t_2}{T_H} + \dots + \frac{\Delta P_n}{A} \cdot \frac{t_n}{T_H}.$$

Припускаючи, що двигун працює з постійною швидкістю, отже, незмінними A і T_H , отримаємо

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

Критерієм правильності вибору є $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n$.

У разі істотного розходження у величинах ΔP_{cp} і ΔP_n , необхідно вибрати двигун більший по потужності і виконати всі розрахунки заново.

Умова $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n$ справедлива лише у випадку, коли двигун повинен працювати при температурі навколишнього середовища $+110^\circ\text{C}$. Якщо вона відрізняється від $+110^\circ\text{C}$, умова правильності обраного двигуна буде такою:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n \frac{t_{\text{дон}}^\circ - t_{\text{окр.ср}}^\circ}{t_{\text{дон}}^\circ - 40^\circ\text{C}}.$$

Вираз для ΔP_{cp} справедливий для перевірки правильності вибору двигунів, що мають незалежну вентиляцію і з самовентиляцією і працюють з постійною швидкістю. Для двигунів з самовентиляцією і охолоджуваних природним шляхом, що працюють зі змінною швидкістю, у вираз для ΔP_{cp} необхідно внести поправки, що враховують погіршення умов охолодження при зміні швидкості і під час пауз. Внесення поправок зручно розглянути на прикладі роботи двигуна по трьохперіодній тахограмі (рис.28.2).

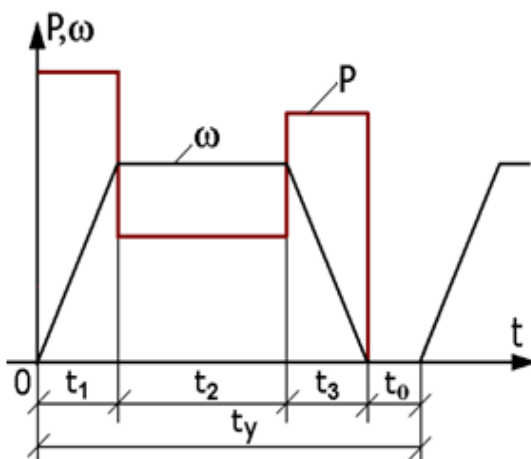


Рис.28.2.

При роботі двигуна з усталеною кутовою швидкістю кількість тепла $Q_{ном} = A \cdot \tau_{дон}$, що віддається в навколишнє середовище дорівнює $Q' = A_2 \cdot \tau_{дон} = \beta \cdot A \cdot \tau_{дон}$. Тут β - коефіцієнт, що враховує погіршення умов охолодження під час паузи. Під час перехідних процесів (пуск, гальмування, зміна швидкості) тепловіддача в навколишнє середовище приймається рівною

$$A_1 = \frac{A + A_2}{2} = \frac{A + \beta A}{2} = A \cdot \left(\frac{1 + \beta}{2} \right) = A \cdot \alpha$$

Для ДПС $\alpha = 0,75$; для АД $\alpha = 0,5$.

Вираз для визначення середніх втрат (стосовно трьохперіодної тахограми) набирає вигляду:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3}{\alpha(t_1 + t_3) + t_2 + \beta \cdot t_0} \leq \Delta P_n .$$

Метод середніх втрат хоча і є одним з найбільш точних, заснованих на обліку середнього нагріву двигуна, не враховує, однак, максимальну температуру при змінному графіку навантаження і не дає можливості вибрати двигун за навантажувальною діаграмою, тому що для визначення втрат необхідно знати параметри двигуна. Крім того, цей метод не завжди зручний внаслідок труднощів розрахунку втрат потужності. Тому на практиці частіше застосовуються інші методи, хоч і менш точні.

28.3. Визначення втрат і ККД двигуна при номінальному і неномінальному навантаженнях.

Повні номінальні втрати потужності

$$\Delta P_n = \kappa + V_H = \kappa + \frac{\kappa}{a} = \kappa \left(\frac{a+1}{a} \right), \text{ де } a = \frac{\kappa}{V_H} - \text{ коефіцієнт втрат.}$$

Постійні втрати

$$\kappa = \Delta P_n \left(\frac{a}{a+1} \right) = P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \left(\frac{a}{a+1} \right).$$

Повні втрати при неномінальному навантаженні

$$\Delta P_x = \kappa + V_H \cdot x^2 = \kappa + \frac{\kappa}{a} \cdot x^2 = \kappa \left(\frac{a+x^2}{a} \right) = \Delta P_n \left(\frac{a}{a+1} \right) \left(\frac{a+x^2}{a} \right) = \Delta P_n \frac{a+x^2}{a+1} .$$

Тут x – коефіцієнт завантаження двигуна по струму або потужності. ККД двигуна при навантаженні, що відрізняється від номінального:

$$\eta_x = \frac{P_n \cdot x}{P_n \cdot x + \Delta P_x} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_x}{P_n \cdot x}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_n \left(\frac{a+x^2}{a+1} \right)}{P_n \cdot x}} = \frac{1}{1 + \frac{P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \left(\frac{a+x^2}{a+1} \right)}{P_n \cdot x}} = \frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{a+x^2}{a+1}}{x}}$$

Лекція №29. Перевірка допустимого навантаження двигуна за методом еквівалентного середньоквадратичного струму.

29.1. Загальні положення.

Суть цього методу заснована на тому, що дійсний струм, що протікає в двигуні і змінюється за величиною замінюється в розрахунках деяким постійним за величиною струмом I_e , що викликає в двигуні також втрати, що й дійсний.

При роботі двигуна по деякому графіку навантаження втрати на кожній окремій ділянці можна виразити у вигляді суми постійних і змінних втрат, якщо зробити припущення, що струм і втрати змінюються ступенями, залишаючись незмінними в межах кожного ступеня (в дійсності крива струму $I = f(t)$ не має ступеневого характеру).

Змінні втрати пропорційні квадрату струму головного кола – струму якоря для машин постійного струму і струму ротора для АД (для СД - струму статора). Таким чином

$$\Delta P_x = \kappa + V_H \left(\frac{I_x}{I_n} \right)^2 = \kappa + R \cdot I_x^2,$$

де R – враховує опір обмоток головного кола.

Підставляючи значення окремих складових втрат в вираз для ΔP_{cp} і представляючи середні втрати в двигуні як $\Delta P_{cp} = \kappa + R \cdot I_{\rho}^2$, отримаємо

$$\begin{aligned} \kappa + R \cdot I_{\rho}^2 &= \frac{(\kappa + I_1^2 \cdot R) \cdot t_1 + (\kappa + I_2^2 \cdot R) \cdot t_2 + \dots + (\kappa + I_n^2 \cdot R) \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \\ &= \frac{\kappa(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{R(I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}. \end{aligned}$$

Звідси після скорочень і перетворень отримаємо вираз для I_e

$$I_{\rho} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum I_x^2 \cdot t_x}{\sum t_x}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_x} i_x^2 dt}{\sum t_x}}.$$

Тут в знаменнику час всього робочого циклу з урахуванням пауз. Умова перевірки зводиться до порівняння I_e з номінальним струмом попередньо обраного двигуна, тобто $I_e \leq I_n$. Двигун додатково потрібно перевірити за умовою допустимого перевантаження, тобто переконатися,

$$\text{що } \lambda_I \geq \frac{I_{\max}}{I_n}.$$

Якщо ця остання умова не виконується, необхідно вибрати двигун більшої потужності, керуючись при цьому вже не умовами нагріву, а перевантажувальною здатністю двигуна.

Слід мати на увазі, що при виведенні вирази для I_e змінні втрати приймалися пропорційними квадрату головного струму двигуна. Це положення справедливо лише в тому разі, якщо протягом робочого циклу немає підключення головного кола, а АД з к. з. ротором, мають подвійну білячу клітку або глибокі пази, працюють приблизно при постійній швидкості. Крім того, цей метод не враховує можливі зміни постійних втрат при зміні швидкості в широких межах. Тим не менш, цей метод може використовуватися для перевірки за умовами нагрівання всіх типів попередньо обраних двигунів з достатньою точністю.

У випадках, коли постійна нагріву двигуна T_H не постійна і цикл містить періоди роботи із змінною швидкістю (зниженою), а також паузи, необхідно враховувати вплив погіршених умов охолодження. Еквівалентний струм у цьому випадку (стосовно до трьохперіодної тахограми) визначається за формулою

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{\alpha(t_1 + t_3) + t_2 + \beta \cdot t_0}}$$

При різких змінах крива струму $I=f(t)$ при розрахунках замінюється не ступінчастою, як розглянуто вище, щоб уникнути значних похибок, а ламаною лінією, майже збігається з реальною кривою зміни струму, і обчислюються еквівалентні струми окремих ділянок. У цьому випадку площа графіка, обмежена такою ламаною лінією, розбивається на ряд фігур (див. рис.29.1), що мають форму трикутника, прямокутника і трапеції.

