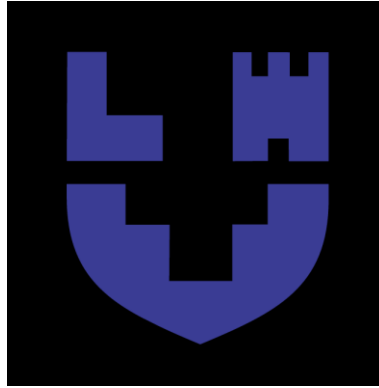


**Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет**



# **ЕЛЕКТРОПРИВІД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

методичні вказівки до практичних занять  
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти  
освітньої програми «Автомобільна електроніка»  
галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
спеціальності 171 Електроніка  
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2025

УДК 621.3(07)

Е-50

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ  
Директор бібліотеки \_\_\_\_\_ Наталія ПОЛЩУК

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № \_\_\_\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року.

Голова вченої ради ФКІТ \_\_\_\_\_ Інна КОНДІУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2025 року.

Завідувач кафедри ЕіТК \_\_\_\_\_ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ, к.т.н., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
(підпис)

Укладачі: \_\_\_\_\_ Віктор ЛИШУК, к.т.н., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
(підпис)

\_\_\_\_\_ Микола ХВИЩУН, к.ф-м.н., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
(підпис)

\_\_\_\_\_ Тетяна ЦИЗЬ, асистент кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
(підпис)

Рецензент: \_\_\_\_\_ Станіслав ПРИСТУПА, к.т.н., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
(підпис)

Відповідальний за випуск: \_\_\_\_\_ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ, к.т.н., завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ  
(підпис)

Е-50 Електропривід транспортних засобів. Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка денної та заочної форм навчання / уклад. В.В. Лишук, М.В. Хвищун, Т.П. Цизь. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 98 с.

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Електропривід транспортних засобів» містить комплекс практичних робіт для розширення необхідних теоретичних знань в області електроприводів транспортних засобів. Призначене для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації спеціальності 171 Електроніка денної та заочної форм навчання.

В.В. Лишук, М.В. Хвищун, Т.П. Цизь, 2025

## Зміст

Вступ.....	4
Практичне заняття №1. Задачі механіки електроприводу в тягових системах автотранспортних засобів.....	5
Практичне заняття №2. Приведення багатомасових систем до одномасових.....	15
Практичне заняття №3. Електромеханічні характеристики, режими роботи двигунів та регулювання координат тягового електроприводу	21
Практичне заняття №4. Розрахунок електромеханічних характеристик електроприводів постійного струму.....	28
Практичне заняття №5. Регулювання швидкості обертання електроприводів постійного струму.....	40
Практичне заняття №6. Розрахунок та побудова електромеханічних характеристик електроприводів змінного струму.	48
Практичне заняття №7. Особливості тягових синхронних електроприводів на постійних магнітах.....	54
Практичне заняття №8. Моделювання електроприводів.....	61
Практичне заняття №9. Перехідні режими в електроприводах.....	68
Практичне заняття №10. Розрахунок електричних параметрів регульованих електроприводів. ....	73
Практичне заняття №11. Джерела живлення для автономних електроприводів. ....	81
Практичне заняття №12. Вибір та розрахунок потужності двигунів для електроприводів автотранспортних засобів. ....	89
Список використаної літератури.....	97

## ВСТУП

Для функціонування транспортних засобів до їх приводу повинна бути підведена механічна енергія від електродвигуна певного типу і потужності, за рахунок якої і відбувається їх рух. Характер цього руху може бути є поступальним односпрямованим і реверсивним. Основне призначення приводного електродвигуна полягає в перетворенні електричної енергії, споживаної ним із силової електричної мережі транспортного засобу, в механічну, що віддається через вал двигуна.

Механічні характеристики електроприводів (ЕП) необхідні для вибору раціонального електроприводу. Правильне поєднання механічних характеристик електроприводу і робочої машини, наприклад мотор-колеса – одна з неодмінних умов високих техніко-економічних показників роботи транспортного засобу. Ці характеристики називаються природними, якщо вони отримані при номінальних умовах живлення (при номінальній напрузі і частоті), номінальному збудженні і відсутності додаткових опорів в колах ротора (або якоря) і статора. Характеристики двигуна називаються штучними при зміні будь-якого з перерахованих вище факторів. Зазвичай при дослідженні електроприводів механічні характеристики зображують на графіках у вигляді функції  $\omega = f(M)$ . При дослідженні механічних характеристик електродвигунів необхідно знати опір їх обмоток, а також значення введених в кола обмоток пускових, гальмових і інших опорів.

Регулювання частоти обертання електродвигунів транспортних засобів, а заодно й лінійної швидкості автотранспортного засобу залежить від типу двигуна. Для асинхронних електроприводів застосовується система «акумуляторна батарея-інвертор-перетворювач частоти», для електроприводів постійного струму – «широкоімпульсний перетворювач», для синхронних електроприводів з постійними магнітами – регулюванням магнітного потоку. Існують і інші технології керування електроприводами.

Методичні вказівки складаються з 12 тем, містять теоретичні положення та приклади розрахунку задач.

## Практичне заняття №1

### ЗАДАЧІ МЕХАНІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В ТЯГОВИХ СИСТЕМАХ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Мета роботи* – ознайомлення з механічними величинами при обертовому русі.

#### *Теоретичні відомості*

Елементи, які утворюють механічну частину електроприводу, зв'язані між собою та впливають один на одний. Тому, аналізуючи механічний рух того або іншого елемента, необхідно враховувати вплив на нього інших елементів кінематичної схеми електроприводу. Це досягається відповідним перерахунком сил, моментів, мас та моменті інерції, що входять у рівняння руху, до елемента, рух якого розглядається. Такий розрахунок в теорії електроприводу називається операцією приведення, а перераховані змінні та параметри – приведеними.

При визначенні приведенного моменту інерції  $J$  слід моменти інерції обертальних елементів поділити на квадрат передавального числа кінематичної схеми між цими елементами та валом двигуна, а маси елементів, що рухаються поступально, помножити на квадрат радіуса приведення і отримані результати розрахунку до моментів інерції двигуна та елементів, які обертаються з його швидкістю. Визначення приведенного моменту опору  $M_c$  здійснюється за балансом потужності навантаження електроприводу у реальній та розрахунковій схемах з врахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) втрат потужності у кінематичному колі.

Рівняння руху електроприводу має вигляд:

$$M = M_c \pm J d\omega/dt, \quad (1.1)$$

де  $M$  – крутний момент двигуна, Нм;

$M_c$  – статичний момент опору механізму, приведений до валу двигуна, Нм;

$J$  – момент інерції електроприводу, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega$  – кутова частота обертання двигуна, рад./с.

Величина  $M_{дин}=Jd\omega/dt$  називається динамічним моментом ЕП. Додатній динамічний момент забезпечує прискорення ЕП, від'ємний – сповільнення.

Потужність двигуна при обертовому русі, Вт

$$P=M \omega. \quad (1.2)$$

Потужність при поступальному русі становить

$$P=F V. \quad (1.3)$$

Оскільки  $\omega = 2\pi n / 60 = n / 9,55$ , ( $n$  вимірюється в об / хв), тоді:

$$P = M \cdot n / 9550. \quad (1.4)$$

Номінальний момент двигуна може бути обчислений за даними паспорту двигуна:

$$M_H = 9550 P_H / n_H. \quad (1.5)$$

Момент опору, приведений до валу двигуна:

$$M_C = M_{PM} / j\eta, \quad (1.6)$$

де  $j$  і  $\eta$  – передаточне число та ККД передачі.

Момент інерції ЕП, приведений до валу двигуна, в якому поєднуються обертальні та поступальні рухи:

$$J = J_D + J_{PM} \omega_{PM}^2 / \omega^2 + Gv^2 / g\omega^2, \quad (1.7)$$

де  $J_D$  – моменти інерції ротора двигуна;

$J_{PM}$  – момент робочого механізму (коробка передач і шків);

$\omega$  – швидкість обертання робочого механізму, рад./с;

$G$  – вага вантажу (транспортного засобу), переміщеного за допомогою електрорприводу, кг;

$V$  – лінійна швидкість руху вантажу, м/с;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – прискорення сили тяжіння.

Для визначення часу прискорення та уповільнення ЕП скористаємось наступними положеннями.

Час  $t_{1-2}$  прискорення або сповільнення ЕП від частоти обертання  $\omega_1$  до  $\omega_2$  визначається шляхом інтегрування рівняння руху ЕП:

$$t_{1-2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J \Delta \omega}{M - M_C}. \quad (1.8)$$

У випадку, коли  $M = const$ ,  $M_C = const$ ,  $J = const$ , ми отримуємо час, сек:

$$t_{1-2} = \frac{J(\omega_2 - \omega_1)}{M - M_C}. \quad (1.9)$$

У певному випадку, при запуску двигуна на частоту обертання  $\omega$ , час пуску визначається виразом:

$$t_{II} = \frac{J\omega_c}{M - M_c}. \quad (1.10)$$

Зміна параметрів руху робочих органів машини відбувається при впливі на їх кінематичний ланцюг (механічну частину) сил  $F$ . Для обертального руху фізичним аналогом сили є момент  $M$  (Нм). Момент створюється силою, яка прикладається до плеча (плече – найкоротша відстань від осі обертання до лінії дії сили), наприклад, парою сил, що виникають в електродвигунах обертального руху (рис.1.1)  $M = 2 (F / 2) R$ .

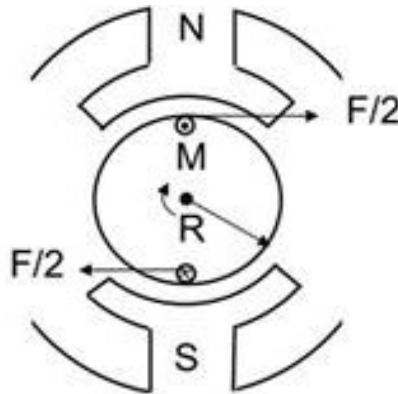


Рисунок 1.1 – Формування крутного моменту

Момент, що розвивається електродвигуном, може бути позитивним – коли двигун працює в руховому режимі, перетворюючи електричну енергію в механічну, або негативним, гальмівним ( $-M$ ), коли двигун працює в генераторному режимі або режимі протівовключення, перетворюючи механічну енергію в електричну.

Рух тіл механічних ланок або кінематичного ланцюга робочої машини підпорядковується законам Ньютона.

*Перший закон Ньютона – закон інерції.* Для поступального руху цей закон говорить – кожне тіло зберігає стан спокою або прямолінійного рівномірного руху до тих пір, поки зовнішні сили не виведуть його з цього стану. Математичне формулювання цього закону

$$\frac{dV}{dt} = 0, \quad \text{якщо} \quad \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0. \quad (1.11)$$

На тіло завжди діє кілька зовнішніх сил (сила, створювана двигуном, сила тяжіння, сили тертя і інші). Тіло знаходиться в стані спокою або прямолінійного рівномірного руху, в тому випадку, коли сума векторів сил, що діють на тіло, дорівнює нулю.

У таблиці 1.1 показано систематизовано величини при поступальному і обертальному русі

Таблиця 1.1 – Систематизація механічних величин

Поступальний рух			Обертальний рух		
параметр	позначення	розмірність	параметр	позначення	розмірність
шлях	S	м	кут повороту	V	Радіан
швидкість	$V = dS / dt$	м/с	кутова швидкість	$\omega = d\varphi / dt$	рад./сек. ( $c^{-1}$ )
			частота обертів	n	об./хв.
Прискорення	$a = d^2S / dt^2$	м/с <sup>2</sup>	кутове прискорення	$\varepsilon = d^2\varphi / dt^2$	рад./сек. <sup>2</sup> ( $c^{-2}$ )
сила	F	Н	момент	м	Нм
маса	m	кг	момент інерції	J	кг·м <sup>2</sup>

Розглянемо сили, що діють на тіло, що знаходиться на похилій площині (рис.1.2). На тіло діють: сила тяжіння  $\vec{G}$ , яка може бути розкладена на силу  $\vec{F}_a$ , спрямовану по похилій площині, і нормальну силу  $\vec{F}_s$ , сила тертя  $\vec{F}_{mp} = \mu\vec{F}_s$ . Якщо  $\vec{G} + \vec{F}_p + \vec{F}_{mp} = 0$ , то тіло буде знаходитися в стані спокою або рівномірного руху вниз по похилій площині. Якщо  $\vec{G} \sin \alpha < F_{mp}$ , то тіло буде знаходитися в стані спокою, так як сили тертя не можуть створювати руху.

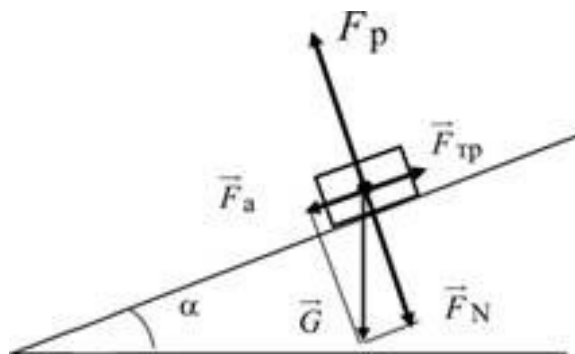


Рисунок 1.2 – До пояснення сил, які діють на тіло

Стосовно обертального руху перший закон Ньютона може бути сформульовано таким чином: тіло, що має фіксовану вісь обертання, буде знаходитися в стані спокою або рівномірного обертання до тих пір, поки прикладені моменти не виведуть його з цього стану:

$$\frac{d\omega}{dt} = 0, \text{ якщо } \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0. \quad (1.12)$$

Розглянемо, які моменти можуть діяти на тіло обертання, наприклад, ротор електродвигуна.

$M$  – електромагнітний момент, створюваний електродвигуном.

$M_{ca}$  – момент опору руху активний, що прикладається до робочого органу машини. Моменти активного опору руху можуть як перешкоджати руху, так і створювати рух. Знак цього моменту може бути додатнім, якщо напрямок моменту збігається зі знаком швидкості, і від'ємним, якщо його напрям протилежний знаку швидкості обертання.

$M_{cp}$  – реактивні моменти опору руху, що прикладаються до робочого органу машини; ці моменти виникають як реакція на рух робочого органу і завжди перешкоджають руху, при  $\omega = 0$ ,  $M_{cp} = 0$ .

$M_{mp}$  – момент від сил тертя в підшипниках і інших елементах кінематичного ланцюга робочої машини; момент тертя завжди перешкоджає руху; його відмінність від реактивного моменту опору полягає в тому, що він присутній і при швидкості, що дорівнює нулю; більш того,  $M_{mp}$  при спокої зазвичай значно перевищує момент тертя при русі.

Знаки всіх моментів визначаються щодо знака швидкості обертання: якщо момент сприяє руху – він додатний, якщо перешкоджає – він від'ємний. Алгебраїчна сума всіх моментів визначає результуючий момент, що прикладається до валу електродвигуна.

Другий закон Ньютона – закон динаміки – для поступального руху – імпульс сили дорівнює зміні кількості руху

$$\vec{F} dt = d(m\vec{V}). \quad (1.13)$$

Імпульс сили – це вектор, що дорівнює добутку сили на час її дії. Кількість руху – це вектор, що дорівнює добутку швидкості на масу тіла. Якщо маса постійна, то

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = m\vec{a}. \quad (1.14)$$

де  $\vec{F} = \sum_{i=1} \vec{F}_i$  – сума векторів сил.

Цей закон встановлює, що якщо результуюча сила не дорівнює нулю, то тіло отримує прискорення (уповільнення), величина якого залежить від величини сили і часу її застосування.

Для обертального руху другої закон Ньютона формулюється так: імпульс моменту дорівнює зміні кількості руху.

Кількість руху – добуток моменту інерції обертючих мас на їх кутову швидкість.

Момент інерції  $J$  (кг·м<sup>2</sup>) – параметр, аналогічний за змістом масі при поступальному русі, характеризує міру інерції тіл, що обертаються відносно фіксованої осі обертання. Момент інерції матеріальної точки з масою  $m$  дорівнює добутку маси на квадрат відстані від точки до осі обертання  $J = mR^2$ .

Момент інерції тіла є сума моментів інерції матеріальних точок, складових це тіло. Він може бути виражений через масу тіла і його розміри. Значення моменту інерції для тіл обертання наводяться в каталогах і довідниках. Іноді в каталогах дається значення махового моменту  $GD$ :  $J = GD / 4$ .

Відзначимо, що механічна інерційність обертається маси залежить не тільки від її величини, але і діаметра. При одній і тій же масі тіло, що має більший діаметр, володіє значно більшою моментом інерції. Тому малоінерційні електродвигуни прагнуть конструювати з меншим діаметром ротора більшої довжини. Навпаки, коли до складу кінематичної цени робочої машини включається маховик, його доцільно конструювати з великим діаметром.

Якщо момент інерції постійний, то рівняння другого закону Ньютона можна представити у вигляді:

$$M_{\Sigma} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (1.15)$$

Тут  $M_{\Sigma}$  – алгебраїчна сума моментів, які прикладають до тіла обертання.

Третій закон Ньютона – закон рівності дії і протидії – сили (моменти), з якими два тіла діють один на одного, рівні за величиною і протилежно спрямовані. Цей закон пояснює, зокрема, дію реактивних сил (моментів) опору руху. Наприклад, з якою силою різець впливає на оброблюваний метал, з такою ж силою, але протилежно спрямованою, метал впливає на різець, викликаючи появу на валу двигуна приводу різання реактивного моменту опору. Закон пояснює також наявність реакції опору. Саме в силу

цього закону необхідно кріплення двигуна до корпусу. Якщо, наприклад, не закріпити статор двигуна фланцевого виконання, то під навантаженням його ротор не буде обертатися, а буде обертатися незакріплений статор.

У механічному русі бере участь рухома частина електродвигуна (ротор або якір), елементи механічного передавального пристрою і виконавчий механізм. Сукупність цих елементів називають кінематичною схемою або механічною частиною електроприводу.

Задача 1.1. Визначити силу тяги для під'йому авто масою  $m = 700$  кг та потужність його електродвигуна при усталеному русі вгору по похилому асфальтовому дорожньому полотну, якщо кут нахилу  $\alpha = 10^\circ$ , а коефіцієнт тертя об дорожнє покриття  $\mu = 0,002$ . Швидкість при під'йомі постійна і складає  $V = 72$  км·год.

*Розв'язок.*

Сила тяжіння авто дорівнює

$$F_T = mg = 700 \cdot 9,81 = 6867 \text{ Н.}$$

Вона може бути розкладена на дві складових (рис.1.1): першу, що діє проти руху

$$F_1 = F_T \sin \alpha = 6867 \cdot 0,17 = 1192 \text{ Н,}$$

та другу, що діє перпендикулярно руху:

$$F_2 = F_T \cos \alpha = 6867 \cdot 0,98 = 6762 \text{ Н,}$$

яка в силу тертя між колесами і дорожнім полотном, створює силу тертя

$$F_{\text{тр}} = \mu F_2 = 0,002 \cdot 6762 = 13,5 \text{ Н.}$$

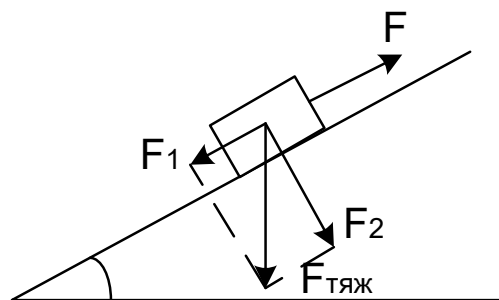


Рисунок 1.3 – Схема до задачі 1.1

Тоді повна статична сила, яку необхідно подолати при під'йомі ТЗ буде дорівнювати

$$F_c = F_1 + F_{тр} = 1192 + 34 = 1242 \text{ Н.}$$

Динамічна сила при русі ТЗ без прискорення дорівнює нулю

$$F_g = ma = 700 \cdot 0 = 0 \text{ Н.}$$

Повна сила при русі ТЗ вгору дорівнює

$$F = F_c + F_g = 1242 = 1242 \text{ Н.}$$

Для усталеного руху з швидкістю  $V = 72$  км/год, необхідна потужність електродвигуна становить

$$P = FV = 1242 \cdot 20 \text{ м/с} = 24,8 \text{ Вт} \approx 25 \text{ кВт.}$$

Розрахована потужність  $P$  є орієнтовною і залежатиме від різних режимів руху ТЗ, а саме прискорення, можливої зміни маси авто, коефіцієнту зчеплення з дорогою тощо.

Для визначення обертів ротора електродвигуна необхідно знати передаточне число і ККД трансмісії. ККД трансмісії приймаємо на рівні  $\eta = 0,95$ , а передаточне число  $i = 2$ . Знаючи лінійну швидкість, розраховуємо швидкість обертання колеса. Для типорозміру шини R15 діаметр складає  $d = 0,5$  м. З рівняння  $V = \omega R = (\pi n/30) \cdot R$  оберти колеса становлять

$$n_k = 60V / \pi d = 60 \cdot 20 / (3,14 \cdot 0,5) = 764 \text{ об/хв.}$$

Оберти валу електродвигуна

$$n_{ED} = n_k \cdot i = 1528 \text{ об/хв.}$$

Момент на валу двигуна

$$M = 9550 P / n = 9550 \cdot 25 / 764 = 312 \text{ Нм.}$$

Задача 1.2. Визначити величину обертових моментів на валу електродвигуна, необхідних при під'йомі ТЗ ввєрх по похилій дорозі, якщо повна маса ТЗ  $m = 1000$  кг. Діаметр колеса  $D_k = 55$  см і барабану  $D_b = 0,55$  м, коефіцієнт тертя кочення  $f = 0,01$ , ККД передачі  $\eta = 0,9$ ; кут нахилу

дорожнього полотна  $\alpha = 15^\circ$ . Розрахунок провести для таких випадків: 1) розгін з прискоренням  $a = 1 \text{ м/с}^2$ ; 2) усталений рух; 3) сповільнення з прискоренням  $a = 1 \text{ м/с}^2$ .

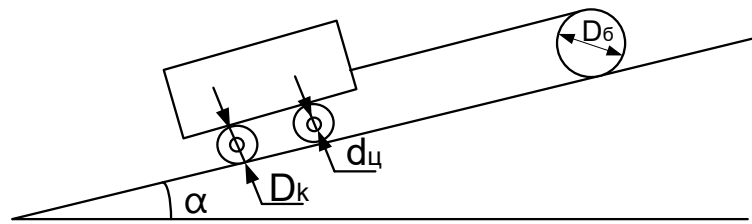


Рисунок 1.2 – Схема до задачі 1.2

*Розв'язок.*

Сила тяжіння визначається як:

$$F_m = mg = 1000 \cdot 9,81 = 9810 \text{ Н.}$$

Вона може бути розкладена на дві складових (рис.1.1): першу, що діє проти руху

$$F_1 = F_m \sin \alpha = 6867 \cdot 0,258 = 2539 \text{ Н,}$$

та другу, що діє перепендикулярно руху:

$$F_2 = F_m \cos \alpha = 6867 \cdot 0,965 = 9475 \text{ Н,}$$

яка в силу тертя між колесами і дорожнім полотном, створює силу тертя

$$F_{mp} = \mu F_2 = 0,005 \cdot 6762 = 34 \text{ Н.}$$

Звідки, зусилля, що необхідне для подолання тертя кочення коліс ТЗ дорівнює

$$F_{\kappa} = \frac{F_2 f}{0,5 D_{\kappa}} = \frac{9475 \cdot 0,01}{0,5 \cdot 0,55} = 344 \text{ Н.}$$

Таким чином, сила статичного опру дорівнює:

$$F_{\Sigma} = F_1 + F_{\kappa} = 2539 + 344 = 2883 \text{ Н.}$$

Статичний момент з урахуванням втрат

$$M_c = \frac{F_\Sigma \cdot D_6}{2\eta} = \frac{2883 \cdot 0,55}{2 \cdot 0,9} = 880 \text{ Н.}$$

Сила динамічного опору:

$$F_g = ma = 1000 \cdot 1 = 1000 \text{ Н.}$$

Динамічний момент з урахуванням втрат

$$M_\partial = \frac{F_g \cdot D_K}{2\eta} = \frac{1000 \cdot 0,55}{2 \cdot 0,9} = 305 \text{ Н.}$$

Так як прискорення при розгоні і сповільненні прийнято однаковим, то динамічний момент на валу буде однаковим в обох випадках, але при прискоренні буде сумуватись зі статичним моментом, а при сповільненні відніматись.

Таким чином, будемо мати момент на валу  
– при розгоні:

$$M_p = M_c + M_\partial = 880 + 305 = 1185 \text{ Н.}$$

– при усталеному русі:

$$M_p = M_c = 880 \text{ Н.}$$

– при сповільненні:

$$M_p = M_c - M_\partial = 880 - 305 = 575 \text{ Н.}$$

Задача 1.3. Визначити в трансмісії ТЗ (рис.1.3) обертовий момент на валу двигуна та його потужність, якщо статичний момент на валу  $M_p = 1500 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , Швидкість обертання валу редуктора  $n_p = 200 \text{ об/хв.}$ , передаточне число кожної ступені  $k_1 = 2,5$ ,  $k_2 = 5$ , а ККД ступеней  $\eta_1 = \eta_2 = 0,95$ .

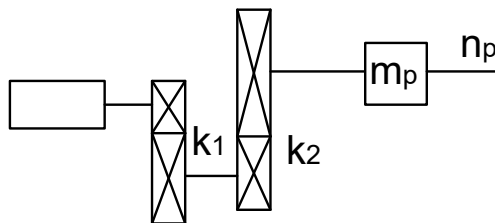


Рисунок 1.3 – Схема трансмісії

*Розв'язок.*

Обертний момент на валу при наявності трансмісії дорівнює :

$$M = \frac{M_p}{i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{1500}{2,5 \cdot 5 \cdot 0,95 \cdot 0,95} = 132 \text{ Нм.}$$

Швидкість обертання електродвигуна

$$n = n_p \cdot i_1 \cdot i_2 = 200 \cdot 5 \cdot 2,5 = 2500 \text{ об / хв.}$$

Потужність електродвигуна складає:

$$P = \frac{M \cdot n}{9550} = \frac{132 \cdot 2500}{9550} = 34,4 \text{ кВт.}$$

Задача 1.4. Визначити силу, необхідну для переміщення ТЗ по горизонтальній площині з постійною швидкістю, якщо вага корисного вантажу складає  $F = 1000 \text{ Н}$ , вага ТЗ  $F_0 = 7000 \text{ Н}$ , діаметр колеса  $d = 45 \text{ см}$ , коефіцієнт тертя  $f = 0,01$ .

*Розв'язок.*

Визначаємо зусилля, що припадає на одне колесо

$$F_k = (F + F_0)/4 = (1000 + 7000)/4 = 2000 \text{ Н.}$$

Зусилля, що необхідне для подолання тертя кочення для одного колеса:

$$F_k = 2 \cdot F_k \cdot f / d_k = (2 \cdot 2000 \cdot 0,01) / 0,45 = 88,9 \text{ Н.}$$

## **Практичне заняття №2**

### **ПРИВЕДЕННЯ БАГАТОМАСОВИХ СИСТЕМ ДО ОДНОМАСОВИХ**

*Мета роботи* – ознайомитися з методикою приведення величин багатомасових систем до одномасових.

#### ***Теоретичні відомості***

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 електроприводу складається з декількох інерційних елементів, що мають моменти інерції  $J_3, J_2, \dots, J_M$ , 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  $J_{пр}$ , приведенного до розрахункової швидкості (валу двигуна).

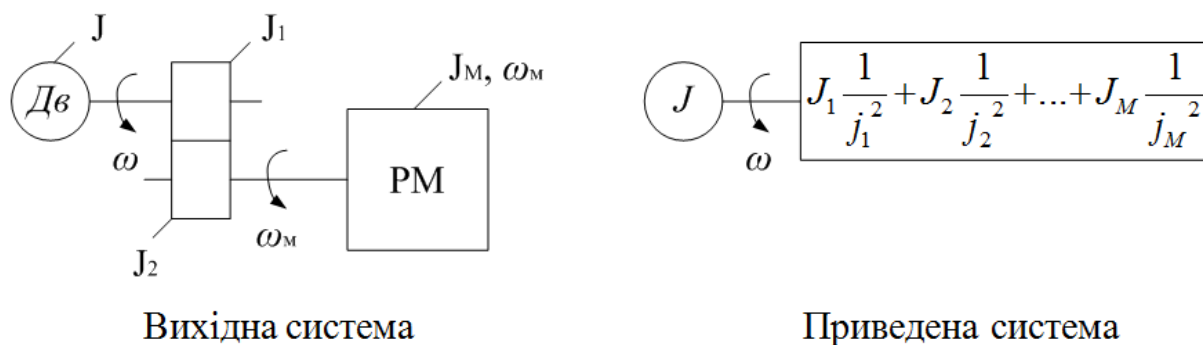


Рисунок 2.1 – Вихідна та приведена кінематичні схеми електроприводу

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

$$J_{np} = J \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + J_M \frac{\omega_M^2}{2}. \quad (2.1)$$

Звідси

$$J_{np} = J + J_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + J_2 \left( \frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + \dots + J_M \left( \frac{\omega_M}{\omega} \right)^2 = J + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \dots + J_M \frac{1}{j_M^2}, \quad (2.2)$$

де  $j_3, j_2, \dots, j_M$  – передавальні відношення між віссю (валом) двигуна і осями окремих обертових елементів.

Часто приведенний момент інерції системи вважають рівним сумі моментів інерції двигуна і приведенного моменту інерції робочої машини, а моменти інерції ланок передавального механізму (редуктора) враховують збільшенням моменту інерції двигуна в « $\delta$ » раз, тобто

$$J_{np} = \delta \cdot J + J_M \cdot \frac{1}{j_M^2}, \quad (2.3)$$

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 рисунку 2.2, еквівалентною системою, що містить тільки обертові елементи.

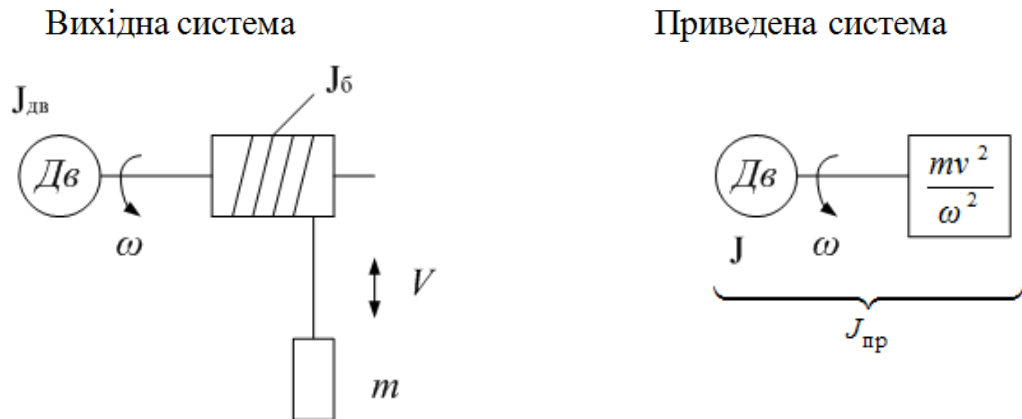


Рисунок 2.2 – Зведення моментів кінематичної схеми

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

Баланс запасів кінетичної енергії

$$J_{np} \cdot \frac{\omega^2}{2} = J \cdot \frac{\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}. \quad (2.4)$$

Звідси

$$J_{np} = J = \frac{mv^2}{\omega^2} = J + J'. \quad (2.5)$$

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:

$$J_{np} \cdot \frac{\omega^2}{2} = \frac{m_j \cdot v_j^2}{2}; \quad (2.6)$$

Звідки

$$J_{np} = m_j \cdot \left( \frac{v_j}{\omega} \right)^2 = m_j \cdot \rho_j^2, \quad (2.7)$$

де  $\rho_j$  - 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.

$$M_{np.i} \cdot \Delta\varphi_{np.i} = M_{c.i} \cdot \Delta\varphi_i \quad \text{і} \quad M_{np.j} \cdot \Delta\varphi_{np.j} = F_{c.j} \cdot \Delta S_j. \quad (2.8)$$

Звідси

$$M_{np.i} = M_{c.i} \cdot \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\varphi_{np.i}} = M_{c.i} \cdot \frac{1}{j_i}; \quad M_{np.j} = F_{c.j} \cdot \frac{\Delta S_j}{\Delta\varphi_{np.j}} = F_{c.j} \cdot \rho_j. \quad (2.9)$$

У тих випадках, коли вплив пружних зв'язків незначний або ними можна знехтувати, механічна частина електропривода видається простою розрахунковою схемою рисунка 2.2 – жорсткою приведеною механічною ланкою, тобто багатомасова механічна частина електропривода з моментами інерції  $J_3, J_2$  і т. д. замінюється дією одного моменту інерції  $J_{np}$ , приведенного до розрахункової швидкості. Сумарний наведений момент інерції електропривода в цьому випадку визначається як:

$$J_{np} = J_{\Sigma} = J + \sum_{i=2}^n J_i \cdot \frac{1}{j_i^2} + \sum_{j=1}^k m_j \cdot \rho_j^2, \quad (2.10)$$

де  $J$  – момент інерції ротора або якоря двигуна;

$n, k$  – число інерційних елементів електропривода, що здійснюють обертальний і поступальний рух.