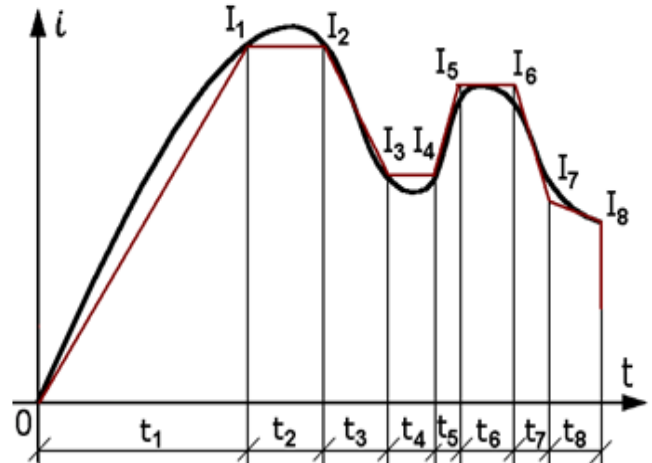


Рис.29.1.

Знайдемо, наприклад, еквівалентну значення струму на лінійній ділянці тривалістю t_1 (площа ділянки має форму трикутника). На ньому струм змінюється за законом

$$I = \alpha \cdot t, \text{ де } \alpha = \frac{I_1}{t_1} = \text{const}.$$

Еквівалентний струм на цій ділянці:

$$I_{\text{э1}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} I^2 dt}{t_1}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} \alpha^2 \cdot t^2 dt}{t_1}} = \frac{\alpha \cdot t_1}{\sqrt{3}} = \frac{I_1 \cdot t_1}{\sqrt{3} \cdot t_1} = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$$

- розрахунок виконується для трикутника.

На ділянці тривалістю, наприклад, t_3 має форму трапеції аналогічно можна отримати вираз

$$I_{\text{э3}} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_2 \cdot I_3 + I_3^2}{3}}$$

- розрахунок виконується для трапеції.

На ділянках, що мають форму прямокутника (тривалістю t_4, t_6), еквівалентний струм дорівнює дійсному струму. Використовуючи отримані залежності, визначається результуючий еквівалентний струм, який потім порівнюється з номінальним струмом попередньо обраного двигуна і робиться висновок про можливість його застосування, тобто $I_E \leq I_H$

$$I_3 = \sqrt{\frac{\sum I_{31}^2 \cdot t_{\Delta} + \sum I_{32}^2 \cdot t_{\square} + \sum I_{33}^2 \cdot t_{\triangle}}{\sum t_{\Delta} + \sum t_{\square} + \sum t_{\triangle}}}$$

- розрахунок виконується для результуючого еквівалентного струму.

Метод еквівалентного струму є кращим при перевірці потужності ДПС із змінним потоком, а також для АД зі значним струмом холостого ходу (40 ÷ 60% номінального струму).

29.2. Перевірка допустимого навантаження двигуна по методах еквівалентного моменту і еквівалентної потужності

Метод еквівалентного моменту заснований на тому, що в двигунах, що працюють при $\Phi = \text{const}$ момент пропорційний струму. Так, в разі двигунів постійного струму з незалежним збудженням $M = k\Phi \cdot I_a \equiv I_a$.

З деякими припущеннями він може бути використаний і для перевірки потужності попередньо обраного АД, коли він повинен працювати при навантаженнях, близьких до номінального. Момент АД $M = C_M \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \cos\psi_2$.

При тих реальних навантаженнях, при яких зазвичай працює АД, $\cos\psi_2$ змінюється не настільки значно, і з деякою погрешністю його можна вважати постійним.

Оскільки при $U_1 = \text{const}$ і $f_1 = \text{const}$ потік АД постійний, можна вважати, що і $M \equiv I_2$.

Помноживши обидві частини виразу для I_e на деякий коефіцієнт пропорційності, отримаємо

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

Умова правильності попередньо обраного двигуна: $M_e \leq M_n$.

У разі, коли $\Phi \neq \text{const}$ (наприклад, при ослабленні його у ДНЗ), цим методом безпосередньо користуватися не можна, але якщо внести поправки в навантажувальну діаграму електропривода, то ординати графіка моменту можна зробити пропорційними струму і методом еквівалентного моменту можна буде користуватися.

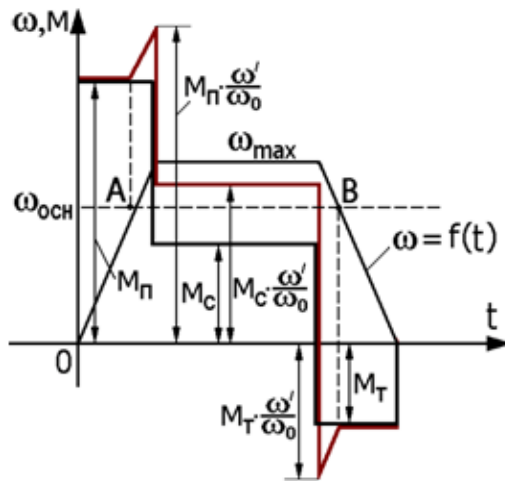


Рис.29.2.

Внесення поправок розглянемо на прикладі трьохперіодного графіка (рис.28.2). У сталому режимі двигун повинен працювати з ослабленим потоком $\Phi_{осл}$ зі швидкістю $\omega_{макс} > \omega_{осн}$. На ділянках діаграми, де двигун працює з $\Phi = \Phi_n$, ординати графіка моменту пропорційні струму (до точки А). При $\omega > \omega_{осн}$ ці ординати не пропорційні струму (від точки А до точки В). Якщо при $\Phi = \Phi_n$ двигун, розвиваючи момент M , споживає з мережі струм $I_я$, то при ослабленому потоці $\Phi_{осл}$, розвиваючи той же момент, він буде споживати більший струм $I_я$.

Таким чином на ділянках роботи з $\Phi_{осл}$ графік моменту не відображає картини нагріву двигуна.

Виходячи з рівності моментів, при роботі Φ_n і $\Phi_{осл}$, можна визначити величину поправки, яку потрібно ввести в графік моменту, щоб його ординати були пропорційні струму

$$M = k\Phi \cdot I_я = k\Phi_{осл} \cdot I'_я; \quad I'_я = I_я \cdot \frac{\Phi}{\Phi_{осл}}$$

Відношення потоків можна замінити відношенням швидкостей. Нехтуючи падінням напруги в колі якоря, можна вважати $E = k\Phi \cdot \omega = k\Phi_{осл} \cdot \omega' \cong U = const$.

$$\text{Отже, } \frac{\Phi}{\Phi_{осл}} = \frac{\omega'}{\omega} \text{ і } I'_я = I_я \cdot \frac{\omega'}{\omega} = I_я \cdot \frac{\omega'}{\omega_{осн}}$$

Помноживши ординати графіка моменту на ділянці роботи двигуна з ослабленим потоком (від точки А до точки В) на відношення $\frac{\omega'}{\omega_{осн}}$, де ω' -

фактична швидкість при ослабленому потоці, отримаємо новий графік, ординати якої пропорційні струму. Отже, маючи новий графік залежності $M = f(t)$ для перевірки потужності попередньо обраного двигуна можна використовувати метод еквівалентного моменту M_e .

В електроприводах, що працюють з постійною або малозмінною швидкістю, потужність $P = M \cdot \omega$ буде пропорційна моменту. В цьому випадку для перевірки правильності вибору потужності двигуна можна знаходити значення еквівалент-ної потужності P_e , користуючись залежністю $P = f(t)$, отриманою розрахунковим або експериментальним шляхом. При цьому необхідно дотримуватися умови:

$$P_{ном} = M_{э} \cdot \omega = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \leq P_H.$$

Область застосування цього методу обмежується випадками роботи ДНЗ, АД і СД при $\omega = \text{const}$.

Лекція №30. Вибір потужності двигуна для роботи з тривалим незмінним навантаженням.

30.1. Загальні положення.

До механізмів, що працюють з тривалим з практично незмінним навантаженням, відносять вентилятори, компресори, відцентрові насоси, димососи, транспортери і т.д. Оскільки ці механізми використовуються рідко, вплив пускового режиму на процес нагрівання двигуна мізерний. Лише в деяких випадках доводиться перевіряти достатність розвиваючого двигуном пускового моменту, маючи на увазі, що деякі механізми мають підвищений опір тертя і момент рушання.

В такому режимі температура перегріву двигуна досягає усталеного значення $\tau_{уст}$ і двигун, вибраний правильно, може працювати як завгодно довго без перегріву понад допустиму межу, за умови правильності експлуатації і температурі навколишнього середовища не перевищує 110°C .

Вибір двигуна при цьому режимі зводиться до того, що якщо відома потужність статичного навантаження P_c , то немає необхідності перевіряти двигун по нагріванню або перевантаженню під час роботи. Досить вибрати двигун з номінальною потужністю $P_n \geq P_c = M_c \cdot \omega = P_{расч}$. При цьому можна бути впевненим, що вона є найбільшою допустимою, оскільки завод-виробник виготовив вже всі розрахунки і випробування, виходячи з максимального використання матеріалів при номінальній потужності двигуна.

У тих випадках, коли навантаження (P_c механізму) заздалегідь невідоме, воно визначається за формулами з використанням коефіцієнтів, отриманих з численних дослідів. Так, розрахункова потужність для насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів (транспортерів), візків може бути обчислена за такими формулами:

$$P_{нас} = \frac{\gamma \cdot V \cdot H \cdot 10^3}{102 \cdot \eta_n \cdot \eta_{пер}}; \quad P_{вент} = \frac{VH}{102 \cdot \eta_v \cdot \eta_{пер}}; \quad P_{компр} = \frac{V}{102 \cdot \eta_k \cdot \eta_{пер}} \cdot \frac{A_u + A_a}{2};$$

$$P_{конв} = \frac{F \cdot V'}{102\eta}; \quad P_{тел} = K_T \cdot \frac{G \cdot V' \cdot 0.75}{102},$$

де V - продуктивність $\text{м}^3/\text{с}$; H - для насосів - висота напору, що дорівнює висоті всмоктування і нагнітання, м ; для вентиляторів і компресорів - тиск газу $\text{кгс}/\text{м}^2$ і $\text{кгс}/\text{см}^2$; $\eta_n, \eta_v, \eta_k, \eta_{пер}$ - ККД насоса, вентилятора, компресора, передачі (редуктора); A_i, A_a - відповідно питома робота ізотермічного і адіабатичного стиснення (дається в довідниках); F - тягове зусилля, кгс ; G -

вага візка з вантажем, т; V' - швидкість, м/с; K_T - коефіцієнт, що дорівнює 4...6 для підшипників кочення і 6...8 для підшипників ковзання; 7,5 – питоме тягове зусилля, кгс/тс.

Потужність обраного двигуна повинна містити запас у порівнянні з розрахунковими величинами не менше (5÷10)% зі збільшенням до (30÷110)% для двигунів потужністю до 5 кВт і (70÷100)% до 1 кВт.

У тих випадках, коли температура навколишнього середовища нижче 110°C , двигун може бути завантажений вище своєї номінальної потужності, а якщо вище 110°C - його слід недовантажувати.

Двигун правильно обраної потужності при номінальному навантаженні і $t_{\text{н.ср}}=110^\circ\text{C}$ в руховому режимі повинен бути нагрітий до $\tau_{\text{доп}}$

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{1}{A}(k + V_H) = \frac{1}{A} \cdot V_H (a + 1), \text{ де } a = \frac{k}{V_H}.$$

Якщо $t_{\text{н.ср}}$ відрізняється від 110°C на $\Delta\tau$, то для збереження тієї ж гранично допустимої температури перегріву $\tau_{\text{доп}}$, допустиме її перевищення має бути зменшено або збільшено на $\Delta\tau$. Для цього струм двигуна повинен мати значення $I_x = I_n \cdot x$ і змінні втрати будуть $V = x^2 \cdot V_H$. Вираз для сталої температури $\tau_{\text{уст}}$ при цьому буде таким:

$$\tau_{\text{уст}} = \tau_{\text{доп}} - \Delta\tau = \frac{1}{A}(k + x^2 V_H) = \frac{V_H}{A}(a + x^2),$$

де $\Delta\tau$ буде зі знаком "+" при $t_{\text{н.ср}} > 110^\circ\text{C}$ і зі знаком "-" при $t_{\text{н.ср}} < 110^\circ\text{C}$.

Поділивши цей вираз на перше, отримаємо $\frac{\tau_{\text{доп}} - \Delta\tau}{\tau_{\text{доп}}} = \frac{a + x^2}{a + 1}$, звідки допустима ступінь завантаження двигуна при $t_{\text{н.ср}} \neq 110^\circ\text{C}$

$$x = \sqrt{1 - \frac{\Delta\tau}{\tau_{\text{доп}}}(a + 1)}, \text{ тобто } P_{\text{доп}} = P_n \cdot x.$$

При $\Delta\tau = \frac{\tau_{\text{доп}}}{a + 1} x = 0$, тобто двигун не може нести ніякого навантаження, а може працювати лише вхолосту.

30.2. Вибір потужності двигуна для короткочасного режимі роботи.

У реальних умовах при короткочасному режимі роботи навантаження на валу двигуна протягом робочого періоду зазвичай змінюється. Тому якщо відомий реальний графік навантаження, тобто залежність $M=f(t)$, він замінюється еквівалентним йому по нагріванню прямокутним при тому ж часу t , і, використовуючи метод еквівалентного струму або моменту, визначається I_e або M_e . У вигляді прикладу на рис.30.1 показано реальний графік змінного навантаження і еквівалентний прямокутний. Еквівалентний момент в даному випадку буде дорівнювати

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

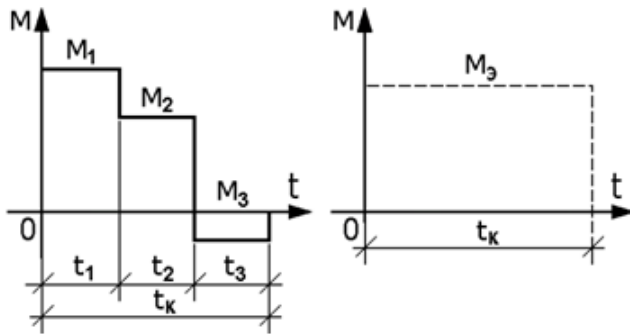


Рис.30.1.

Але оскільки точна наванта-жувальна діаграма електро-приводу зазвичай невідома і може бути побудована тільки в тому випадку, якщо двигун вже вибраний і розраховані перехідні процеси, при проектуванні елек-троприводу з короткочасним ре-жимом роботи двигун попере-дньо вибирається за умовою пере-вантаження $M_n \cdot \lambda_m \geq M'_{с.макс}$ або на підставі даних досвіду проектування і експлуатації аналогічних електроприводів.

Потім можна розрахувати перехідні процеси і побудувати реальну навантажувальну пряму, визначити $M_{экв}$ або $I_{экв}$ і порівняти с M_n або I_n .

Якщо передбачається вибрати спеціальний двигун серії, спеціально призначеної для короткочасного режиму роботи, то заданими повинні бути навантажувальна діаграма механізму і час t_k . За цими даними двигун вибирається заздалегідь, як зазначено вище. Для обраного двигуна визначаються T_H і коефіці-ент втрат a :

$$a = \frac{\kappa}{V_H} = \frac{\Delta P_n - V_H}{V_H}, \text{ де } \Delta P_n = P_n \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right).$$

$$V_H = I_{ян}^2 \cdot R_{я} - \text{для ДПС, а для АД } V_H = 3I_{1н}^2 r_1 + 3I_{2н}'^2 r_2';$$

$$T_H = \frac{t_k}{\ln \frac{\delta}{\delta - 1}} = \frac{t_k}{\ln \frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_{\kappa} - \Delta P_n}} = \frac{t_k}{\ln \frac{a + x^2}{a + 1}}.$$

Далі розраховуються необхідні статичні характеристики, перехідні процеси і будується навантажувальна діаграма, за якою визначається M_c або I_c або P_c і дійсний час t_k . Після цього визначається допустимий по нагріванню момент $M_{доп}$ за час $t_{к,дійсн}$.

$$M_{доп} = M_n \sqrt{\frac{(a+1) \frac{1 - e^{-\frac{t_{к,кат}}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_{к,действ}}{T_H}}}}{1 - e^{-\frac{t_{к,действ}}{T_H}}}} - a}.$$

Двигун буде задовольняти умовам нагріву, якщо виконується умова $M_{\text{доп}} \geq M_e$.

Якщо для короткочасної роботи передбачається вибрати двигун, нормально призначений для тривалої роботи, тобто режиму S1, то він вибирається попередньо за тими ж критеріями, що й двигун режиму S2. Заданими повинні бути навантажувальна діаграма механізму і час t_k .

Далі обчислюються ті ж величини і параметри, що і в попередньому випадку, розраховуються перехідні процеси, будується навантажувальна діаграма електроприводу і визначається M_e . Потім визначається момент, який може розвивати вибраний двигун не перегріваючись протягом часу $t_{k, \text{дійсн.}}$ при короткочасному режимі роботи

$$M_{\text{доп}}^{(k)} = M_n \cdot x = M_n \sqrt{\frac{1 + a \cdot e^{-t_{k, \text{дійсн.}}}}{1 - e^{-t_{k, \text{дійсн.}}}}} = M_n \sqrt{\frac{a + 1}{1 - e^{-\frac{t_{k, \text{дійсн.}}}{T_H}}} - a}.$$

Якщо виконується умова $M_{\text{доп}}^{(k)} \geq M_e$, то вибраний двигун по нагріванню проходить. Якщо вона не виконується, необхідно вибрати двигун найближчої більшої потужності. Після перевірки за умовами нагріву двигун варто перевірити за умовою перевантаження, а для к.з. АД перевіряється ще умова достатності пускового моменту.