Одномасова система

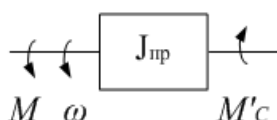


Рисунок 2.3 – Приведення жорсткостей для одномасової систем

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

$$M_c = M_{c\text{пр}} = \sum_i^q M_i \cdot \frac{1}{j_i} + \sum_{j=1}^p F_j \cdot \rho_j, \quad (2.11)$$

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

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

$$M_{cm} \cdot \omega_m \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_\delta. \quad (2.12)$$

Звідси

$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_\delta} \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_{cm} \cdot \frac{1}{i \eta_n}. \quad (2.13)$$

де  $M_{cm}$  – момент опору виробничого механізму (Нм);

$M_c$  – той же момент опору, приведений до швидкості вала двигуна;

$\omega_\delta$  – кутова швидкість вала;

$\omega_m$  – кутова швидкість вала виробничого механізму;

$i = \omega_\delta / \omega_m$  – передавальне число.

При наявності декількох передач між двигуном і механізмом з передавальними числами  $i_1, i_2, \dots, i_n$  і відповідними ККД  $\eta_{n1}, \eta_{n2}, \dots, \eta_{nm}$  момент опору, приведений до швидкості вала двигуна, визначається формулою

$$M_c = M_{cm} \cdot \frac{1}{i_1 i_2 \dots i_n} \cdot \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \dots \eta_{nm}}. \quad (2.14)$$

Приведення сил опору проводиться аналогічно приведення моментів. Якщо швидкість руху  $V$ , м/с, а кутова швидкість вала двигуна  $\omega_\delta$ , рад/с, то

$$F_{cm} \cdot V \cdot \frac{1}{\eta_n} = M_c \cdot \omega_\delta, \quad (2.15)$$

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

Звідси приведений до валу двигуна момент опору дорівнює

$$M_c = F_{cm} \cdot V / \omega_\delta \eta_n. \quad (2.16)$$

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:

$$J \cdot \frac{\omega_\delta^2}{2} = J_\delta \cdot \frac{\omega_\delta^2}{2} + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + \frac{\omega_n^2}{2}. \quad (2.17)$$

Звідси результуючий чи сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна

$$J = J_\delta + J_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_\delta} \right)^2 + J_2 \left( \frac{\omega_2}{\omega_\delta} \right)^2 + \dots + J_n \left( \frac{\omega_n}{\omega_\delta} \right)^2. \quad (2.18)$$

де  $J_\delta$  – момент інерції ротора двигуна та інших елементів (муфти, шестерні тощо), установлених на валу двигуна.

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

$$\frac{mv^2}{2} = J \frac{\omega^2}{2}. \quad (2.19)$$

Звідси момент інерції, приведений до валу двигуна дорівнює

$$J = m(v/\omega_\delta)^2. \quad (2.20)$$

Таким чином, механічна частина в загальному випадку являє собою систему рухомих мас, жорстко або пружно пов'язаних один з одним, на які впливають різні сили і моменти; як створені в електромеханічному

перетворювачі (двигуни), так і обумовлені технологічним процесом; корисні (на робочому органі), для подолання яких призначений привід; шкідливі (у всіх елементах механічної частини), обумовлені тертям. Рух кожної маси характеризується просторовими координатами і їх похідними.

### Практичне заняття 3

## МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РЕЖИМИ РОБОТИ ДВИГУНІВ ТА РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

*Мета роботи* – опанувати механічні характеристики електроприводів і режими їх роботи та поняття точності регулювання.

### *Теоретичні 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 рисунку 3.1 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

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{dM}{dt} . \quad (3.1)$$

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 рисунку 3.2.

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

$$|\beta_g| = \frac{\Delta M_g}{\Delta \omega_g} \text{ при } \Delta \omega_g \rightarrow 0. \quad (3.2)$$

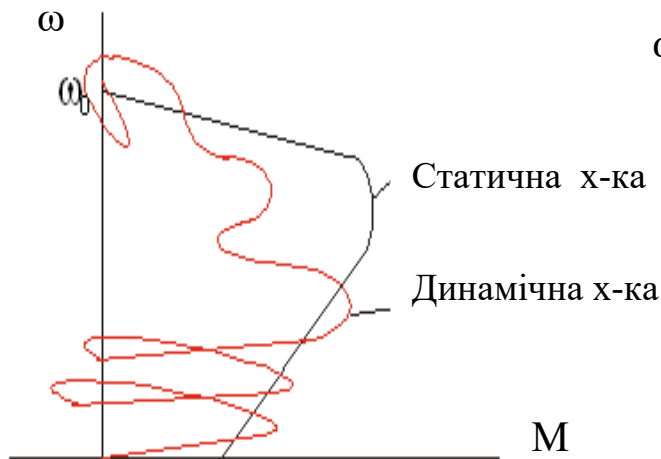


Рисунок 3.1 – Електромеханічна характеристика

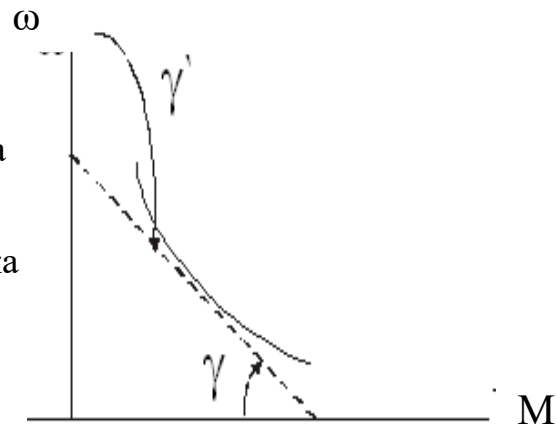


Рисунок 3.2 – Механічна характеристика

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  $\Delta P$  втрачається у вигляді тепла в обмотках і стали машини (рис.3.3).

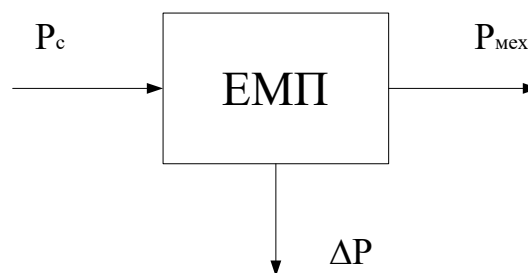


Рисунок 3.3 – Структурна схема приводу в режимі двигуна

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 (3.4).

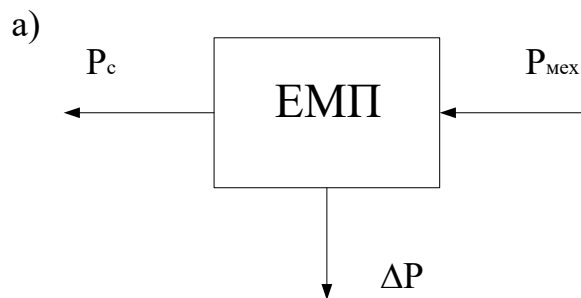


Рисунок 3.4 – Структурна схема приводу в режимі генератора

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 (рис.3.5).

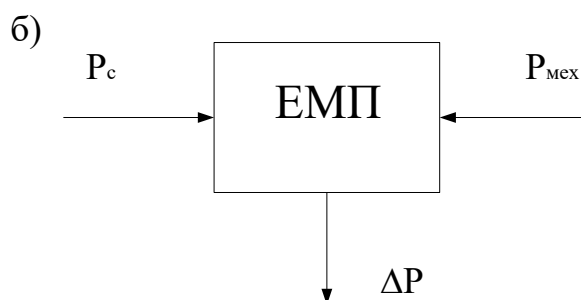


Рисунок 3.5 – Структурна схема приводу в режимі противмикання

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 сталі машини (рис.3.6).

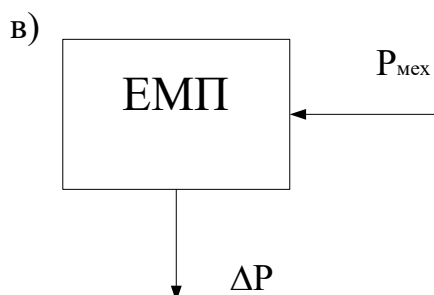


Рисунок 3.6 – Структурна схема приводу в режимі динамічного гальмування

Процес електромеханічного перетворення енергії супроводжуються втратами 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 короткочасного перенавантаження двигуна, тому що за час такого навантаження температура  $t$  двигуна різко змінитися не зможе.

Розрізняють, також перевантажувальну здатність двигуна по струму  $\lambda_I = \frac{I_{\text{дон}}}{I_H}$  і по моменту  $\lambda_M = \frac{M_{\text{дон}}}{M_H}$ .

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  $\lambda_M$  не повинна бути менше 2,5:  $\lambda_M = 2,5 \dots 5,5$ . 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  $\lambda_M = 1,7 \dots 2,4$ . 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.

Керування рухом електроприводу, 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 замкнених 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).

Для зіставлення між собою можливих способів регулювання координат використовуються такі узагальнені показники: точність (стабільність) регулювання, діапазон регулювання, плавність регулювання, динамічні показники якості регулювання, 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.3.7) регульованої величини до середнього значення

$$\Delta x_{\text{макс}}^* = \frac{\Delta x_{\text{макс}}}{x_{\text{ср}}} = \frac{(x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}}) \cdot 2}{(x_{\text{макс}} + x_{\text{мин}}) \cdot 2} = \frac{x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}}}{x_{\text{макс}} + x_{\text{мин}}} = \frac{x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}}}{2 \frac{(x_{\text{макс}} + x_{\text{мин}})}{2}} \quad (3.3)$$

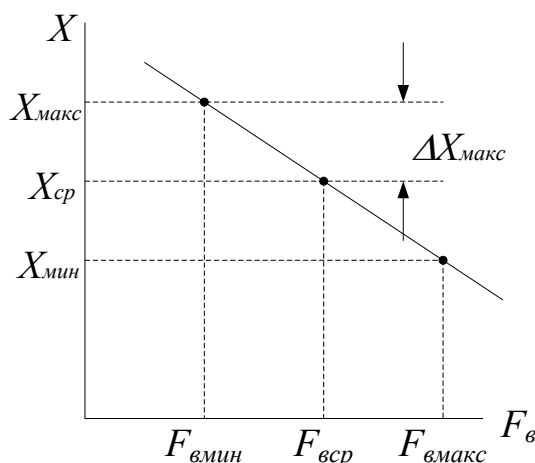


Рисунок 3.7 – Відношення найбільшого відхилення регульованої величини до середнього значення

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.3.4)

$$D = \frac{x_{\text{ср.макс}}}{x_{\text{ср.мин}}} \quad (3.4)$$

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 комутованій, 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.

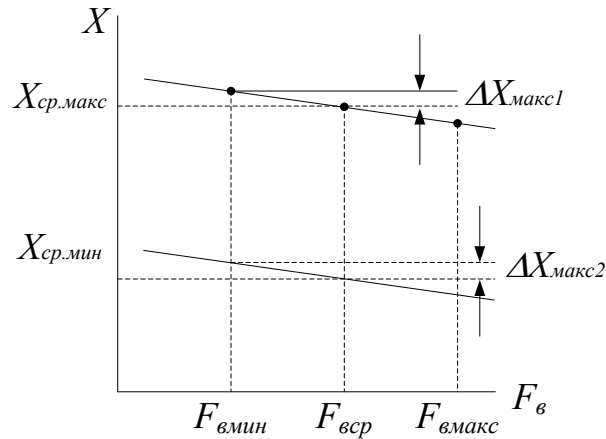


Рисунок 3.8 – Діапазон регулювання

Якщо показане на рисунку 4.2 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

$$\Delta x^*_{\text{макс}2} = \frac{\Delta x_{\text{макс}2}}{x_{\text{ср.мін}}} < \Delta x^*_{\text{доп}}. \quad (3.5)$$

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  $t_z$ , час регулювання  $t_p$ , за яке змінна перший раз досягає усталеного значення  $x_{\text{уст}}$ ,

час максимуму  $t_{\text{макс}}$ , загальний час перехідного процесу  $t_{\text{ПП}}$ , за яке згасають всі її вільні складові (рис.3.9).

Перерегулювання являє собою динамічну похибку і характеризується максимальним відхиленням  $\Delta x_{\text{макс}}$  від  $x_{\text{уст}}$  при  $t_{\text{макс}}$ , віднесенням до сталого значення регульованої змінної

$$\Delta x_{\text{макс}}^* = \frac{\Delta x_{\text{макс}}}{x_{\text{уст}}} . \quad (3.6)$$

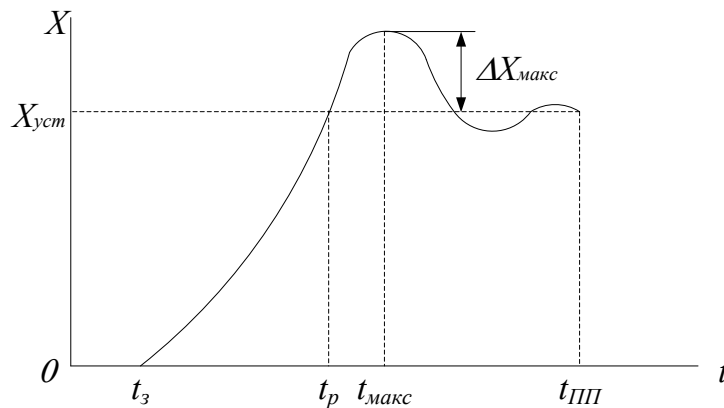


Рисунок 3.9 – Перехідний процес при перерегулюванні

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. 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.

Регулювання можливо при сталому моменті і при сталій потужності, тобто розрізняються дві зони регулювання (рис.3.10).

Зона I відповідає регулюванню при сталому моменту. Наприклад, в разі застосування ДНЗ при номінальному струмі і магнітному потоці  $\Phi = \Phi_H$   
 $M_{don} = M_H = K\phi_H \cdot I_H = const.$

Потужність  $P_2$  на валу двигуна в цій зоні змінюється за лінійним законом, тобто пропорційна швидкості

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

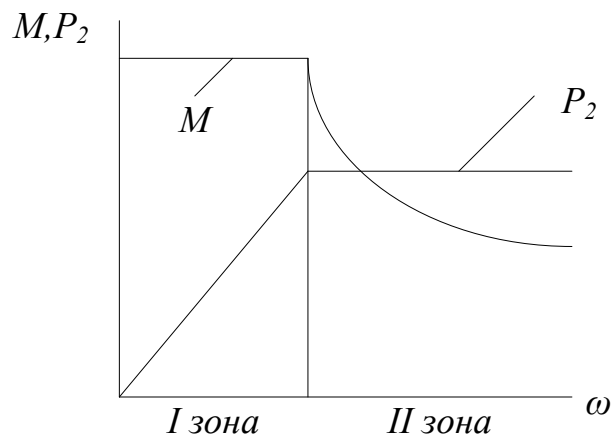


Рисунок 3.10 – Зони регулювання електроприводу

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  $M_c$ .

#### Практичне заняття №4

### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*Мета роботи* – навчитись розраховувати електромеханічні характеристики електроприводів постійного струму.

#### *Теоретичні відомості*

Електромеханічні  $\omega(I)$  або механічні  $\omega(M)$  характеристики електроприводів постійного струму визначаються формулами:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} = \frac{U - IR}{c}, \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR}{(k\Phi)^2} = \frac{U}{c} - \frac{MR}{c^2}, \quad (4.2)$$

де  $k$  - конструктивний коефіцієнт двигуна;  
 $\Phi$  - магнітний потік;  
 $c$  - коефіцієнт двигуна;  
 $R$  - повний опір якорного кола.

Природні електромеханічну або механічну характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням можна побудувати за двома характерними точками за паспортними даними:

- для режиму ідеального неробочого ходу

$$I = M = 0, \quad \omega = \omega_0 = \frac{U_H \omega_H}{U_H - I_H R_J}, \quad (4.3)$$

- для номінального режиму

$$I = I_H, \quad M = M_H = c I_H, \quad \omega = 0, \quad (4.4)$$

де  $c = \frac{U_H - I_H R_J}{\omega_H}$ .

Штучні електромеханічні чи механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням будують методом пропорцій за формулою

$$R_D = R_J \left( \frac{\Delta \omega_{ш}}{\Delta \omega_{п}} - 1 \right), \quad (4.5)$$

де  $\Delta \omega_{ш}$  та  $\Delta \omega_{п}$  - перепади швидкості відносно швидкості ідеального неробочого ходу, відповідно, на штучній та природній характеристиках або методом відрізків за формулою

$$\frac{R}{R_H} = \frac{\omega_0 - \omega_{ш}}{\omega_0} = \delta, \quad (4.6)$$

яка відображає важливу властивість двигуна постійного струму з незалежним збудженням: відносний перепад швидкості  $\delta$  дорівнює відносному активному опору кола якоря  $\frac{R}{R_H}$ . Відмітимо, що ця властивість характерна і для інших типів двигунів, наприклад асинхронних.

Іноді для обмеження струму та моменту у коло якоря вводиться регульований резистор, що дозволяє реалізувати дві та більше штучні характеристики, звужити межі змін струму та моменту, тим самим підвищити точність їх регулювання. У цих випадках резистор секціонується на відповідне число ступенів, які закорочуються послідовно по мірі розгону або гальмування двигуна.

Число ступенів  $m$  додаткового резистора зв'язано з межами зміни струму в якоря від пускового  $I_1 = I_{доп}$  до струму перемикавання  $I_2$

$$m = \frac{\lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{\lg\left(\frac{I_1 R_{я}}{U}\right)}. \quad (4.7)$$

Сукупність двох або більше штучних характеристик, які використовуються при пуску двигуна, називається пусковою діаграмою. При її розрахунку та побудові заданими параметрами є: допустимий струм  $I_{доп}$  або момент  $M_{доп}$ , момент навантаження  $M_C$ ; границі зміни струму (момента) або число штучних характеристик  $m$ , яке відповідає числу ступенів пускового резистора.

Опір резистора при пуску розраховується за формулою

$$R_{д1} = \frac{U}{I_{доп}} - R_{я}. \quad (4.8)$$

Опір резистора при динамічному гальмуванні визначається за формулою

$$R_{д2} = \frac{E}{I_{доп}} - R_{я} \approx \frac{U}{I_{доп}} - R_{я}. \quad (4.9)$$

Опір резистора при реверсі або гальмуванні проти вмиканням

$$R_{д3} = \frac{2U}{I_{доп}} - R_{я}. \quad (4.10)$$

Основною особливістю двигунів постійного струму з послідовним збудженням є вмикання обмотки збудження послідовно з обмоткою якоря, внаслідок чого струм якоря одночасно є й струмом збудження.

Для точних практичних розрахунків використовуються так звані універсальні характеристики двигунів з послідовним збудженням, які наведені на рисунку 4.1. Вони являють собою залежності відносної швидкості  $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_H}$  (криві 1) та моменту  $M^* = \frac{M}{M_H}$  (крива 2) від відносного струму  $I^* = \frac{I}{I_H}$ .

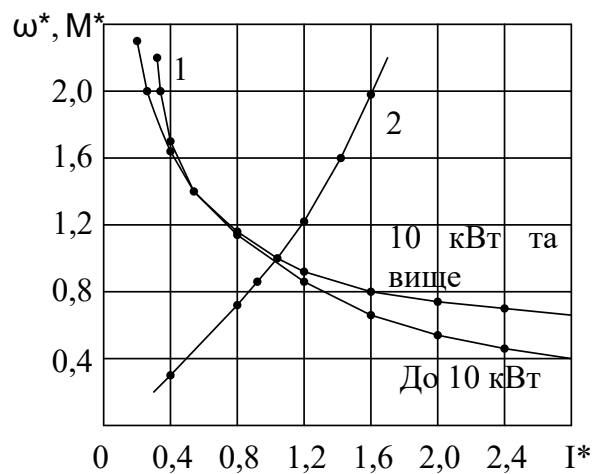


Рисунок 4.1 – Універсальні характеристики двигунів постійного струму з послідовним збудженням

Для отримання характеристик з більшою точністю залежність  $\omega^*(I^*)$  подана двома кривими – для двигунів до 10 кВт та вище.

Задача 4.1. Для двигуна постійного струму з незалежним збудженням П-72 розрахувати та побудувати природні електромеханічну та механічну характеристики, використовуючи його паспортні дані:  $P_H = 14\text{кВт}$ ,  $I_H = 78\text{А}$ ,  $U_H = 220\text{В}$ ,  $\omega_H = 104,7\text{с}^{-1}$ ,  $R_{\text{я}} = 0,172\text{Ом}$ .

*Розв'язок.*

Для побудови характеристик, які являють собою прямі лінії, достатньо розрахувати координати двох точок: ідеального ХХ та номінального режиму.

Для режиму ідеального неробочого ходу за формулами (4.3) маємо

$$I = M = 0, \omega = \omega_0 = \frac{220 \cdot 104,7}{220 - 78 \cdot 0,172} = 111,5 c^{-1}.$$

Номінальні швидкість двигуна та момент за формулами (4.4)

$$I = I_H = 78 A, \quad M = M_H = c I_H = 1,971 \cdot 78 = 153,7 \text{ Нм}, \quad \omega = 0,$$

де коефіцієнт двигуна  $c = \frac{220 - 78 \cdot 0,172}{104,7} = 1,971 \text{ Вс}.$

За координатами цих точок можна побудувати природні електромеханічну  $\omega(I)$  та механічну  $\omega(M)$  характеристики.

Задача 4.2. Побудувати природну механічну характеристику двигуна постійного струму незалежного збудження. Паспортні дані.

$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$I_{\text{я ном}}, \text{А}$	$R_{\text{я ном}}, \text{Ом}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/хв.}$
13,3	230	58	0,465	1460

*Розв'язок.*

Для побудови природної характеристики ДПС НЗ необхідно мати дві точки: точка ідеального холостого ходу ( $\omega_0, M = 0$ ) та точка при номінальному моменті ( $\omega_{\text{ном}}, M_{\text{ном}}$ ). Знайдемо точку ідеального ХХ ДПС НЗ

$$\omega_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{k\Phi_{\text{ном}}},$$

де  $k\Phi_{\text{ном}}$  – коефіцієнт двигуна, Вc.

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

де  $\omega_{\text{ном}}$  – номінальна швидкість ДПС НЗ, 1/с.

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{ном}}}{60}, \quad \omega_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1460}{60} = 152,8 / \text{с}.$$

$$k\Phi_{\text{ном}} = \frac{230 - 58 \cdot 0,465}{152,8} = 1,33 \text{ Вc}, \quad \omega_0 = \frac{230}{1,33} = 173 \text{ 1/с}.$$

Знайдемо електромагнітний номінальний момент

$$M_{еном} = k\Phi_{ном} \cdot I_{яном}. \quad M_{еном} = 1,33 \cdot 58 = 77 \text{ Нм}.$$

Знайдемо номінальний момент ДПС НЗ

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}. \quad M_{ном} = \frac{13300}{152,8} = 87 \text{ Нм}.$$

Механічна характеристика ДПС НЗ приведена на рисунку 4.2.

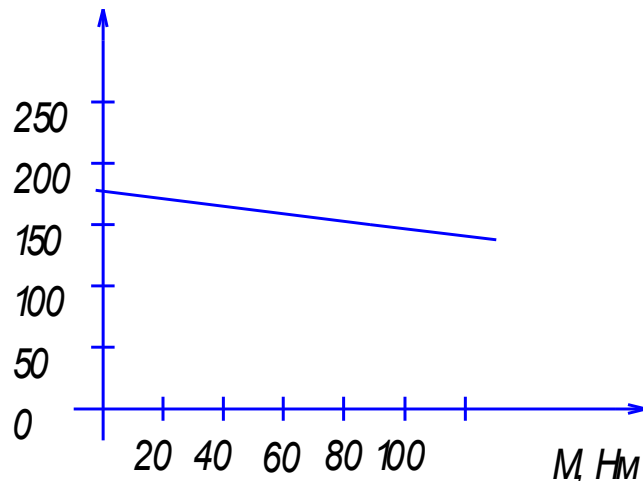


Рисунок 4.2 – Природна механічна характеристика ДПС НЗ.

Задача 4.3. Двигун постійного струму з незалежним збудженням марки ПБСТ-53 має такі паспортні дані:  $P_H = 4,8 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 24,2 \text{ А}$ ,  $U_H = 220 \text{ В}$ ,  $n_H = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ,  $R_{я} = 0,38 \text{ Ом}$ . Визначити опір резистора, ввімкнення якого забезпечить проходження штучної характеристики через точку з координатами:  $\omega_{шт} = 90 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_{шт} = 25 \text{ Нм}$ .

*Розв'язок.*

Для знаходження опору використаємо метод пропорцій, попередньо визначивши основні параметри двигуна, а саме

- номінальні швидкість та коефіцієнт двигуна:

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}, \quad c = \frac{220 - 24,2 \cdot 0,38}{157} = 1,343 \text{ Вс};$$

- номінальний момент та швидкість ідеального неробочого ходу:

$$M_H = cI_H = 1,343 \cdot 24,2 = 32,5 \text{ Нм}, \quad \omega_0 = \frac{U_H}{c} = \frac{220}{1,343} = 163,8 \text{ с}^{-1}.$$

Перепади швидкості при моменті  $M_H = 32,5 \text{ Нм}$  на природній та на штучній характеристиках

$$\Delta\omega_{II} = \frac{M_H R_{Я}}{c^2} = \frac{32,5 \cdot 0,38}{1,343^2} = 6,85 \text{ с}^{-1}, \quad \Delta\omega = \omega_0 - \omega = 163,8 - 90 = 73,8^{-1}.$$

Шуканий опір резистора за формулою (4.5)

$$R_{Д} = R_{Я} \left( \frac{\Delta\omega_{III}}{\Delta\omega_{II}} - 1 \right) = 0,38 \left( \frac{73,8}{6,85} - 1 \right) = 3,714 \text{ Ом}.$$

Задача 4.4. Для двигуна типу ПБСТ-53 (задача 4.3) визначити опори резисторів, включення яких обмежить струм при пуску та гальмуванні проти вмиканням до рівня  $I_{доп} = 3I_H$ .

*Розв'язок.*

Опір пускового резистора за формулою (4.8 )

$$R_{Д1} = \frac{U}{I_{доп}} - R_{Я} = \frac{220}{3 \cdot 24,2} - 0,38 = 2,65 \text{ Ом}.$$

Опір резистора, який використовується при гальмуванні проти вмиканням, за формулою (4.10)

$$R_{Д3} = \frac{2U}{I_{доп}} - R_{Я} = \frac{2 \cdot 220}{3 \cdot 24,2} - 0,38 = 5,68 \text{ Ом}.$$

Задача 4.5. Розрахувати та побудувати природні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням типу Д31, який має дані:  $P_H = 8 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 46,5 \text{ А}$ ,  $U_H = 220 \text{ В}$ ,  $n_H = 800 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ ,  $\eta_H = 0,78$ .

*Розв'язок.*

Визначаємо номінальну швидкість  $\omega_H$  та момент  $M_H$

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 800}{30} = 83,8 c^{-1}, \quad M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{8000}{83,8} = 95,5 \text{ Нм}.$$

Скористаємось універсальними характеристиками двигуна на рисунку 4.1 та розрахуємо природні електромеханічну та механічну характеристики двигуна. Результати зведемо у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – До розрахунку природних електромеханічних та механічних характеристик двигуна

$I^*$	0,4	0,8	1,2	1,6	2
$M^*$	0,3	0,7	1,3	1,9	2,6
$\omega^*$	1,8	1,1	0,9	0,8	0,6
$\omega = \omega^* \omega_H, c^{-1}$	151	92	75	63	50
$M = M^* M_H, \text{Нм}$	28,7	66,9	124	181	248
$I = I^* I_H, \text{А}$	18,6	37,2	55,8	74,7	93

За отриманими даними будуюмо природні електромеханічну  $\omega(I)$  - 1 та механічну  $\omega(M)$  - 2 характеристики двигуна (рис.4.3,а,б).

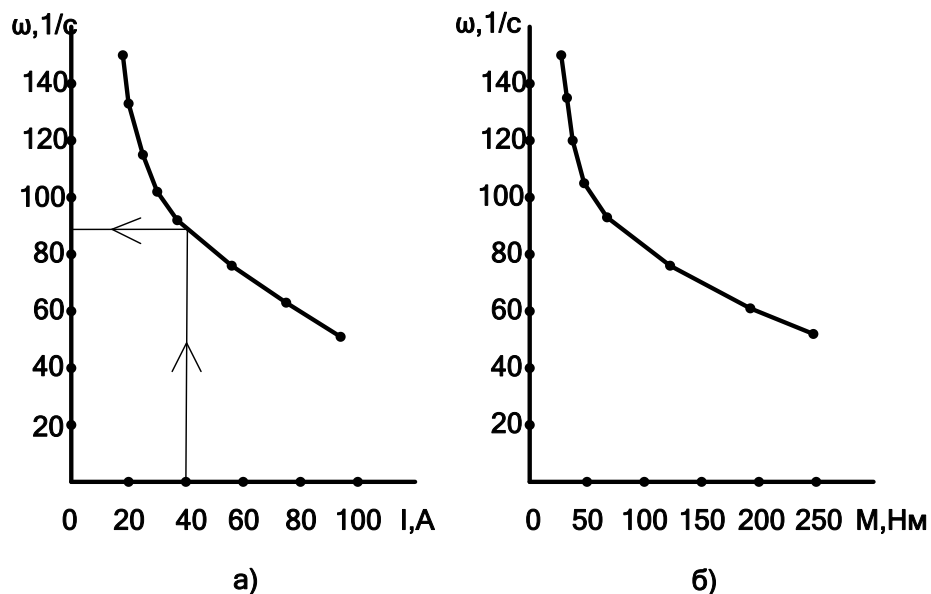


Рисунок 4.3 – Природні електромеханічна (а) та механічна (б) характеристики двигуна Д31

Задача 4.6. Для електроприводу механізму прийнятий двигун постійного струму з незалежним збудженням серії П-61:  $P_H = 14 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 78 \text{ А}$ ,  $U_H = 220 \text{ В}$ ,  $\omega_H = 104,7 c^{-1}$ ,  $R_{Я} = 0,172 \text{ Ом}$ ,  $R_{ДП} = 0,0655 \text{ Ом}$ ,  $J_{Д} = 0,4 \text{ кгм}^2$ .

Побудувати пускову діаграму електроприводу та визначити величини опорів ступенів пускового резистору.

Розв'язок.

Пусковий струм двигуна:

$$I_1 = (2 \dots 2,5) I_H = (2 \dots 2,5) \cdot 78 = 156 \dots 195 \text{ A}.$$

Струм перемикання двигуна:

$$I_2 = (1,1 \dots 1,2) I_H = (1,1 \dots 1,2) \cdot 78 = 85,8 \dots 93,6 \text{ A}.$$

Нехай  $I_1 = 165 \text{ A}$ , тоді при трьох ступенях пускового резистора струм перемикання:

$$I_2 = \sqrt[3]{\frac{I_1^4 R}{U_H}} = \sqrt[3]{\frac{165^4 \cdot 0,2375}{220}} = 92,8 \text{ A}.$$

входить у заданий діапазон.

На рисунку 4.4 наведена пускова діаграма електроприводу.

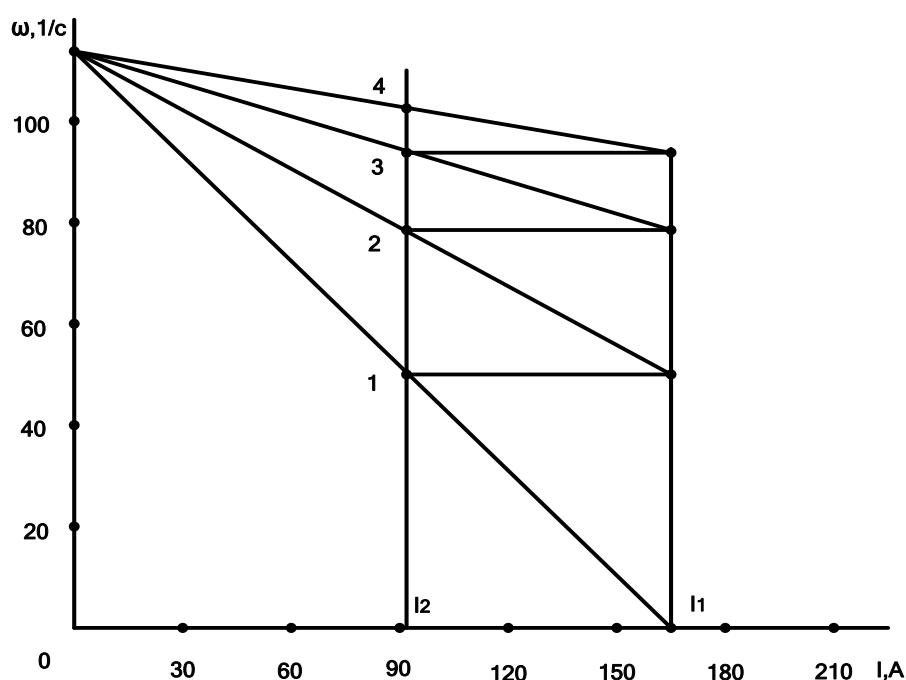


Рисунок 4.4 – Пускова діаграма електроприводу

Перепади швидкості між точками 1-2, 2-3, 3-4 за рисунком 4.4:

$$\Delta\omega_{12} = 28 \text{ c}^{-1}, \quad \Delta\omega_{23} = 15 \text{ c}^{-1}, \quad \Delta\omega_{34} = 9,5 \text{ c}^{-1}.$$

Величини опорів ступенів пускового резистора:

$$R_1 = \frac{c\Delta\omega_{12}}{I_2} = \frac{1,924 \cdot 28}{92,8} = 0,581 \text{ Ом}, \quad R_2 = \frac{c\Delta\omega_{23}}{I_2} = \frac{1,924 \cdot 15}{92,8} = 0,311 \text{ Ом},$$

$$R_3 = \frac{c\Delta\omega_{34}}{I_2} = \frac{1,924 \cdot 9,5}{92,8} = 0,197 \text{ Ом}.$$

Опір пускового резистора:

$$R_{II} = R_1 + R_2 + R_3 = 0,581 + 0,311 + 0,197 = 1,089 \text{ Ом}.$$

Перевірка пускового струму за формулою:

$$I_1 = \frac{U_H}{R + R_{II}} = \frac{220}{0,2375 + 1,089} = 165,8 \text{ А}$$

свідчить про достатню точність розрахунку.