Як вже говорилося раніше, для короткочасного режиму роботи недоцільно використовувати двигуни тривалого режиму. Тому за відсутності спеціальних двигунів режиму S2 можна використовувати двигуни повторно-короткочасного режиму S3. Вважається, що двигуну зі стандартною тривалістю $t=30$ хв, відпо-відає двигун з ТВ % = 15%, 60 хвилинному двигуна – двигун з ТВ% = 25% і 90 хвилинному двигуна – двигун з ТВ % = 110%.

30.3. Вибір потужності двигуна для повторно-короткочасного режиму роботи.

Якщо при повторно-короткочасному режимі навантаження двигуна, час роботи t_p і час паузи t_0 не змінюються, і відносна тривалість включення

$\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_0}$ дорівнює одному із стандартних значень, то за довідником або

каталогу вибирається двигун з номінальною потужністю $P_n \geq P_{\text{нав}}$.

Якщо навантаження P_1 при переході від циклу до циклу залишається незмінним, але не дорівнює P_n , а ε відрізняється від стандартного значення, то, на підставі методу середніх втрат, можна стверджувати, що середня температура перегріву двигуна не буде перевищувати допустимого значення, якщо середні втрати потужності за цикл при $\square\square\square_{\text{кат}}$ не будуть перевищувати середні втрати за той же цикл при $\varepsilon = \varepsilon_c = \varepsilon_{\text{кат}}$ і P_n , тобто якщо

$$\frac{\Delta P_1 \cdot t_{p1}}{t_{p1} + t_{01}} \leq \frac{\Delta P_n \cdot t_p}{t_p + t_0} \text{ або } \Delta P_n \geq \Delta P_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{\text{кат}}}.$$

Вибір двигуна по потужності в цьому випадку зводиться до перевірки згідно з написаним умові попередньо обраного двигуна з найближчими P_1 і ε_1 значеннями P_n і $\varepsilon_{кат}$ (ε_c).

Якщо в написаному виразі втрати потужності виразити через постійні «К» і змінні «V», то після перетворень отримаємо наступну формулу для перевірки попередньо вибраного двигуна

$$I_n \geq I_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{a(\varepsilon_c - \varepsilon_1) + \varepsilon_c}}.$$

Для ДПС незалежного збудження, що працюють з $\Phi = \text{const}$, а також для АД, які працюють у межах лінійної частини механічної характеристики можна отримати аналогічне співвідношення між моментами, а при роботі цих двигунів на природних характеристиках – співвідношення між потужностями

$$M_n \geq M_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{a(\varepsilon_c - \varepsilon_1) + \varepsilon_c}}, \quad P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{a(\varepsilon_c - \varepsilon_1) + \varepsilon_c}}.$$

На практиці найчастіше навантаження в межах циклу не залишається постійним. Тому, якщо відомий реальний графік $M=f(t)$, його замінюють еквівалентним прямокутним (рис.30.1) і визначається $M_{екв}$ або $I_{екв}$. Стосовно до зображеної діаграми:

$$M_s = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad \text{або} \quad I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}.$$

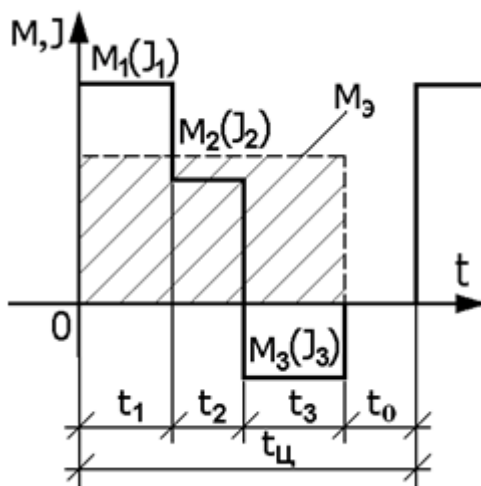


Рис.30.2.

Тут час паузи t_0 (в знаменнику під коренем) не входить, оскільки він враховується величиною ТВ%. Так і під час паузи двигун моменту не розвиває, так як струм дорівнює нулю.

Якщо розрахункова величина тривалості включення відрізняється від стандартної, двигун вибирається з найближчого стандартного значення ε , перераховуючи потужність двигуна на стандартне значення. При переході від однієї величини ε до іншої еквівалентна потужність двигуна, повинна залишатися незмінною.

Тому у відповідність з виразом для P_c у разі роботи двигуна на природній характеристиці можна написати:

$$P_s = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1}}{t_{p1} + t_{o1}}} = \sqrt{\frac{P_2^2 t_{p2}}{t_{p2} + t_{o2}}}; \quad \text{або} \quad P_s = \sqrt{P_1^2 \varepsilon_1} = \sqrt{P_2^2 \varepsilon_2}. \quad \text{Звідси} \quad P_2 = P_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}.$$

Приклад перерахунку потужності $P_x=P_1$ від дійсної $\varepsilon_x=\varepsilon_1$, на стандартне значення (каталожное) $\varepsilon_2=\varepsilon_{кат}=\varepsilon_c$, виконуються так:

$$P_{15\%} = P_x \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{0.15}}; \quad P_{25\%} = P_x \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{0.25}} \text{ і т. д.}$$

Може бути зроблений перерахунок на ε_c не тільки потужністю, але і еквівалентним струмом, визначеним з навантажувальної діаграми, а також еквівалентного моменту, якщо двигун незалежного збудження повинен працювати з $\Phi=\text{const}$, а АД – в межах лінійної частини механічної характеристики

$$I_{эс} = I_э \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_c}}; \quad M_{эс} = M_э \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_c}}.$$

Для більш точного перерахунку потужності слід виходити не з рівності еквівалентних потужностей, а з рівності втрат, тобто виходячи з співвідношень:

$$\Delta P_{пк1} \cdot t_y \cdot \varepsilon'_1 = \Delta P_{пк2} \cdot t_y \cdot \varepsilon'_2,$$

де $\Delta P_{пк1}$ і $\Delta P_{пк2}$ - втрати в двигуні при повторно-короткочасному режимі відповідно з ε_1 і ε_2 ; t_y – час циклу.

Виразивши втрати через постійні і змінні, враховуючи зміну умов охолодження, тобто маючи на увазі, що $\frac{T_H}{T_0} = \beta$ і позначаючи через x

відношення $\frac{P_2}{P_1}$ можна написати, прийнявши режим з P_1 за вихідний

$$(k + V_H) \cdot \varepsilon'_1 = (k + V_H \cdot x^2) \cdot \varepsilon'_2.$$

$$(k + V_H) \frac{t_{p1}}{t_{p1} + t_{01} \cdot \frac{T_H}{T_0}} = (k + V_H \cdot x^2) \frac{t_{p2}}{t_{p2} + t_{02} \cdot \frac{T_H}{T_0}}.$$

$$\text{Звідси } x = \sqrt{(a+1) \frac{\varepsilon_1 [\varepsilon_2 + \beta(1-\varepsilon_2)]}{\varepsilon_2 [\varepsilon_1 + \beta(1-\varepsilon_1)]}} - a \text{ і } P_2 = P_1 \cdot x.$$

При $\beta=1$ $x = \sqrt{(a+1) \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} - a$, а при нехтуванні постійними втратами

$$x = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \text{ і } P_2 = P_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}.$$

У випадку різних значень t_p і t_0 , за відносно ε приймається величина, підрахована для великого числа циклів роботи.

$$\varepsilon = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_0}.$$

При розрахунках слід користуватися цією середньою або еквівалентною величиною, у всіх наведених вище формулах.

При перевірці потужності попередньо вибраного двигуна за методом середніх втрат в разі повторно-короткочасного режиму роботи, вони обчислюються за формулою

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P_n \cdot t_n + \sum \Delta P_m \cdot t_m + \sum \Delta P_y \cdot t_y + \sum \Delta P_0 \cdot t_0}{\alpha(\sum t_n + \sum t_m) + \sum t_y + \beta \cdot \sum t_0},$$

де ΔP_n , ΔP_t , ΔP_y , ΔP_0 – втрати (середні) потужності за час пуску t_n , гальмування t_t , усталеної роботи і за час паузи при нерухомому двигуні (в обмотці збудження двигуна ДНЗ і СД).

Лекція №31. Енергетика електроприводів.

31.1. Втрати енергії при сталому режимі роботи нерегульованого електропривода.

Поняття «енергетика електроприводів» включає в себе питання споживання та витрат електроенергії, втрат її при електромеханічному перетворенні, питання ефективності використання активної і реактивної енергії. Ці питання визначають такі важливі енергетичні показники роботи електроприводу, як ККД і коефіцієнт потужності. Ці показники суттєво залежать від режимів роботи електроприводу, M_c , ω , напруги і частоти мережі. Розглянемо втрати при роботі двигуна на природній характеристиці.