Задача 4.7. Для електроприводу використовується електродвигун постійного струму незалежного збудження. Тип електродвигуна: П101.  $K_1=0,6$ ;  $K_2=0,6$ . Потрібно:

а) визначити час пуску електроприводу до кутової швидкості, що дорівнює номінальній кутовій швидкості обертання електродвигуна;

б) розрахувати і побудувати природню електромеханічну (швидкісну) характеристику двигуна;

в) визначити величини додаткових опорів, що включаються в коло якоря двигуна при переході його в режими динамічного гальмування і противмикання при умові, щоб пік струму, що виникає при цьому, не перевищував  $2I_n$ , а двигун при переключенні його в гальмівні режими працював на природній характеристиці з навантаженням:  $M_{c1} = k_1 M_n$ ;

г) визначити потужність двигуна в режимі його рекуперативного гальмування з активним моментом статичного опору  $M_{c2} = k_2 M_n$  при умові, що двигун працює в гальмівному режимі на природній механічній характеристиці. Паспортні дані двигуна П101:  $U = 220 \text{ В}$ ;  $P_n = 55 \text{ кВт}$ ;

$$n_{ном} = 1000 \text{ об / хв}; I_{ном} = 286 \text{ А}; n_{max} = 1500 \text{ об / хв}; \eta = 0,875; J = 2,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

*Розв'язок.*

Визначаємо час пуску двигуна:

$$t = J \frac{\omega_n}{M - M_c},$$

де  $\omega_n = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ c}^{-1}$  - номінальна кутова частота обертання якоря двигуна.

Момент інерції приводу:

$$J = 1,5 \cdot J_{об} = 1,5 \cdot 2,5 = 3,75 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Номінальний момент двигуна

$$M_n = 9,55 \cdot \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \cdot \frac{55000}{1000} = 525 \text{ Нм}.$$

Для нашого випадку час пуску двигуна визначиться за виразом

$$t = J \frac{\omega_n}{2M_n - M_c} = J \frac{\omega_n}{2M_n - k_1 M_n} = 3,75 \cdot \frac{104,7}{2 \cdot 525 - 0,6 \cdot 525} = 0,68 \text{ с}.$$

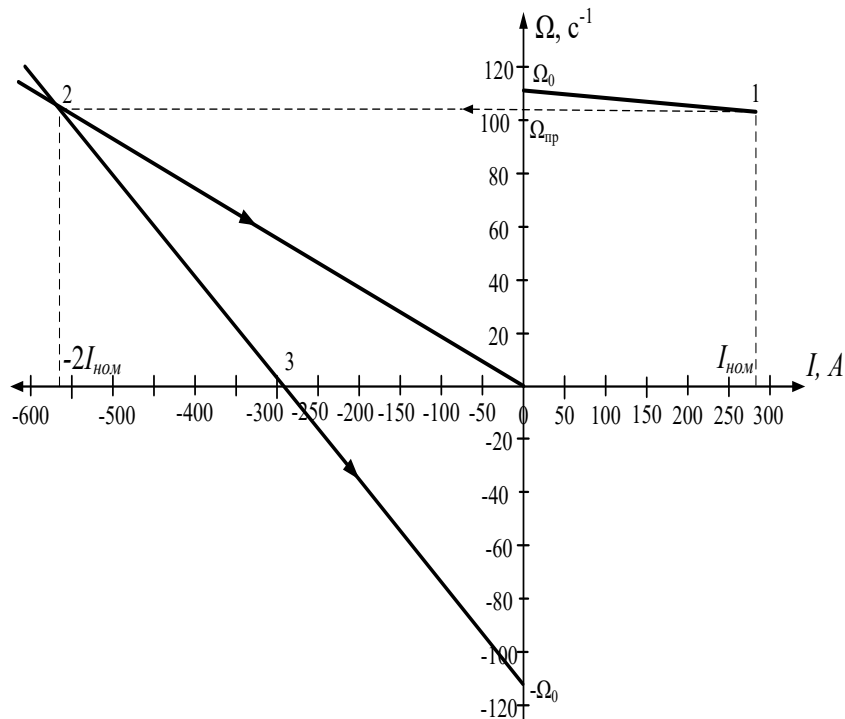


Рисунок 4.5 – Електромеханічні характеристики ДПС

*Розрахунок природньої електромеханічної характеристики двигуна:*

Опір якорного кола двигуна:

$$R_{я} = 0,5(1-\eta) \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = 0,5 \cdot (1-0,875) \cdot \frac{220}{286} = 0,048 \text{ Ом.}$$

Рівняння характеристики має вигляд прямої:

$$c = \frac{U_{ном} - I_{ном} \cdot R_{я}}{\omega_{ном}} = \frac{220 - 286 \cdot 0,048}{104,7} = 1,97.$$

$$\omega = \frac{U_{ном} - I_{ном} \cdot R_{я}}{c} = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{220}{1,97} - \frac{286 \cdot 0,048}{1,97} = 111,6 - 6,9 = 104,7 \text{ с}^{-1}.$$

Опір динамічного гальмування

$$\omega_c = \frac{U_{ном} - I_{c1} \cdot (R_{я} + R_{дз})}{c} = \frac{U_{ном} - 2I_{н} \cdot (R_{я} + R_{дз})}{c};$$

$$R_{дз} = \frac{c \cdot \omega_c}{2I_{ном}} - R_{я} = \frac{1,97 \cdot 107,5}{2 \cdot 286} - 0,048 = 0,32 \text{ Ом.}$$

$$\omega_c = \frac{U_{ном} - I_{c1} \cdot R_{я}}{c} = \frac{U_{ном} - k_1 I_{н} \cdot R_{я}}{c} = \frac{220 - 0,6 \cdot 286 \cdot 0,048}{1,97} = 107,5 \text{ с}^{-1}.$$

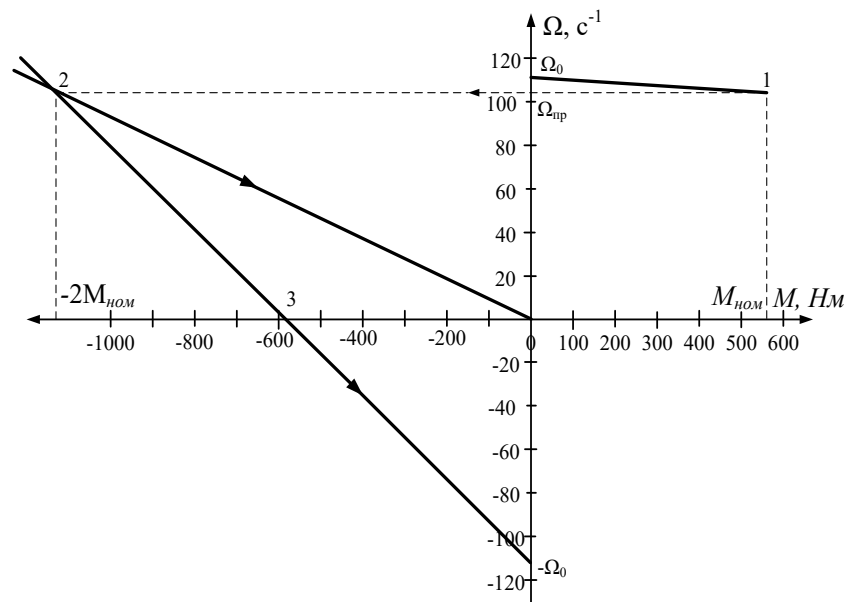


Рисунок 4.6 – Механічні характеристики ДПС

Номинальна ЕРС якоря

$$E_n = K_E \Phi n_{ном} = \frac{pN}{60a} \frac{c2\pi a}{pN} n_{ном} = c\omega_{ном} = 1,97 \cdot 104,7 = 206 \text{ В.}$$

$$E_n = c\omega_c = 1,97 \cdot 107,5 = 211 \text{ В.}$$

Рівняння характеристики противмикання

$$\omega = -\omega_0 - \Delta\omega = -\omega_0 - \frac{-2I_{ном}(R_{я} + R_{ГП})}{c}.$$

Опір в режимі противмикання

$$R_{ГП} = \frac{c(\omega_0 + \omega_c)}{2I_{ном}} - R_{я} = \frac{1,97 \cdot (104,7 + 107,5)}{2 \cdot 286} - 0,048 = 0,73 - 0,048 = 0,68 \text{ Ом.}$$

## Практичне заняття №5 РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*Мета роботи* – засвоїти на практиці методи регулювання швидкості обертання та способи отримання штучних характеристик електроприводів.

### *Теоретичні відомості*

Регулювання швидкості руху виконавчих органів здійснюється у багатьох механізмах. За допомогою електроприводу забезпечуються різні швидкості руху виконавчих органів, стабілізація швидкості на заданому рівні, а також зміна швидкості. Керування рухом виконавчих органів сучасних робочих машин та механізмів у більшості випадків досягається за рахунок цілеспрямованої дії на двигун за допомогою системи керування, що дозволяє регулювати швидкості двигуна та виконавчого органу.

Регулювання швидкості оцінюється шістьма основними показниками.

*Діапазон регулювання.* Цей показник визначається відношенням максимальної швидкості  $\omega_{\max}$  до мінімальної  $\omega_{\min}$  :

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \quad (5.1)$$

при заданій точності регулювання та заданих межах зміни моменту  $M_c$ .

*Стабільність швидкості.* Цей показник характеризує зміну швидкості  $\Delta\omega$  при можливих коливаннях статичного моменту  $\Delta M_c$  на валу двигуна та визначається жорсткістю механічних характеристик двигуна. Чим вона

більша, тим стабільніша швидкість при змінах статичного моменту й навпаки.

*Плавність регулювання швидкості.* Цей показник визначається зміною швидкості при переході від одної штучної характеристики на іншу. Часто для оцінки показника вводять поняття коефіцієнта плавності регулювання:

$$\varphi_{\omega} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}}, \quad (5.2)$$

де  $\omega_i$ ,  $\omega_{i-1}$  - значення швидкості двигуна на  $i$ -й та  $i-1$ -й ступенях регулювання, причому  $\omega_i > \omega_{i-1}$ ;  $\lim_{\omega_i \rightarrow \omega_{i-1}} \varphi_{\omega} = 1$ . Чим більше в заданому діапазоні регулювання швидкості може бути отримано штучних характеристик, тим плавніше буде здійснюватись регулювання швидкості.

*Напрямок регулювання швидкості.* Залежно від способу впливу на двигун розрізняють регулювання швидкості ввєрх від основної та вниз від основної.

*Допустиме навантаження двигуна.* Електричний двигун розрахований й спроектований таким чином, що, працюючи на природній характеристиці з номінальними швидкістю, струмом, моментом та потужністю, він не нагрівається вище допустимої температури, на яку розрахована його ізоляція. Оскільки нагрів двигуна визначається втратами енергії у ньому, пропорційним квадрату струму, його нормативний нагрів буде мати місце при протіканні допустимого струму двигуна. Зазначимо при цьому, що крім величини струму нагрів визначається й умовами охолодження.

При регулюванні швидкості двигун працює вже на штучних характеристиках. Для збереження нормативного нагріву двигуна навантаження двигуна має бути таким, при якому в двигуні протікає струм не вище допустимого. При правильному виборі способу регулювання швидкості двигун повністю використовується за своїми енергетичними показниками на всьому діапазоні зміни.

*Економічність регулювання швидкості.* Цей показник оцінюється за капітальними та експлуатаційними витратами.

У ряді випадків капітальні витрати оцінюються непрямими методами, наприклад за встановленою потужністю.

Експлуатаційні витрати, як правило, оцінюються непрямим методом, головним чином за енергетичними показниками: коефіцієнтом корисної дії (ККД) й коефіцієнтом потужності при регулюванні швидкості. У загальному випадку ККД та коефіцієнт потужності є функціями кутової швидкості  $\eta(\omega)$  й  $\cos \varphi(\omega)$ , в їх середні значення визначаються за формулами:

$$\eta_{CP} = \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \eta(\omega) d\omega, \quad (5.3)$$

$$\cos \varphi_{CP} = \frac{1}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \cos \varphi(\omega) d\omega. \quad (5.4)$$

Швидкість двигунів постійного струму можна регулювати трьома способами:

- 1) зміною опору кола якоря;
- 2) зміною магнітного потоку (струму збудження);
- 3) зміною напруги живлення.

При співставленні характеристик двигуна в процесі регулювання швидкості за вихідну будемо приймати швидкісну або механічну характеристику, отриману при номінальних значеннях напруги і струму збудження, а також при відсутності додаткових опорів в колі якоря. Такі характеристики називаються природними. В іншому випадку характеристики називаються штучними.

*Регулювання швидкості зміною опору кола якоря.* При вмиканні послідовно в коло якоря регулювального резистора  $R_{ад}$  (рис.5.1) збільшиться спад напруги, що призведе до зменшення ЕРС якоря. При  $\Phi = const$  зменшення ЕРС може відбутися за рахунок зниження швидкості. Отже резистором  $R_{ад}$  можна регулювати швидкість в бік її зменшення.

Рівняння швидкісної і механічної характеристики мають вигляд

$$\omega = \frac{U - I_a(R_a + R_{ад})}{c\Phi};$$

$$\omega = \frac{U - I_a(R_a + R_{ад})}{c\Phi} - \frac{M(R_a + R_{ад})}{c^2\Phi^2}, \quad (5.1)$$

Всі характеристики виходять з однієї точки, що відповідає швидкості при ідеальному неробочому ході ( $I_a = 0$  і  $M = 0$ )

$$\omega_0 = U / (c\Phi_0) \quad (5.2)$$

і чим більше значення  $R_{ад}$ , тим більше змінюється швидкість із збільшенням навантаження (характеристики стають менш жорсткими).

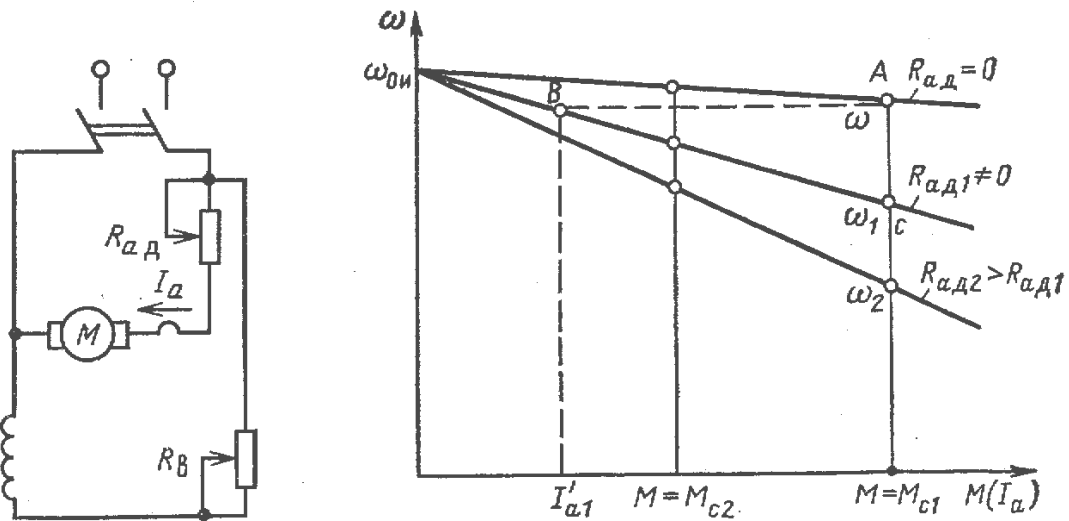


Рисунок 5.1 – Схема регулювання (а) і механічні характеристики (б) двигунів незалежного і паралельного збудження при різних значеннях  $R_{ад}$

Швидкість, з якою буде працювати двигун на штучній характеристиці в усталеному режимі, визначається точками перетину механічних характеристик двигуна і виробничого механізму.

Якщо прийняти характеристику статичного опору  $M_{c1} \approx M_2 = const$ , то згідно з рисунка 5.1, б кутові швидкості будуть дорівнювати  $\omega$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  і т.д. Отже, даним способом можна зменшувати швидкість у широких межах, аж до нульового її значення.

Перехід з однієї швидкості на іншу, наприклад з  $\omega$  на  $\omega_1$ , відбувається таким чином. Припустимо, що на природній характеристиці двигун працює в точці А з моментом  $M = M_{c1}$ . Швидкість при цьому дорівнює  $\omega$ , а струм в колі якоря  $I_a = (U - E) / R_a$ . При вмиканні резистора  $R_{ад1}$  в перший момент часу через механічну інерцію якоря швидкість не зміниться (двигун з точки А перейде в точку В). Тоді струм в колі якоря зменшиться і буде дорівнювати  $I'_{a1} = (U - E) / (R_a + R_{ад1})$ .

Електромагнітний момент  $M$ , що розвиває двигун при струмі  $I'_{a1}$ , стане меншим  $M_{c1}$ , і швидкість почне зменшуватись. Із зменшенням швидкості ЕРС також зменшиться, а струм в якорі збільшиться. Це буде відбуватися до тих пір, коли не наступить рівновага моментів  $M = M_{c1}$ , при цьому струм в якорі буде дорівнювати попередньому значенню  $I_{a1}$ , а швидкість  $\omega_1 < \omega$ .

При даному способі регулювання виникають значні втрати в регулювальному реостаті, що викликає пониження ККД.

Регулювання швидкості зміною опору кола якоря розглядалось для двигунів паралельного і незалежного збудження, але все сказане можна використати і для двигунів послідовного і змішаного збудження.

*Регулювання швидкості зміною магнітного потоку.* Регулювання магнітного потоку здійснюється зміною струму збудження. Оскільки в номінальному режимі двигун розрахований на роботу майже з найбільшим значенням потоку і струму збудження, то регулювання можна здійснити лише в сторону їх зменшення. Зменшення магнітного потоку призведе до збільшення швидкості, тобто в даному випадку здійснюється регулювання швидкості вгору від основної. Якщо не враховувати вплив реакції якоря, то швидкісні характеристики  $\omega = f(I_a)$  двигунів незалежного і паралельного збудження при  $U = const$  і  $I_s = const$  будуть являти собою прямі лінії.

Відповідно до певного значення потоку кожна із характеристик при ідеальному неробочому ході має свою швидкість. Всі швидкісні характеристики перетинаються з віссю абсцис в одній точці ( $\omega = 0$ ), що відповідає струму короткого замикання  $I_K = U / R_a$ .

**Задача 5.1.** Для електроприводу електромобіля вибрати двигун постійного струму незалежного збудження. Розрахувати та побудувати природну та штучні механічні характеристики при регулюванні швидкості: 1) напругою ( $U = 200$  В), 2) введенням додатковим опором в колі якоря ( $R_{дод} = 10R_{ном}$ ), 3) зміною магнітного потоку ( $k\Phi = 0,75k\Phi_{ном}$ ).

*Розв'язок.*

Для побудови природної характеристики ДПС НЗ необхідно мати дві точки: точка ідеального холостого ходу ( $\omega_0, M = 0$ ) та точка при номінальному моменті ( $\omega_{ном}, M_{ном}$ ). Для побудови штучної характеристики двигуна необхідно дві точки  $\omega_0$  та  $\omega_c$ .

Розрахуємо характеристику при регулюванні швидкості підведеною напругою. Знайдемо точку ідеального холостого ходу ДПС НЗ

$$\omega_{0U} = \frac{U}{k\Phi_{ном}}$$

$$\omega_{0U} = \frac{200}{1,33} = 150,41 / с.$$

Так як при регулюванні швидкості підведеною напругою величина падіння швидкості під навантаженням  $\Delta\omega_c$  не залежить від напруги живлення, тому

$$\omega_{cU} = \omega_{0U} - \frac{M_{ном} R_{я\Sigma}}{k\Phi_{ном}^2}.$$

$$\omega_{cU} = 150,4 - \frac{87 \cdot 0,465}{1,33^2} = 127,5 \text{ c}^{-1}.$$

Розрахуємо характеристику двигуна при введенні додаткового опору в колі якоря. При регулюванні швидкості додатковим опором в ланцюзі якоря швидкість ідеального холостого ходу не залежить від сумарного опору, тому

$$\omega_{0R} = \frac{U_{ном}}{k\Phi_{ном}}. \quad \omega_{0R} = \frac{230}{1,3} = 173 \text{ 1 / c}.$$

Швидкість під навантаженням

$$\omega_{cR} = \omega_{0R} - \frac{M_{ном} \cdot (R_{я\Sigma} + R_{доd})}{k\Phi_{ном}^2}.$$

$$\omega_{cR} = 173 - \frac{87 \cdot (0,465 + 10 \cdot 0,465)}{1,33^2} = -78,6 \text{ 1 / c}.$$

$$\omega_{cR} = 0, \quad M = 60 \text{ Нм}.$$

Розрахуємо характеристику при регулюванні швидкості двигуна при зміні магнітного потоку.

Швидкість ідеального холостого ходу

$$\omega_{0\Phi} = \frac{U_{ном}}{k\Phi}.$$

$$\omega_{0\Phi} = \frac{230}{0,75 \cdot 1,33} = 230,6 \text{ 1 / c}.$$

Швидкість під навантаженням

$$\omega_{c\Phi} = \omega_{0\Phi} - \frac{M_{ном} \cdot R_{я\Sigma}}{k\Phi^2}.$$

$$\omega_{c\phi} = 230,6 - \frac{87 \cdot 0,465}{(0,75 \cdot 1,33)^2} = 190 \text{ 1 / с.}$$

За результатами будуюмо характеристики (рис.5.2).

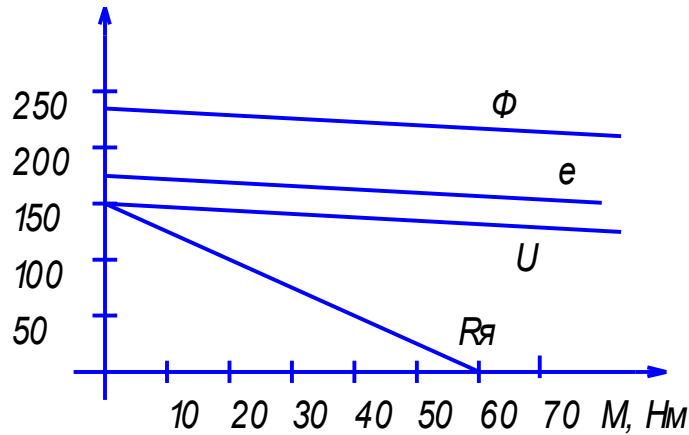


Рисунок 5.2 – Механічні характеристики ДПС НЗ

Задача 5.2. Паспортні дані двигуна постійного струму з незалежним збудженням подані у задачі 4.4. Визначити магнітний потік та струм збудження, за якими штучна механічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{ш} = 250 \text{ с}^{-1}$ ,  $M_{ш} = 15 \text{ Нм}$ .

*Розв'язок.*

Рівняння (5.2) з врахуванням того, що  $R = R_{я}$  та  $U = U_H$ , можна подати таким чином

$$\omega_{ш} (k\Phi_{ш})^2 - U_H k\Phi_{ш} + M_{ш} R_{я} = 0.$$

Це рівняння має два корені:

$$(k\Phi_{ш})_{1,2} = \frac{U_H}{2\omega_{ш}} \pm \sqrt{\frac{U_H^2}{4\omega_{ш}^2} - \frac{4M_{ш}R_{я}}{\omega_{ш}}} = \frac{220}{2 \cdot 250} \pm \sqrt{\frac{220^2}{4 \cdot 250^2} - \frac{4 \cdot 15 \cdot 0,38}{250}};$$

$$(k\Phi_{ш})_1 = 0,12 \text{ Вс}; (k\Phi_{ш})_2 = 0,76 \text{ Вс}.$$

Доцільно вибрати більший корінь, оскільки при цьому момент двигуна  $M_{ш}$  буде забезпечений при меншому струмі якоря.

Для визначення струму збудження  $I_{зШ}$  розрахуємо відносну величину знайденого магнітного потоку  $\frac{(k\Phi_{Ш})_2}{(k\Phi_H)} = \frac{0,76}{1,343} = 0,566$ , за якою за допомогою кривої намагнічування на рисунку 5.3 визначаємо відносний струм збудження  $I_{зШ}^* = \frac{I_{зШ}}{I_{зН}} = 0,54$ .

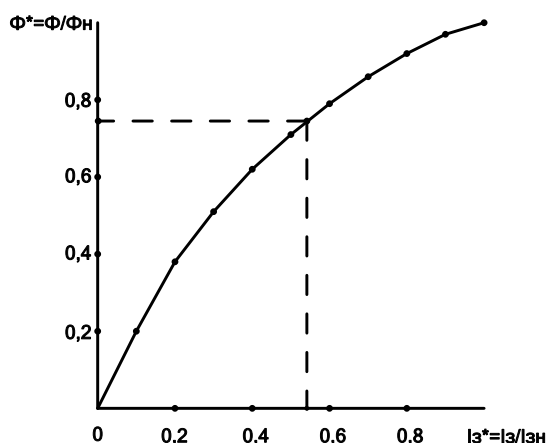


Рисунок 5.3 – Крива намагнічування двигуна постійного струму

Шуканий струм збудження

$$I_{зШ} = I_{зШ}^* I_{зН} = 0,54 \cdot 0,8 = 0,432 \text{ A}.$$

Задача 5.3. Для двигуна Д31 розрахувати опір додаткового опору  $R_d$ , при якому електромеханічна характеристика пройде через точку з координатами  $\omega_{Ш} = 50 \text{ c}^{-1}$ ,  $I_{Ш} = 40 \text{ A}$  та побудувати цю характеристику.

*Розв'язок.*

Сумарний опір обмоток якоря та збудження двигуна

$$R_{я} + R_{оз} = \frac{0,75 U_H (1 - \eta_H)}{I_H} = \frac{0,75 \cdot 220 (1 - 0,78)}{46,5} = 0,78 \text{ Ом}.$$

За природною характеристикою 1 (рис.5.1,а) для струму  $I_{Ш} = 40 \text{ A}$  знайдемо  $\omega_H = 90 \text{ c}^{-1}$ .

Додатковий опір

$$R_D = \left(1 - \frac{\omega_{ш}}{\omega_{п}}\right) \left(\frac{U_H}{I_{ш}} - R_{я} - R_3\right) = \left(1 - \frac{50}{90}\right) \left(\frac{220}{40} - 0,78\right) = 2,1 \text{ Ом.}$$

Задавшись низкою значень струму, за природною характеристикою 1 (рис.5.1,а) визначимо значення швидкості  $\omega_{п}$ . Далі за формулою

$$\omega_{ш} = \omega_{п} \frac{U_H - I_{ш} (R_{я} + R_{ОЗ} + R_D)}{U_H - I_{ш} (R_{я} + R_{ОЗ})}$$

обчислимо швидкості на штучній характеристиці 2  $\omega_{ш}$  для тих самих струмів. Результати розрахунків зведемо у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – До побудови природної електромеханічної характеристики

$I, A$	20	40	60	80	100
$\omega_{п}, c^{-1}$	130	90	74	60	48
$\omega_{ш}, c^{-1}$	103	50	20	-4	-23

На підставі таблиці 5.1 можна побудувати природну електромеханічну характеристику.

## Практичне заняття №6 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

*Мета роботи* – ознайомитися з методикою розрахунку електромеханічних параметрів електроприводів змінного струму

### *Теоретичні відомості*

Трифазний асинхронний двигун має обмотку статора, що підключається до трифазної мережі змінного струму з напругою  $U_1$  та частотою  $f_1$ , й обмотку ротора, яка може бути виконана за двома варіантами: з фазним або з короткозамкненим ротором. Електромеханічна характеристика асинхронного двигуна  $I'_2(s)$  може бути подана у вигляді

$$I'_2 = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}}, \quad (6.1)$$

де  $x_K = x_1 + x'_2$  - індуктивний фазний опір фази при короткому замиканні;  $U_\phi$  - фазна напруга;  $s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - ковзання.

На підставі закону енергетичного балансу та з врахуванням формули (6.1) можна отримати механічну характеристику АД  $M(s)$ :

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \right]}. \quad (6.2)$$

Дослідження залежності (8.2) на екстремум свідчить про наявність двох екстремальних точок:

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left( R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_K^2} \right)}, \quad (6.3)$$

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}}, \quad (6.4)$$

причому знак «+» в (6.3) та (6.4) відноситься до області ковзання  $s > 0$ , а знак «-» - до  $s < 0$ .

Механічну характеристику можна подати по-іншому, а саме

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (6.5)$$

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 x_K}, \quad (6.6)$$

$$s_K = \pm \frac{R'_2}{x_K}. \quad (6.7)$$

Якщо в (6.5) підставити  $M = M_H$  й  $s = s_H$  та позначити кратність моменту  $\lambda_M = \frac{M_K}{M_H}$ , то критичне ковзання можна знайти за формулою

$$s_K = s_H \left( \lambda_M \pm \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right). \quad (6.8)$$

Формулу (6.8) можна використовувати при визначенні  $s_K$  за каталожними (паспортними) даними асинхронного двигуна.

Задача 6.1. Асинхронний двигун має такі паспортні дані:  $P_H = 17,5 \text{ кВт}$ ,  $U_{1H} = 380 \text{ В}$ ,  $n_H = 940 \text{ об/хв}$ ,  $f_{1H} = 50 \text{ Гц}$ ;  $I_{1H} = 43 \text{ А}$ ;  $R_1 = 0,34 \text{ Ом}$ ;  $x_1 = 0,43 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 0,12 \text{ Ом}$ ;  $x_2 = 0,25 \text{ Ом}$ ;  $k = 2,66$ .

Розрахувати та побудувати природні електромеханічну та механічну характеристики двигуна.

*Розв'язок.*

Синхронна швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{1H}}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ с}^{-1}.$$

Приведені до статора значення індуктивного та активного опорів обмотки ротора й індуктивний опір короткого замикання:

$$x'_2 = x_2 k^2 = 0,25 \cdot 2,66^2 = 1,769 \text{ Ом}; \quad R'_2 = R_2 k^2 = 0,12 \cdot 2,66^2 = 0,849 \text{ Ом};$$

$$x_K = x_1 + x'_2 = 0,43 + 1,769 = 2,199 \text{ Ом}.$$

Для розрахунку електромеханічної характеристики  $I'_2(s)$  застосуємо формулу (6.11):

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,34 + \frac{0,849}{s}\right)^2 + 2,199^2}}.$$

Критичні момент та ковзання двигуна за формулами (6.3) та (6.4)

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_K^2}\right)} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \cdot \left(0,34 + \sqrt{0,34^2 + 2,199^2}\right)} = 270 \text{ Нм}.$$

$$s_K = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + x_K^2}} = \frac{0,849}{\sqrt{0,34^2 + 2,199^2}} = 0,382.$$

Розрахунок механічної характеристики проводимо за формулою (6.2)

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_K^2 \right]} = \frac{1177,4/s}{\left( 0,34 + \frac{0,849}{s} \right)^2 + 2,199^2}.$$

Результати розрахунку електромеханічної та механічної характеристик зведені у таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – До побудови електромеханічної та механічної характеристик

$s$	-2,6	-0,5	0	0,055	0,382	1	1,5
$\omega, c^{-1}$	376,9	157,1	104,7	98,9	64,7	0	-52,4
$I'_2, A$	100	85,1	0	13,8	65,2	88	92,5
$M, Нм$	-93,6	-353	0	84,4	270	188,4	138,8

За даними таблиці 6.1 будемо природні електромеханічну 1 та механічну 2 характеристики (рис.6.1).

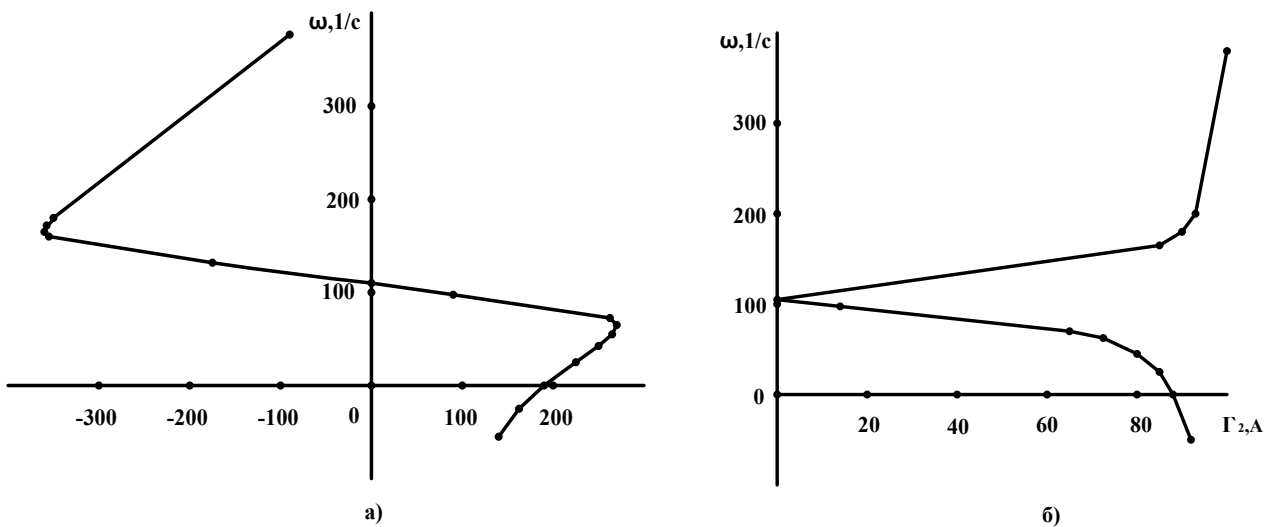


Рисунок 6.1 – Електромеханічна та механічна характеристики асинхронного двигуна

Задача 6.2. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії 4А має наступні номінальні дані, які вказані в таблиці.