Потужність втрат в нерегульованому електроприводі при складається з потужності втрат в механічних передачах від двигуна до робочого органу механізму, тобто

$$\Delta P_n = \Delta P_{об} + \Delta P_{мех} = K + V + \Delta P_{мех}.$$

До постійних втрат «К» відносяться втрати в сталі, механічні, а для двигунів постійного струму незалежного збудження, синхронних двигунів – ще й втрати на збудження. Постійні втрати насправді змінюються при зміні швидкості, напруги і частоти мережі. Це дозволяє вважати постійні втрати незмінними. Змінні втрати – це втрати в обмотках, що залежать від струму навантаження. Для двигунів постійного струму

$$V = I_{я}^2 \cdot R_{я} = I_n^2 \cdot R_{я\Sigma} \left(\frac{I_{я}}{I_n} \right)^2 = V_H \left(\frac{I_{я}}{I_n} \right)^2 = V_H \cdot x^2.$$

$$\text{Для АД } V = 3I_1^2 \cdot r_1 + 3I_2'^2 \cdot r_2'.$$

При невеликому діапазоні зміни струмів АД, коли намагнічуючий струм $I_\mu \cong \text{const}$, при малих ковзаннях S (що характерно для роботи на природній характеристиці), для яких $\cos \psi_2 \cong 1$, можна вважати втрати від струму намагнічування $I_\mu^2 r_1$, постійними і віднести їх до постійних втрат «К», а змінні втрати виразити тільки через струм ротора, т. к. при $I_\mu \cong \text{const}$ $I_1^2 = I_\mu^2 + I_2'^2 \cong I_2'^2$.

$$V = 3I_2'^2 r_1 + 3I_2'^2 r_2' = 3I_2'^2 r_2' \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) = 3I_{2H}'^2 r_2' \cdot \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'}\right)^2 \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) = V_{p.H} \cdot x^2 \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right).$$

Для синхронних двигунів

$$V = 3I_1^2 r_1 = 3I_{1H}^2 r_1 \left(\frac{I_1}{I_{1H}}\right)^2 = V_H \cdot x^2.$$

Таким чином, змінні втрати для різних двигунів $V = V_H \cdot x^2$, а сумарні втрати в двигуні $\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P = \kappa + V_H \cdot x^2 = V_H (a + x^2)$, де $a = \frac{\kappa}{V_H}$ - коефіцієнт втрат.

Для двигунів постійного струму з незалежним збудженням і АД змінні втрати можна виразити через електромагнітний момент і відносний перепад швидкості (ковзання).

Для ДПС:

$$V = P_1 - P_{\text{мех}} = P_1 - P_2 = UI_{\text{я}} - EI_{\text{я}} = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot (\omega_0 - \omega) \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0} = P_1 \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_0}.$$

Для АД змінні втрати в роторі

$$V_p = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot (\omega_0 - \omega) = M \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}\right) \cdot \omega_0 = M \cdot \omega_0 \cdot S.$$

Повні змінні втрати в АД

$$V = V_p \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) = M \cdot \omega_0 \cdot S \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right).$$

ККД нерегульованого електропривода

$$\eta = \frac{P_{p0}}{P_1} = \frac{P_{p0} \cdot P_{\text{мех}}}{P_1 \cdot P_{\text{мех}}} = \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{дв}} = \frac{P_{p0}}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1},$$

де P_{p0} – потужність на робочому органі механізму; P_1 – потужність, споживана з мережі.

Коефіцієнт потужності АД

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + Q^2}}, \text{ де } P_a = M \cdot \omega_0 + 3I^2 r_1 + \Delta P_{\text{ст}},$$

де

$$Q = 3I^2 x_{\mu} + 3I_1^2 x_1 + 3I_2'^2 x_2'.$$

Виразивши Q через P_a , отримаємо

$$Q = P_a \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1} = P_a \cdot \text{tg} \varphi.$$

Для більшості АД $\cos \varphi_n \cong 0,8 \div 0,9$. Тоді $Q \cong (0,5 \div 0,75)P_a$, тобто АД на 1кВт активної потужності споживає (0,5...0,75) кВАр реактивної потужності.

31.2. Втрати потужності і енергії в сталому режимі регульованого електроприводу.

Вибір того чи іншого способу регулювання швидкості електропривода визначається в кінцевому рахунку його економічністю. І хоча поняття економічності включає в себе такі чинники, як капітальні витрати, експлуатаційні витрати, надійність роботи і т. д., показники витрат електроенергії і регульоваль-них втрат є основою для співставлення регульованих електроприводів по економічності. При інших рівних умовах більшою економічністю має електропривод з меншими втратами і витратою електроенергії.

З енергетичної точки зору регулювання швидкості або моменту означає зміну потужності механічної енергії на робочому органі механізму. Змінити цю потужність можна шляхом розсіювання її частини у вигляді тепла в додатковому робочому опір якоря МПС або ротора АД.

Такий же результат можна отримати збільшивши втрати в самому двигуні, наприклад, при несиметричному живленні, коли в двигуні протікають несинусоїдні струми. Такі способи параметричного регулювання швидкості (реостатний, несиметричного включення АД та ін.) при тривалому зниженні механічної потужності з енергетичної точки зору неекономічні. Економічніше відводити частину енергії (без зміни основного потоку енергії) і повернути її в мережу. Це реалізується в каскадних схемах включення АД – в електричних каскадах, або цю частину енергії додатково направити до робочого органу механізму, що реалізується в електромеханічних каскадах.

Істотно економічніше регулювати потік механічної потужності не за рахунок додаткових втрат, а так, що б потужність споживаної механічної енергії визначала потужність, необхідну в даний момент часу механізму і втратами. Такі можливості мають системи УП-Д, дозволяють регулювати параметри U , I , f на вході двигуна. В таких системах управління механічною потужністю здійсню-ється за рахунок зниження споживаної двигуном електроенергії. Тут джерело (УП) виділяє таку електричну потужність, яка потрібна в даний момент часу механізму. Щоб зробити висновок про економічну доцільність конкретного регульованого електропривода необхідно насамперед визначити повні втрати у всіх його елементах. У ДПС з незалежним збудженням можна прийняти, що механічні втрати K_m і втрати в сталі K_c рівні

$$K_m + K_c = (K_m + K_c)_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2,$$

де $(K_m + K_c)_n$ – втрати при номінальній швидкості.

Змінні втрати в якірному колі

$$V = I_a^2 R_{a\Sigma} = M(\omega_{0p} - \omega),$$

де ω_{0p} - швидкість ідеального холостого ходу двигуна, що відповідає регульовальній характеристиці.

Сумарні втрати в регульованому приводі з ДНЗ з урахуванням втрат K_v на зміну

$$\Delta P_{\partial\delta} = K_v + (K_m + K_c)_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + M(\omega_{0p} - \omega).$$

При реостатному регулюванні швидкості змінні втрати змінюються пропорційно відносного перепаду швидкості

$$V = M \cdot \omega_0 \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}\right) = M \cdot \omega_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \text{ а постійні при зменшенні швидкості}$$

зменшуються.

При регулюванні швидкості зміною напруги ($\omega_0 = \text{var}$) з $M_c = M_n = \text{const}$ струм якоря незмінний і дорівнює номінальному, так як

$$I_{\text{я}} = \frac{M_n}{k\phi} = I_n = \text{const}. \text{ Незмінні і змінні втрати } V = V_n = I_{\text{я}}^2 R_{\Sigma} = \text{const}.$$

При регулюванні швидкості ослабленням магнітного потоку при $P_c = M_c \cdot \omega_c = \text{const}$ струм збудження із-за нелінійності кривої намагнічування змінюється більшою мірою, ніж потік. Криву намагнічування в межах зміни струму збудження від 0 до $I_{\text{зн}}$ можна апроксимувати виразом

$$\frac{I_v}{I_{vn}} \cong \left(\frac{\Phi}{\Phi_n}\right)^m = \left(\frac{\omega_0}{\omega_{0p}}\right)^m \cong \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^m,$$

де $1 < m < 2$.

Тоді постійні втрати

$$K = K_{vn} \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^m + (K_m + K_c)_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2.$$

З деяким наближенням можна прийняти, що зниження втрат в колі збудження при збільшенні швидкості компенсується збільшенням механічних втрат. При регулюванні швидкості зміною Φ з постійною потужністю на валу $P_c = P_n = \text{const}$ струм якоря $I_{\text{я}} = I_n = \text{const}$. Змінні втрати теж не змінюються. Звідси випливає, що сумарні втрати в двигуні при даному способі регулювання швидкості залишаються постійними

$$\Delta P_{\partial\delta} = K_n + V_n = \text{const}.$$

При регулюванні швидкості ДПС зміною напруги на якорі двигуна ($\omega_0 = \text{var}$), мають місце втрати і в перетворювачі. Для системи Г-Д постійними є механічні втрати і втрати в сталі машин. Змінні втрати в системі Г-Д складаються з втрат в міді ротора і статора приводного двигуна.