Тип АД	$U_{1нф}, В$	$P_{2н}, кВт$	$s_n, \%$	$\eta_n$	$\cos\phi_n$	$K_n$	$K_{min}$	$K_{max}$
4АА56В4	220	0,18	8,9	0,64	0,64	2,1	1,5	2,2

Тут  $K_{п} = M_{пуск} / M_{ном}$  – пусковий коефіцієнт;  $K_{min} = M_{min} / M_{ном}$  – коефіцієнт мінімального моменту;  $K_{max} = M_{кр} / M_{ном}$  – коефіцієнт перевантажувальної властивості.

Знайти швидкість ідеального холостого ходу ( $\omega_0$  і  $n_0$ ), номінальну швидкість АД ( $\omega_{ном}$  і  $n_{ном}$ ), номінальний момент ( $M_{ном}$ ), номінальний струм фази ( $I_{ном}$ ). За допомогою спрощеної формули Клосса розрахувати та побудувати механічну характеристику АД.

*Розв'язок.*

Визначимо швидкість холостого ходу ( $\omega_0$  і  $n_0$ ) АД.

Для визначення швидкості необхідно знати число пар полюсів. Для цього з типу АД знаходимо число полюсів  $2p = 4$  та число пар полюсів  $p = 2$ .

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p}; \quad n_0 = \frac{60f}{p},$$

$$\omega_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 2 = 154 \text{ рад / с}, \quad n_0 = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об / хв.}$$

Визначимо номінальну швидкість ( $\omega_{ном}$  і  $n_{ном}$ ) АД

$$\omega_n = \omega_0 \cdot (1 - S_{ном} / 100), \quad n_n = n_0 \cdot (1 - S_{ном} / 100),$$

$$\omega_n = 154 \cdot (1 - 8,9 / 100) = 140,3 \text{ рад / с.}$$

$$n_n = 1500 \cdot (1 - 8,9 / 100) = 1366,5 \text{ об / хв.}$$

Визначимо номінальний момент

$$M_{ном} = \frac{P_{2ном}}{\omega_{ном}}, \quad M_{ном} = 180 / 140,3 = 1,28 \text{ Нм.}$$

Визначимо номінальний струм фази АД

$$I_{ном} = \frac{P_{2ном}}{mU_{\phi} \cos\phi_{ном} \eta_{ном}}, \quad I_{ном} = \frac{180}{3 \cdot 220 \cdot 0,64 \cdot 0,64} = 0,67 \text{ А.}$$

За допомогою формули Клосса розраховуємо координати точок механічної характеристики та зносимо результати розрахунку в таблицю 6.2.

$$M_i = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{S_i}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S_i}},$$

де  $M_{кр} = K_M \cdot M_{ном} = 2,2 \cdot 1,28 = 2,82$  Нм.

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}) = 0,089 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,37.$$

Результати розрахунку механічної характеристики зносимо в таблицю 6.2.

Таблиця 8.2 – Механічна характеристика АД типу 4А80А2

$S_i$	0	0,089	0,1	0,37	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$M_i$ , Нм	0	1,28	1,42	2,82	2,8	2,5	2,15	2	1,84

За даними розрахунку (табл.6.2) будемо природну механічну характеристику АД.

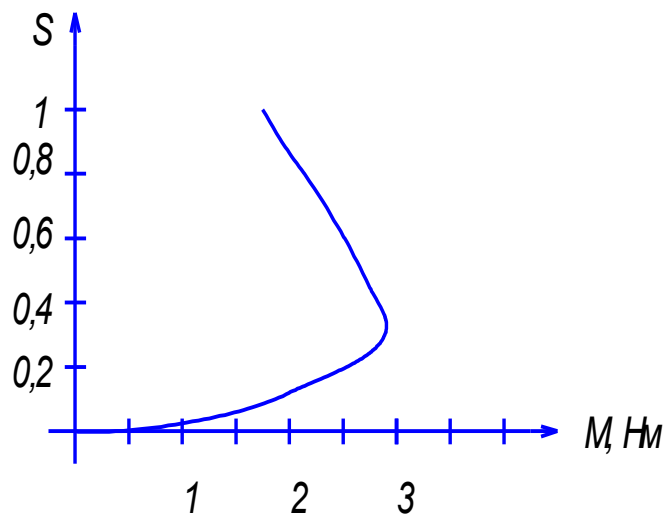


Рисунок 6.2 – Природна механічна характеристика АД

Задача 6.3. Вибрати трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії 4А для приводу транспортного засобу. Розрахувати та побудувати механічну характеристику при регулюванні швидкості напругою ( $U = 0,75U_{ном}$ ,  $f = f_{ном}$ ).

*Розв'язок.*

Регулювання швидкості АД напругою живлення ( $U = 0,75U_{ном}$ ,  $f = f_{ном}$ ).

Згідно задачі для розрахунку механічної характеристики АД при пониженій напрузі та незмінній частоті необхідно тільки перерахувати точки штучної характеристики за формулою

$$M_{ш} = M_{н} \cdot \left( \frac{U}{U_{н}} \right)^2$$

де  $M_{ш}$  – момент двигуна на штучній характеристиці при  $S_{ш}$ , Нм;  
 $M_{н}$  – момент на природній характеристиці, Нм;  
 $U$  – величина пониженої напруги, В;  
 $U_{н}$  – величина номінальної напруги, В.

Результати розрахунку штучної характеристики заносимо в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Механічна характеристика АД при  $U = 0,75U_{ном}$ ,  $f = f_{ном}$ .

$S_{н}$	0	0,089	0,1	0,37	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$M_{н}$ , Нм	0	1,28	1,42	2,82	2,81	2,52	2,15	2	1,84
$(U/U_{н})^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$	$0,75^2$
$M_{ш}$ , Нм	0	0,72	0,8	1,59	1,58	1,42	1,2	1,12	1

За даними таблиці будемо характеристики АД.

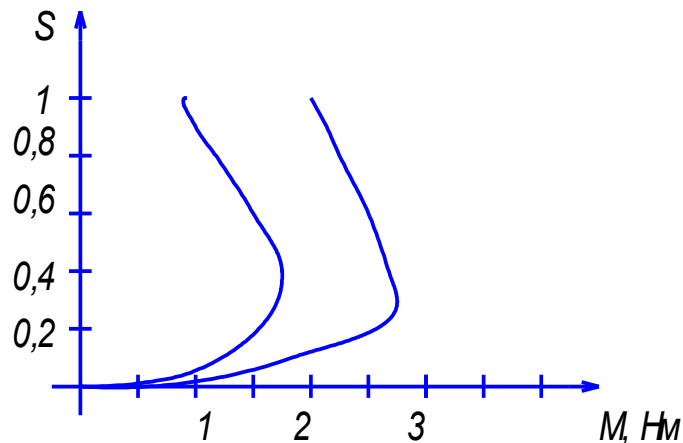


Рисунок 6.3 – Природна та штучна характеристики АД

## Практичне заняття №7 ОСОБЛИВОСТІ ТЯГОВИХ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

*Мета роботи* – ознайомитись з особливостями роботи синхронних електроприводів з постійними магнітами.

### *Теоретичні відомості*

Серед різних типів установок двигуна, добре зарекомендували себе електродвигуни на постійних магнітах (ПМ), особливо синхронні електродвигуни на постійних магнітах, в даний час є найбільш застосовними

типами двигунів для електромобілів (ЕМ). Їх ключові особливості: висока специфічна потужність та висока ефективність пояснюються використанням високоенергетичних матеріалів постійних магнітів і є домінуючими в електромобілях.

Зазвичай, матеріали постійних магнітів є ключовими для безщіткових електродвигунів. На постійних магнітах вони забезпечують тривалий термін придатності для двигунів.

Конфігурація системи безщіточних електричних двигунів на постійних магнітах для електричних силових установок подібні системам індукційних двигунів. Наприклад, впроваджуються конфігурації з одним або декількома двигунами, а також редукторні та безредукторні. Конфігурація системи з одним двигуном складається з безщіткового двигуна на постійних магнітах, інвертор з живленням від напруги, електронного контролера та деяких датчиків, як показано на рисунку 7.1.

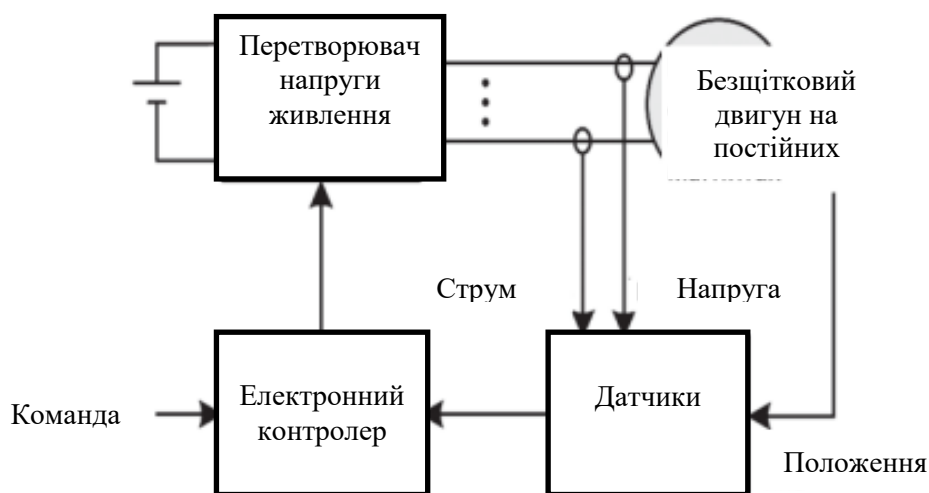


Рисунок 7.1 – Базова конфігурація системи з безщітковим електродвигуном

Якщо безщітковий двигун на постійних магнітах розроблений з синусоїдальним розподілом потоку повітряного зазору та розподіленим розташуванням обмоток статора, він працює як синхронний двигун, так званий синхронний двигун на постійних магнітах.

Як асинхронні двигуни, в синхронних двигунах на постійних магнітах використовують складні стратегії керування швидкістю, орієнтовані на векторне управління та прямий контроль крутного моменту, який зазвичай потребує дорівартісних датчиків положення, такий як абсолютний датчик положення або перетворювач.

Коли безщіточний двигун на постійних магнітах розроблений з трапецеїдальним розподілом потоку та концентрацією повітряного зазору через розташування обмоток статора, двигун працюватиме як двигун постійного струму, але без щіток.

Відповідне регулювання швидкості порівняно просте, в якому струми статора контролюються таким чином, що прямокутний струм належним чином збігається трапецієподібним потоком. Датчик положення необхідний, для забезпечення синхронізації струму з магнітним потоком. Необхідна роздільна здатність цього датчика положення не є обов'язковою, тому що для кожного електричного циклу він вимагає лише шести моментів перемикання. Взагалі тут можна використовувати дешевий датчик позиції Холла.

В останні роки безщіткові двигуни на постійних магнітах в певних позиціях витісняють асинхронні двигуни та стали кращими двигунами для електромобілів. Їх основні переваги такі:

- оскільки магнітне поле збуджується високоенергетичними постійними магнітами, загальна вага і об'єм можуть бути значно зменшені для даної вихідної потужності, що призводить до більшої густини потужності;

- через відсутність втрат у міді вони за своєю природою забезпечують вищу ефективність, тобто ККД;

- оскільки тепло в основному виникає у статорі, його можна ефективніше забрати в навколишнє середовище;

- оскільки збудження постійних магнітів не має ризику виробничих дефектів, перегрівання або механічних пошкоджень, вони по суті забезпечують більш високу надійність;

- через відсутність мідних обмоток у роторі вони мають нижчу електромеханічну постійну часу і, отже, кращі динамічні характеристики.

Однак ці двигуни все ще мають такі недоліки:

- оскільки високоенергетичні постійні магніти засновані на рідкоземельних елементах, їх вартість двигуна набагато вища, ніж вартість їх індукційних аналогів;

- оскільки постійні магніти розташовані в роторі, механічна міцність ротора занижена, особливо в частині зовнішньої установки;

- постійні магніти – це проблема для високої швидкості;

- із-за початкового неконтрольованого потоку постійних магнітів, діапазон роботи з постійно потужністю обмежений.

Основна структура безщіткового двигуна на постійних магнітах, включаючи типи синхронних двигунів на постійних магнітах показана на рисунку 7.2. В основному він складається зі статора, підключеного до трифазної обмотки якоря та ротора, з'єднаного з полюсами постійних магнітів.

Порівняно з індукційними двигунами це відносно прості двигуни. Крім того, враховуючи, що втрати тепла, у роторі лопасті вентилятора на роторі або на валу для примусового повітряного охолодження не потрібні.

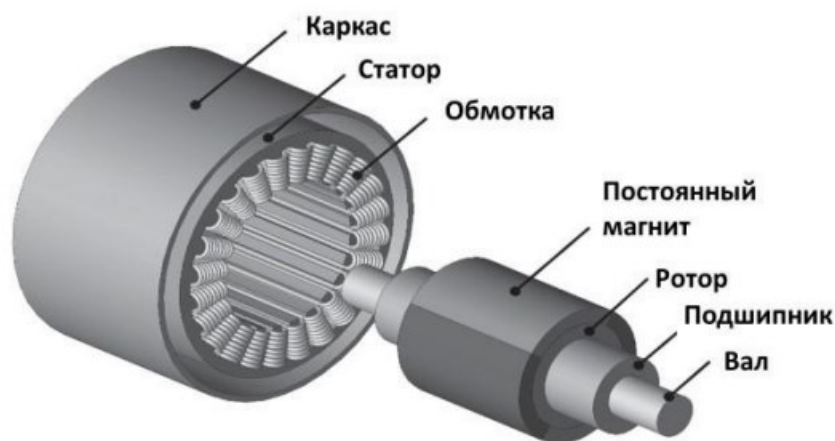


Рисунок 7.2 – Конструкція безщіткового двигуна на постійних магнітах

Замінивши обмотки збудження синхронного двигуна обмоткою з полюсами на роторі на постійних магнітах, можна легко створити синхронний двигун на постійних магнітах. Як звичайний синхронний двигун, в ньому статор має трифазну розподілену обмотку якоря. Коли на обмотку якоря подати трифазні синусоїдальні струми, створюється синхронний обертовий потік. Тому ротор на постійних магнітах з однаковою кількістю полюсів, так як обертовий потік повітряного зазору завжди обертається синхронно, що залежить від використовуваної частоти.

На основі розміщення постійних магніти в роторі синхронний електричний двигун на постійних магнітах можна додатково класифікувати як топологію з поверхневим монтажем, з внутрішньою вставкою, внутрішньою радіальною окружностями, в той час як статор у ньому такий же, як показано на рисунку 7.3.

Для топології із поверхневим монтажем, як показано на рисунку 7.3, а, постійні магніти просто приклеєні до поверхні ротора за допомогою епоксидного клею, що дає перевагу в простоті виробництва. Оскільки проникність постійних магнітів близька до проникності повітря, ефективний проміжок повітря являє собою суму фактичної довжини повітряного зазору та радіальної товщини постійних магнітів. Отже, відповідне поле реакції якоря слабе, а індуктивність обмотки статора невелика. Однак, оскільки індуктивність статора, що обертається вздовж осі  $d$  та вздовж осі  $q$ , майже однакова, його крутний момент опору майже дорівнює нулю. Крім того, є ймовірність того, що постійні магніти можуть злетіти під час роботи з великою швидкістю.

Для топології з поверхневою вставкою, як показано на рисунку 7.3, б, постійні магніти змонтовано на зовнішню частину ротора. Таким чином, індуктивність вздовж осі  $q$  стає вищою за індуктивність вздовж осі  $d$ , що створює додатковий реактивний крутний момент. Крім того, оскільки постійні магніти вставляються в ротор, він може забезпечити найкращу

механічну цілісність, ніж поверхнева конструкція, та протистояти відцентровій потужності під час роботи на висококих швидкостях.

Для внутрішньої радіальної топології, як показано на рисунку 7.3, в, постійні магніти радіально намагнічені і приховані всередині ротора. Порівняно з поверхневою технологією, ця топологія забезпечує надійний захист постійних магнітів, що ще більше збільшує механічну цілісність при роботі з великими швидкостями. Крім того, при цьому генерується додатковий момент опору. На відміну від поверхневого монтажу, внутрішня радіальна топологія використовує лінійні постійні магніти, які простіше монтувати і які легко механічно обробляти.