Тоді постійні втрати

$$V = I_{\text{я}}^2 (R_{\text{яг}} + R_{\text{ядв}}).$$

Для статичного перетворювача з напівпровідниковими вентилями (тиристорами) постійні втрати визначаються в основному втратами в сталі силового трансформатора і реакторів (згладжує і зрівнювальних). Вони практично незмінні. Отже, для статичного і обертового машинного перетворювача:

$$K_{\pi} = K_{\text{пн}} = \text{const},$$

де $K_{\text{пн}}$ – постійні втрати в перетворювачі при його номінальному режимі.

До змінних втрат статичного перетворювача відносяться втрати в обмотках силового трансформатора, дроселях, реакторах (якщо вони є) і в вентилях

$$V_{\text{пр}} = 3I_1^2 r_{1\text{пр}} + 3I_2^2 r_{2\text{пр}} + \Delta P_{\text{вент}} + \Delta P_{\text{реак}} \text{ або}$$

$$V_{\text{пр}} \cong (\Delta P_{\text{кз}} + \Delta P_{\text{рн}}) \left(\frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{вент.н}} \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{н}}},$$

де $\Delta P_{\text{кз}}$ - втрати к.з. трансформатора; $\Delta P_{\text{рн}}$, $\Delta P_{\text{вент.н}}$ - втрати в зрівнювальних і згладжуючих реакторах і вентилях.

В АД до постійних втрат відносять механічні втрати $K_{\text{м}}$, втрати в сталі статора $K_{\text{с1}}$ і ротора $K_{\text{с2}}$, в міді статора від намагнічувального струму, тобто

$$K = K_{\text{м}} + K_{\text{с1}} + K_{\text{с2}} + 3I_{\mu}^2 \cdot r_1.$$

$$\text{З достатньою точністю } K_{\text{м}} \cong K_{\text{мн}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}} \right)^2.$$

Втрати в сталі (від вихрових струмів і гістерезису) пропорційні квадрату амплітуди магнітної індукції і частоті в степені 1,3. Беручи, що при регулюванні швидкості двигуна і що об'єм шихтованої сталі статора і ротора однакові, вираз для сумарних втрат в сталі можна представити у вигляді

$$K_{\text{с}} = K_{\text{с1}} + K_{\text{с2}} \cong K_{\text{с1н}} \left(\frac{U_1}{U_{1\text{н}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^{1,3} + K_{\text{с2н}} \left(\frac{U_1}{U_{1\text{н}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1 \cdot S}{f_{1\text{н}}} \right)^{1,3}.$$

З урахуванням того, що $K_{\text{с1н}} = K_{\text{с2н}}$ - втрати в сталі при номінальній напрузі і номінальній частоті

$$K_{\text{с}} \cong K_{\text{с1н}} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1\text{н}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^{1,3} \cdot (1 + S^{1,3}).$$

При реостатному регулюванні АД, коли він живиться від мережі з $U_1 = U_{1\text{н}}$ і $f_1 = f_{1\text{н}}$ втрати в сталі

$$K_{\text{с}} \cong K_{\text{с1н}} (1 + S^{1,3}),$$

тобто сумарні втрати в сталі при збільшенні S ростуть за рахунок зростання втрат в сталі ротора.

У діапазоні швидкостей від 0 до номінальної збільшення втрат в сталі практично компенсується зниженням механічних втрат. Тому

$$K = K_{\text{мн}} + 3I_{\mu}^2 r_1 + K_{\text{с1н}} \cong \text{const}.$$

При частотному регулюванні і роботі АД на лінійній частині механічної характеристики ковзання ротора S залишається невеликим в усьому діапазоні зміни швидкості. Тому, втратами в стали ротора в цьому випадку можна знехтувати. Тоді при регулюванні згідно із законом $\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} = const$ і пере-

множуючи і ділячи праву частину виразу для K_c , на $\left(\frac{f_1}{f_1}\right)^2$

$$\begin{aligned} K_c &= K_{c1H} \left(\frac{U_1}{U_{1H}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{f_1}{f_1}\right)^2 = K_{c1H} \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \cdot \frac{f_1^{3,3}}{U_{1H}^2 \cdot f_{1H}^{1,3}} = \\ &= K_{c1H} \left(\frac{U_{1H}}{f_{1H}}\right)^2 \cdot \frac{f_1^{3,3}}{U_{1H}^2 \cdot f_{1H}^{1,3}} = K_{c1H} \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^{3,3}. \end{aligned}$$

$$\text{Змінні втрати: } V \cong 3I_1^2 r_1 + 3I_2'^2 r_{21}' = M \cdot \omega_0 \cdot S \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right).$$

Якщо частотне регулювання здійснюється при $M_c = M_H = const$, то перепад швидкості $\Delta\omega = \omega_0 \cdot S = const$ і змінні втрати залишаються незмінними

$$V = V_H = M_H \cdot \omega_H = M \cdot \omega_0 \cdot S_H \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) = const.$$

При реостатному регулюванні змінні втрати

$$V = M \cdot \omega_0 \cdot S + M \cdot \omega_0 \cdot S_H \frac{r_1}{r_2' + r_{\text{доб}}} = V_{\text{рот}} + V_{\text{стат}}.$$

Таким чином, змінні втрати в роторному колі $V_{\text{рот}}$ визначаються моментом і ковзанням, а в обмотки кола $V_{\text{стат}}$ - вони залежать тільки від моменту. Якщо регулювання здійснюється при $M_c = const$, то втрати в статорі постійні, а в роторному колі вони пропорційні ковзанню.

При вентиляторному моменті $M_c = M_H \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2$ втрати в роторному колі в залежності від швидкості визначаються залежністю

$$V_2 = V_p = M_c (\omega_0 - \omega) = M_H \left(\frac{\omega}{\omega_H}\right)^2 \cdot (\omega_0 - \omega).$$

Взявши похідну по швидкості і прирівнявши її 0, знаходимо максимум втрат. Швидкість і ковзання, при яких ці втрати максимальні

$$\omega = \omega_{\text{макс}} = \frac{2}{3} \omega_0; \quad S = S_{\text{макс}} = \frac{1}{3}.$$

Підставляючи ці значення у вираз втрат, отримаємо

$$V_{2_{\max}} = M_n \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2 \left(\omega_0 - \frac{2}{3} \cdot \omega_0 \right) = \frac{4}{27} \cdot M_n \cdot \omega_0 \left(\frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2 = \frac{4}{27} \cdot P_n \cdot \left(\frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2,$$

де P_n - номінальна потужність на валу двигуна.

Лекція №32. Втрати енергії при перехідних процесах в регульованому електроприводі і способи зменшення втрат енергії.

32.1. Загальні положення.

При живленні двигуна від керованого перетворювача ω_0 не змінюється стрибком, як і в розглянутих вище випадках, а плавно шляхом поступового зміни напруги в разі ДПС, або частоти в разі АД. При цьому різниця між ω_0 , заданої перетворювачем і швидкістю, що купується якорем або ротором виявляється меншою, ніж при стрибкоподібній зміні ω_0 . У межах, коли $M_c=0$ і задає швидкість ω_0 змінюється повільно, то швидкість ротора або якоря встигає повністю слідувати за нею. Енергія, споживана з мережі, в цьому випадку повністю витрачається на збільшення запасу кінетичної енергії ротора або якоря, тобто на здійснення корисної роботи. Втрати енергії повністю відсутні.

Розглянемо як залежать втрати при пуску в системі КП-Д від темпу лінійного наростання ЕРС перетворювача, а значить і ω_0 двигуна.

При розгляді перехідних процесів у разі, коли ω_0 змінюється в часі за лінійним законом, були отримані вирази для швидкості і моменту двигуна для етапу його розгону з нерухомого стану.

$$\omega = \varepsilon_0 t - T_m \cdot \varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right), \quad M = M_c + \beta \cdot T_m \cdot \varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right).$$

При пуску вхолосту, тобто при $M_c=0$, вираз для моменту приймає вигляд:

$$M = \beta \cdot T_m \cdot \varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right).$$

Втрати енергії в якірному колі ДПС або роторного кола АД на всьому інтервалі пуску

$$\Delta A_{\text{ПО}} = \int_0^{t_{\text{III}}} M (\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{\text{III}}} M \omega_0 \cdot S dt.$$

При $t_{\text{III}}=t_{\text{II}}$ і допускаючи для спрощення лінійну залежність $\omega=f(t)$, отримаємо

$$\omega = \varepsilon_0 t - T_m \cdot \varepsilon_0; \quad M = \beta \cdot T_m \cdot \varepsilon_0 = I_{\Sigma} \varepsilon_0; \quad \omega_0 = \varepsilon_0 t = \varepsilon_0 t_{\text{II}}.$$

$$\omega_0 - \omega = \varepsilon_0 t - \varepsilon_0 t - T_m \cdot \varepsilon_0; \quad \frac{d\omega}{dt} = \varepsilon_0; \quad dt = \frac{d\omega}{\varepsilon_0}, \quad \varepsilon_0 = \frac{\omega_0}{t_{\text{II}}}.$$

Тоді

$$\Delta A_{nn} = \int_0^{t_{\text{пп}}} J_{\Sigma} \varepsilon_0 \cdot T_M \cdot \varepsilon_0 dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} J_{\Sigma} \varepsilon_0^2 \cdot T_M \cdot \frac{d\omega}{\varepsilon_0} = J_{\Sigma} \varepsilon_0^2 \cdot T_M \int_0^{\omega_0} d\omega = J_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{2T_M}{t_{\text{II}}}$$

Звідси випливає, що у разі $t_{\text{II}} \gg T_M$ втрати енергії при пуску з лінійною зміною напруги значно менші, ніж при пуску з постійною напругою, коли ω_0 задається стрибком.

У системі Г-Д, в якій керування двигуном здійснюється зміною струму в обмотці збудження, а пуск двигуна – включенням її на повну напругу, ЕРС генератора змінюється за експоненціальним законом. Струм в якорному колі в перехідних процесах при $M_c=0$ визначається виразом:

$$i_{\text{Я}} = k \cdot I_{\text{кз}} \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{в}}}} - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \cdot \frac{T_M}{T_{\text{в}} - T_M} = k \cdot I_{\text{кз}} \cdot \frac{1}{m-1} \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{в}}}} - e^{-\frac{t}{T_M}} \right),$$

де $m = \frac{T_{\text{в}}}{T_M}$.

Коефіцієнт $k=1$ для пуску, $k= -1$ для режиму гальмування і -2 – для реверсу.

$T_{\text{в}}$ – електромагнітна постійна кола збудження генератора; T_M – електромеханічна постійна приводу.

Втрати енергії в якорному колі при $M_c=0$

$$\Delta A_{nn} = \int_0^{t_{\text{пп}}} i_{\text{Я}}^2 (R_{\text{Я0}} + R_{\text{Я2}}) dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} \left[k \cdot I_{\text{кз}} \cdot \frac{1}{m-1} \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{в}}}} - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) \right]^2 \cdot (R_{\text{Я0}} + R_{\text{Я2}}) dt$$

Після інтегрування і перетворень отримаємо при $t_{\text{пп}} = \infty$

$$\Delta A_{nn} = k^2 \cdot I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{m+1}.$$

Чим більше $T_{\text{в}}$ в порівнянні з T_M , тобто чим повільніше наростає ЕРС генератора, тим менше втрати енергії. Вони зменшуються в порівнянні з відповідними втратами в перехідних процесах двигуна при стрибкоподібній зміні напруги на якорі. Зменшується і споживання енергії та з урахуванням енергії, витраченої на зміну запасу кінетичної енергії A_k інерційних мас, становить при $M_c = 0$:

при пуску: $A_{no} = A_k - \Delta A_{nno} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{m-2}{m+1}$;

при гальмуванні: $A_{TO} = A_k - \Delta A_{TO} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{m}{m+1}$;

при реверсі: $A_{PO} = A_k - \Delta A_{PO} = 4I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{m+1}$.

У перехідних процесах під навантаженням

$$\Delta A_{nn} = \int_0^{t_{\text{пп}}} (I_c + I_{\text{дин}})^2 (R_{\text{яд}} + R_{\text{я2}}) dt = \int_0^{t_{\text{пп}}} I_c^2 \cdot (R_{\text{яд}} + R_{\text{я2}}) dt + \\ + \int_0^{t_{\text{пп}}} I_{\text{дин}}^2 (R_{\text{яд}} + R_{\text{я2}}) dt + 2I_c (R_{\text{яд}} + R_{\text{я2}}) \int_0^{t_{\text{пп}}} I_{\text{дин}} dt, \\ \text{де } \int_0^{t_{\text{пп}}} I_{\text{дин}} dt = \cdot I_{\text{кз}} \frac{1}{m-1} \int_0^{t_{\text{пп}}} (e^{-\frac{t}{T_0}} - e^{-\frac{t}{T_m}}) dt.$$

Зокрема, під час пуску під навантаженням

$$\Delta A_{nn} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \frac{1}{m+1} + P_c (2T_m + \frac{\Delta\omega_c t_{\text{п}}}{\omega_0}),$$

де P_c - потужність, споживана двигуном з мережі; $\Delta\omega_c$ - перепад швидкості, обумовленої статичному навантаженні M_c при сталій ЕРС генератора.

При рекуперативному гальмуванні

$$\Delta A_{PT} = I_{\Sigma} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \frac{1}{m+1} - P_c (2T_m + \frac{\Delta\omega_c t_T}{\omega_0}).$$

32.2. Втрати в регульованому електроприводі.

При визначенні втрат в регульованому асинхронному електроприводі при плавній зміні частоти f , яке живить напруги, отже, ω_0 , вважаємо, що к.з. АД в перехідному режимі працює на лінійній ділянці механічної характеристики, тобто при $S_{\text{абс}} < S_{\text{кр.абс}}$. Зокрема, під час пуску вхолосту ($M_c = 0$), коли заданий час розгону

$$t_{\text{п0}} = \frac{\omega_{\text{он}}^2}{\varepsilon_0} \gg T_m; S_a = I_{\Sigma} \cdot \varepsilon; \quad \Delta A_{\text{пп}} = I_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{он}}^2}{\varepsilon_0} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right) \cdot \frac{2T_m}{t_{\text{но}}}.$$

Звідси видно, що при порівняно повільному заданні ω_0 при частотному пуску АД, так, щоб $t_{\text{п0}} \gg T_m$ втрат енергії можуть бути істотно зменшені в порівнянні з втратами при прямому пуску. Для електроприводів, у яких перехідні процеси займають чимало часу в робочому циклі, дуже важливою є проблема зменшення втрат. З раніше отриманого виразу

$$\Delta A_{nn} = J_{\Sigma} \omega_0 \left(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}} \right) - J_{\Sigma} \frac{\omega_{\text{кон}}^2 - \omega_{\text{нач}}^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \left(S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2 \right)$$

впливає, що для зменшення втрат енергії потрібно знизити запас кінетичної енергії електроприводу в сталому режимі. Цього можна досягти зменшенням моменту інерції приводу, застосовуючи, наприклад, двигуни спеціального виконання з подовженим ротором (якорем), але меншого діаметра.

Зменшити втрати енергії можна ступінчастим зміною в перехідному процесі швидкості ω_0 , шляхом зміни напруги, що підводиться (в разі ДПС). Розглянемо це на найпростішому випадку пуску двухдвигательного електроприводу постійного струму зміною напруги в два ступені шляхом перемикання якорів з послідовного з'єднання на паралельне. Кожен двигун

розрахований на U_H . При послідовному з'єднанні напруга на якорях $= \frac{1}{2}U_H$ (див. рис.32.1), отже, ω_0 кожного двигуна дорівнює половині ω_0 при U_H . Двигуни розганяються до половинної швидкості.

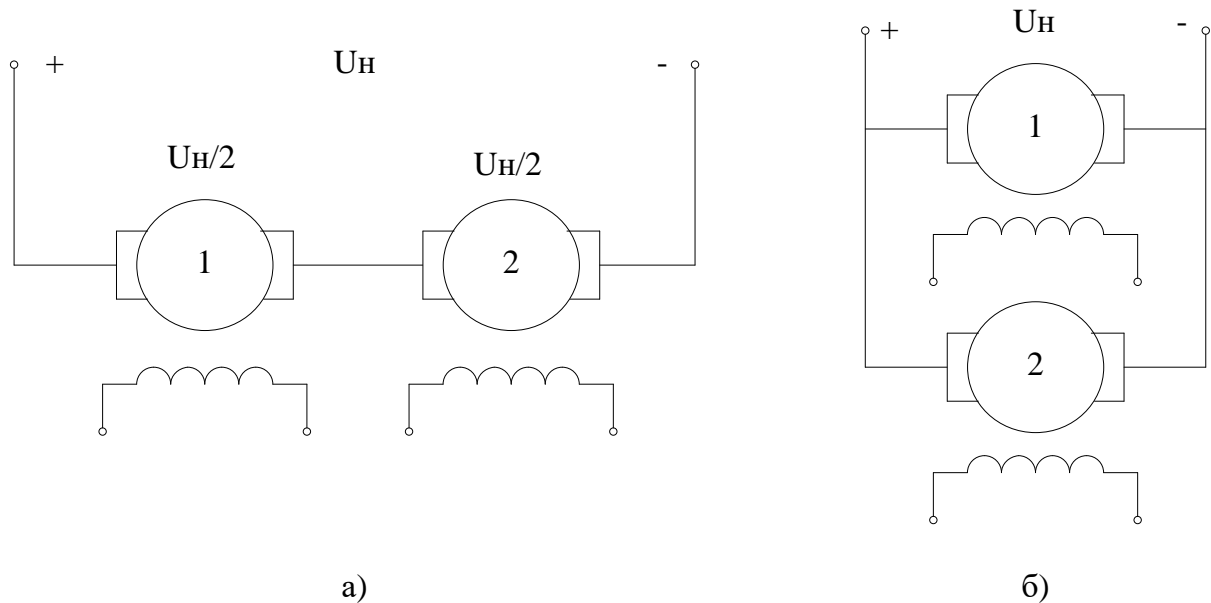


Рис.32.1.

Вважаючи для спрощення $M_c = 0$, можна сказати, що втрати в якорного кола кожного з двигунів під час пуску до $\omega = \frac{\omega_0}{2}$ складають

$$\Delta A'_{no} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{I_{\Sigma} \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2 - 0}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8}.$$

При подальшому розгоні до $\omega = \omega_0$ шляхом включення двигунів паралельно при $U = U_H$ (див. рис.32.1,б), втрати будуть рівні

$$\Delta A''_{no} = J_{\Sigma} \frac{\left(\omega_0 - \frac{\omega_0}{2} \right)^2}{2} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Сумарні втрати будуть в 2 рази менше, ніж при пуску в один щабель.

$$\Delta A_{no} = \Delta A'_{no} + \Delta A''_{no} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8} + J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{4}.$$

Зменшення втрат і витрат енергії при такому пуску і $M_c = 0$ в два ступені напруги можна проілюструвати за допомогою діаграми, зображеної на рис.32.2.

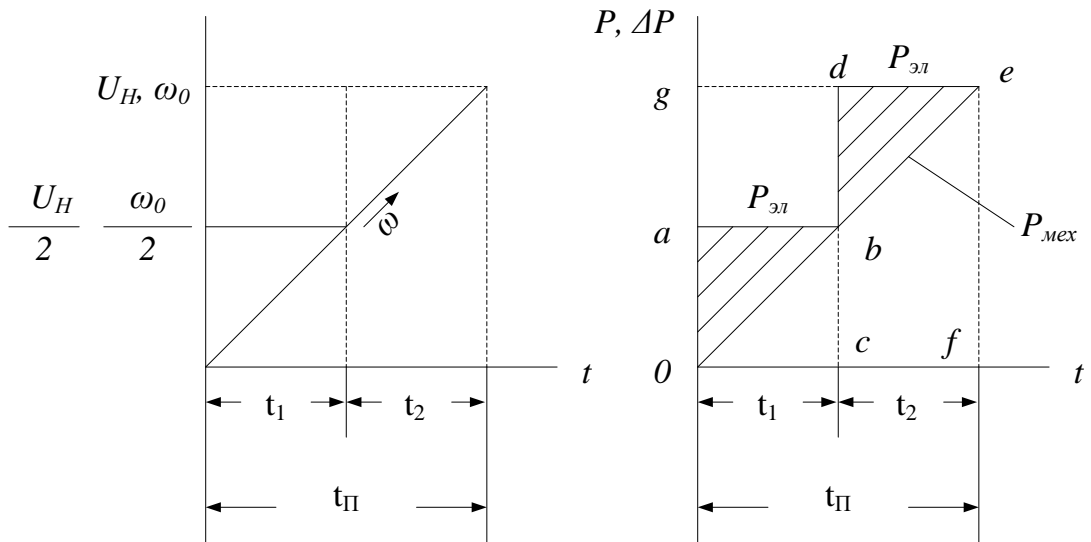


Рис.32.2.

Для кожного з двигунів енергія споживана з мережі на першій ступені напруги визначається площею прямокутника $oabc$. Потужність, споживана з мережі, може бути прийнята постійною (якщо $M_c = \text{const} = 0$, отже, при $U = \frac{U_H}{2} = \text{const}$ струм теж буде постійним) і пропорційним ординаті oa , а потужність на валу ($P_{\text{мех}}$) у міру розгону збільшується пропорційно збільшенню ω , тобто за "ab". Втрати енергії на першій ступені визначаються площею Δoab . При включенні двигунів паралельно на повну напругу, потужність, споживана з мережі при тому ж струмі, зростає вдвічі і стає пропорційною ординаті "cd", а механічна потужність $P_{\text{мех}}$ змінюється за "be". Втрати енергії на другому ступені визначаються площею Δbde . Повні втрати за час пуску дорівнюють сумі площ Δoab і Δbde . Якби пуск був в одну сходинку, то втрати енергії визначалися б площею Δoge . Таким чином, при пуску в два ступені втрати енергії в два рази менші, ніж при пуску в одну сходинку, а споживана енергія становить $\frac{3}{4}$ від енергії при пуску в одну сходинку (визначається площею $oabdef$). Енергія передана на вал в той же час буде такою ж, як і при пуску в одну сходинку і визначається площею Δoef .

При пуску в "m" ступенів напрузі втрати енергії обернено пропорційні числу ступенів, тобто $\Delta A_n^m = A_n \cdot \frac{1}{m}$, якщо ступені напруги однакові, а

витрата енергії $\Delta A_n = A_n \cdot \frac{m+1}{2m}$.

В загальному випадку втрати на i-му ступені

$$\Delta A_i = J_{\Sigma} \frac{\Delta \omega_i^2}{2}, \text{ де } \Delta \omega_i = \omega_{0i} - \omega_{\text{нач},i},$$

а сумарні втрати $\Delta A = \sum_{i=1}^n J_{\Sigma} \frac{\Delta \omega_i^2}{2}$ на всіх сходинках рівні $\Delta \omega_i = \frac{\omega_{0m}}{\omega_m}$, то і

$$\Delta A = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0m}^2}{2m}.$$

У разі застосування багатошвидкісних АД пуск до найбільшої швидкості завжди потрібний з метою зменшення втрат здійснювати ступенями. Інакше вони будуть значно більшими, ніж у такого ж по потужності одношвидкісного двигуна і має синхронну швидкість, що дорівнює максимальній швидкості багатошвидкісного двигуна.

Визначимо, для прикладу, втрати енергії при пуску двохшвидкісного АД в два ступені вхолосту. Розгін на першій ступені йде до швидкості $\frac{\omega_0}{2}$, а на другому ступені від $\frac{\omega_0}{2}$ до ω_0 , де ω_0 – найбільша синхронна швидкість. Такий пуск аналогічний пуску ДНЗ в два ступені напруги:

Втрати на першій ступені

$$\Delta A_{no(1)} = J_{\Sigma} \frac{\left(\frac{\omega_0}{2}\right)^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2' + r_0'}\right) = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{8} \left(1 + \frac{r_1}{r_2' + r_0'}\right).$$

Втрати на другій ступені аналогічні.

Гальмування багатошвидкісних двигунів для зменшення втрат аналогічне пуску і його слід здійснювати також ступенями. При цьому при переході з більшою ω_0 на меншу здійснюється гальмування з рекуперацією енергії в мережу. Так якщо двошвидкісний АД гальмується при $M_c=0$ зі

швидкістю $\omega_{0(2)}$ до $\omega_{0(1)} = \frac{\omega_{0(2)}}{2}$ швидкості з рекуперацією, а від $\omega_{0(1)}$ до $\omega=0$ противмиканням, то втрати на першій ступені будуть

$$\Delta A_{P.T.O} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{4} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \int_0^{-1} S dS = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{1}{2^2}.$$

Втрати на другому ступені (гальмування противмиканням)

$$\Delta A_{np.o} = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{4} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \int_1^2 S dS = J_{\Sigma} \frac{\omega_{0(2)}^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{3}{4}.$$

Повні втрати

$$\Delta A_0 = \Delta A_{P.T.O} + \Delta A_{np.o}.$$

Використана література

1. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М: Энергоатом издат. 1982. – 261с.
2. Ключев В.Н. Теория электропривода / В.Н. Ключев. – М: Энергоатом- издат. 1985. – 500 с.
3. Москаленко В.В. Электрический привод. Второе издание / В.В. Москаленко. - М: АСАДЕМА. 2003. – 334 с.
4. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода / В.М. Терехов. 1987. – 223 с.
5. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М: Энергоатом издат. 1992. – 576 с.

Основи електроприводу [Текст]: конспект лекцій для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня «молодший спеціаліст» освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання / укл. В.В. Лишук, С.П.Літковець. – Луцьк : Технічний коледж Луцького НТУ, 2020. – 168 с.

Комп'ютерний набір
Редактор

В.В. Лишук
В.В. Лишук

Підписано до друку «__»_____2020 р. Формат 60x84/16. Папір офс.
Гарнітур. Таймс. Ум. друк. арк. 10,5
Тираж 50 прим.

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ІВВ Луцького НТУ