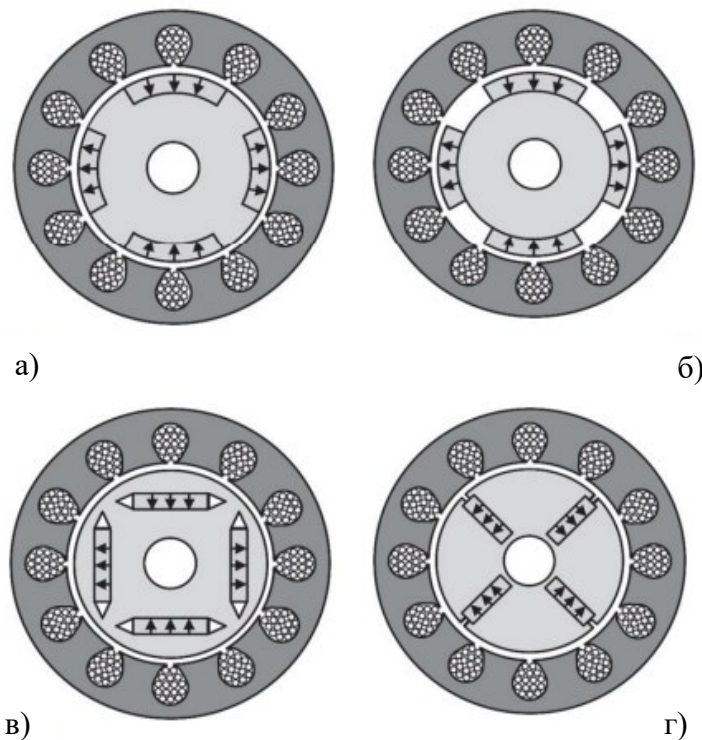


Рисунок 7.3 – Топології синхронних двигунів на постійних магнітах: а) – поверхневий монтаж, б) – поверхнєве врізання, в) – внутрішня радіальна і г) – внутрішняколова окружність

Для топології внутрішньої окружності, як показано на рисунку 7.3, г, постійні магніти намагнічені навколо кола і приховані всередині ротора. Це дає певну перевагу, яка полягає в тому, що густина потоку в повітряному зазорі може бути вищою, ніж залишковий постійний магніт, так званої концентрації потоку. Крім того, він має переваги хорошої механічної міцності та додаткового реактивного крутного моменту. Однак через значний витік потоку на внутрішніх кінцях постійних магнітів зазвичай необхідний немагнітний вал чи втулка, що може погіршити жорсткість валу на швидкості ротора.

Вищезгадані топології синхронних двигунів з внутрішнім ротором можуть бути легко застосовані в топологіях із зовнішнім ротором. Принцип дії синхронного двигуна на постійних магнітах із зовнішнім ротором такий же, як і його аналог із внутрішнім ротором. Топологія двигуна з зовнішнім ротором особливо краща для приводу всіх коліс автотранспортного засобу, оскільки відповідний зовнішній ротор має значно більший радіальний діаметр, який може вмістити велику кількість полюсів постійних магнітів, що забезпечує низьку швидкість прямої передачі та високий крутний момент.

При цьому структурна схема системи керування вентилювальним двигуном приймає вигляд, зображений на рисунку 7.4.

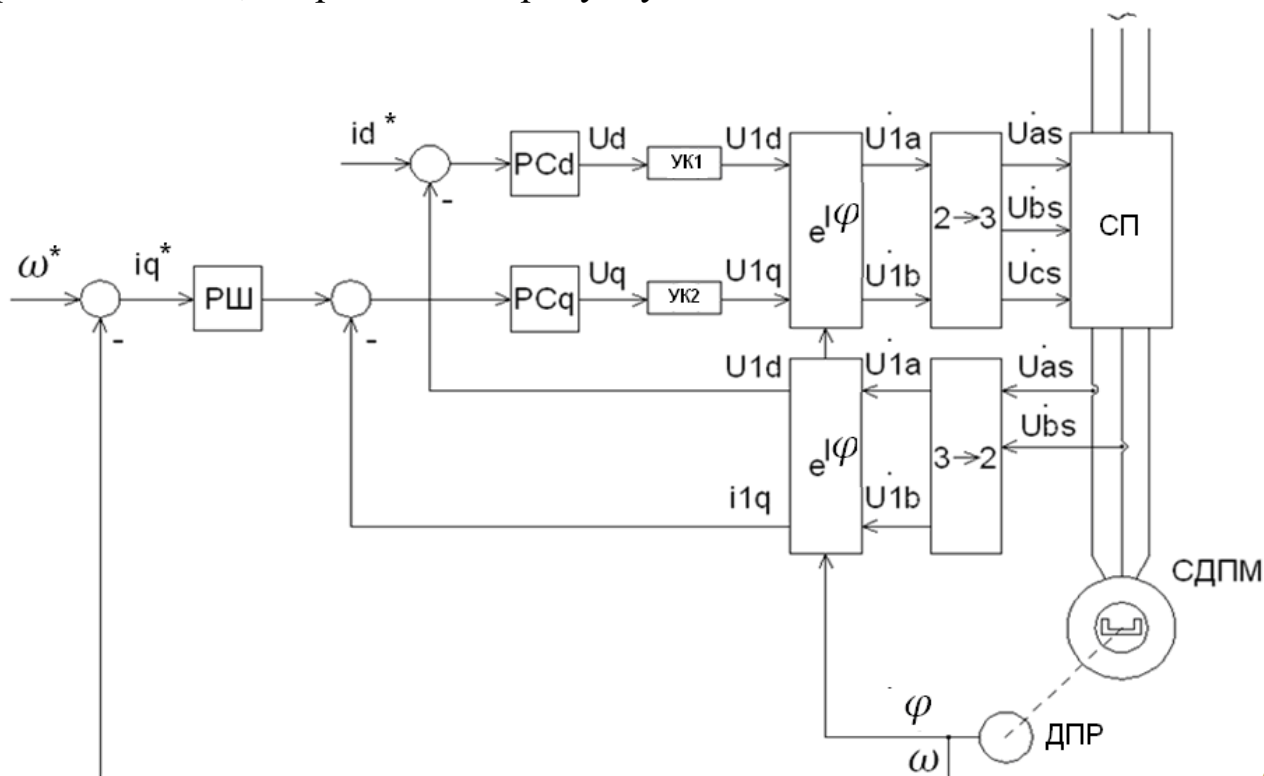


Рисунок 7.4 – Структурна схема електропривода системи СДПМ

На рисунку 10.4 введені наступні позначення:

(a-b) – нерухома система координат орієнтована по осі фази «а» статора;

(d-q) – система координат, що обертається синхронно з потокозчепленням ротора орієнтована за його напрямом;

СП – сервоперетворювач;

СДПМ – синхронний двигун з постійними магнітами;

ДПР – датчик положення ротора (датчик положення та швидкості);

РШ – регулятор швидкості;

РС – регулятор струму.

В разі використання такого перетворення і оцінки параметрів двигуна, кут повороту може бути визначений за швидкістю, відповідно до нижчезказаної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} \lambda_m \cdot i_f \cdot i_{1q} - M_c \right); \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_1} \left( -R_1 i_{1q} - L_m i_f \omega + U_q \right); \\ \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_1} \left( -R_1 i_{1d} + U_d \right). \end{aligned} \quad (7.1)$$

Окрім перетворювачів координат система має також і перетворювачі фаз (з двох в три і навпаки). Необхідність в таких елементах пов'язана з тим що вектор має дві проекції, а кількість фаз статорної обмотки – три.

На низьких швидкостях помилка в оцінюванні швидкості, й, відповідно, положення є досить суттєвою. Це зумовлене досить незначною складовою електрорушійної сили двигуна, за якою й визначається швидкість. Тому, для низьких швидкостей реалізується робота в режимі обмеження струму статора, й відповідно режимі керування моментом. При підвищенні швидкості обертання перетворювач частоти переходить в режим керування швидкістю, фактично формуючі, так звану, екскаваторну характеристику, зовнішній вигляд якої представлений на рисунку 7.5.

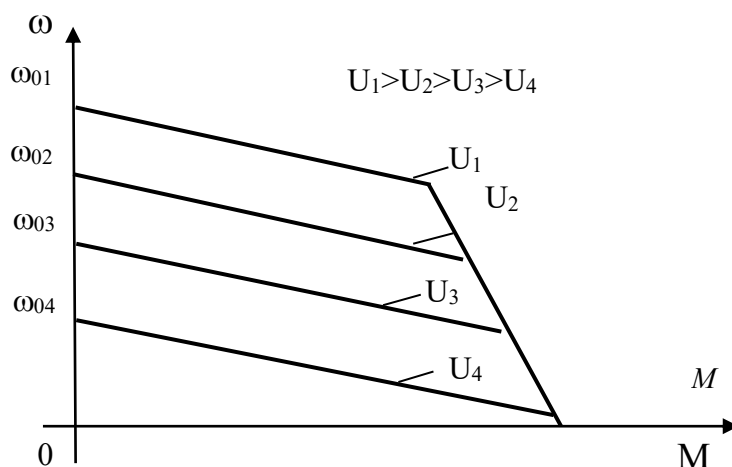


Рисунок 7.5 – Механічні характеристики синхронного двигуна

Слід відзначити, що досягнення абсолютної жорсткості при такому методі керування неможливо, оскільки швидкість безпосередньо не вимірюється, а оцінюється в самому перетворювачі частоти.

## Практичне заняття №8 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

*Мета роботи* – засвоєння аспектів моделювання перехідних динамічних та статичних процесів в електроприводах.

### *Теретичні відомості*

Моделювання є потужним інструментом дослідження фізичних об'єктів, зокрема електротехнічних. На практиці експеримент може виявитись надто коштовним, а змодельовавши деякі режими роботи пристроїв можна запобігти таким явищам як перегрів їх обмоток, робота пристроїв з тривалим перевантаженням тощо. Звідси можна робити висновки про працездатність або універсальність моделі [3].

Математичне моделювання режимів роботи асинхронних двигунів є складним із-за потреби опису складних електромагнітних та механічних процесів. Таким чином, побудова математичної моделі реального фізичного об'єкту реалізується вмілим поєднанням законів електротехніки та формою подання системи диференціальних рівнянь

У даній роботі для моделювання використовується математичний апарат [3], що спирається на теорію нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язок яких можливий при правильному застосуванні числових методів, орієнтованих на комп'ютерну техніку. Класичні методи електромеханіки не здатні розв'язати задачі розрахунку перехідних процесів в електротехнічних пристроях.

В паспорті асинхронного двигуна вказані інші величини, такі як потужність на валу, номінальна швидкість обертання ротора, коефіцієнт потужності, ККД, величини напруг і струмів при різних схемах з'єднання або інші, що фігурують відносними параметрами схеми заміщення і приведені в довідниках [1, 2]. Для практичного користування даною моделлю необхідно знати резистивні опори обмоток статора і ротора  $R_1, R_2$ , обернені індуктивності дисипації  $\alpha_1, \alpha_2$  обмоток, основну обернену індуктивність вітки намагнічування, момент інерції махових мас  $J$ , кількість пар магнітних полюсів  $p_0$ , напругу обмотки статора  $U_1$  і механічний момент навантаження на валу ротора  $M_{мех}$ .

Покажемо на прикладі методіку розрахунку обернених індуктивностей та опорів на прикладі асинхронного двигуна серії 4А112МА8У3 і пізніше ці параметри використаємо для моделювання.

Паспортні дані двигуна:  $P_{ном} = 2,2$  кВт,  $n_{ном} = 730$  об/хв,  $\eta = 0,765$  в.о.,

$\cos\varphi = 0,71$  в.о.,  $X_\mu = 1,5$  в.о.,  $R_1' = 0,093$  в.о.,  $X_1' = 0,11$  в.о.,  $R_2'' = 0,083$  в.о.,

$X_2'' = 0,17$  в.о. Величини індуктивностей статора  $L_1$  і ротора  $L_2$  визначаються розрахунковим шляхом, виходячи із заздалегідь відомих

паспортних даних електродвигуна і параметрів  $\Gamma$ -подібної або  $T$ -подібної схеми заміщення, або дослідним шляхом.

Для отримання необхідних параметрів, скористаємося приведеними параметрами  $\Gamma$ -подібної схеми заміщення (рис.8.1) для асинхронного двигуна серії 4А у відносних одиницях [1].

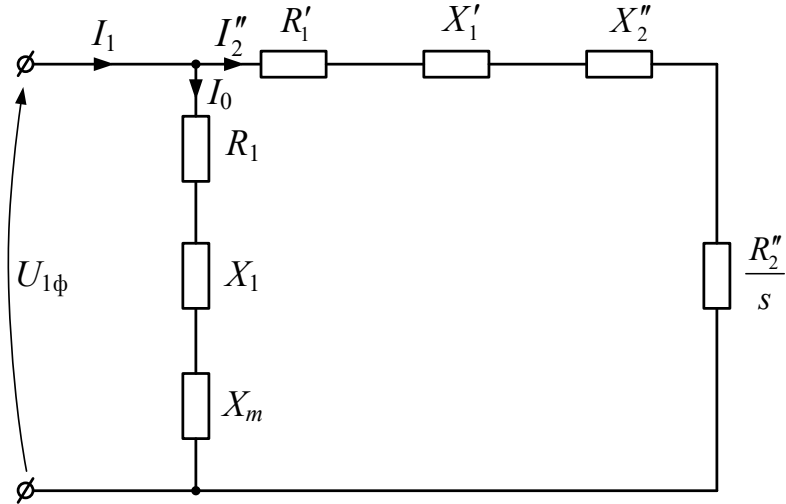


Рисунок 8.1 – Схема заміщення обмоток АД

Виконаємо перерахунок параметрів АД. Перейдемо до абсолютних значень опорів

$$r = R' \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}; \quad x = X' \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}} \quad (8.1)$$

або в розгорнутій формі

$$\begin{aligned} x_m &= X_m \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}; \\ r_1' &= R_1' \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}; \quad x_1' = X_1' \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}; \\ r_2'' &= R_2'' \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}; \quad x_2'' = X_2'' \cdot \frac{U_{\text{ф.ном}}}{I_{\text{ф.ном}}}, \end{aligned} \quad (8.2)$$

де номінальний фазний струм двигуна беремо з довідника [2] або розраховуємо за формулою

$$I_{\phi.\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{3 \cdot U_{\phi.\text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (8.3)$$

Згідно з [1], знаходимо значення індуктивного опору розсіяння фази обмотки статора

$$x_{\sigma 1} \approx \frac{2x_1' x_m}{x_m + \sqrt{x_m^2 + 4x_1' \cdot x_m}}. \quad (8.4)$$

Далі, виходячи з [2], визначаємо опори фази статора  $r_1, x_1$

$$r_1 = \frac{r_1'}{m_T}, \quad (8.5)$$

де  $m_T$  – коефіцієнт приведення активного опору до розрахункової робочої температури [1], [2], що визначається класом ізоляції за нагрівостійкістю (для класів ізоляції  $F$  і  $H$ ,  $m_T = 1,38$ )

$$x_1 = \frac{x_1'}{1 + \tau_1} - r_1 \rho_1, \quad (8.6)$$

де  $\tau_1, \rho_1$  – відповідно коефіцієнти розсіяння та опору фази статора

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_m}, \quad \rho_1 = \frac{r_1 m_T}{x_1 + x_m}. \quad (8.7)$$

Розв'язавши сумісно (8.5), (8.6), (8.7), визначимо опори обмотки ротора  $r_2', x_2'$

$$\begin{aligned} r_2' &= \frac{r_2''}{m_T (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2)}; \\ x_2' &= \frac{x_2''}{(1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2)}. \end{aligned} \quad (8.8)$$

Звідси обернені індуктивності двигуна обчислимо за формулами

$$\alpha_1 = \frac{1}{L_1} = \frac{\omega}{x_1}; \quad \alpha_2' = \frac{1}{L_2} = \frac{\omega}{x_2'}; \quad \alpha_m = \frac{1}{L_m} = \frac{\omega}{x_m}, \quad (8.9)$$

де  $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Гц} = 314 \text{ с}^{-1}$  – кутова частота напруги мережі.

Застосувавши середовище MATCAD отримано такі розраховані параметри АД:  $r_1 = 2,415 \text{ Ом}$ ;  $r_2' = 1,89 \text{ Ом}$ ;  $\alpha_1 = 88,8 \text{ Гн}^{-1}$ ;  $\alpha_2' = 58,7 \text{ Гн}^{-1}$ ;  $\alpha_m = 5,84 \text{ Гн}^{-1}$ .

Для розв'язання поставленої задачі користуємось  $A$ -моделлю в косокутних координатах [3]. Диференціальні рівняння електромагнітного стану двигуна запишемо в нормальній формі Коші в матричній формі

$$\frac{dI}{dt} = A(U - RI), \quad (8.10)$$

де  $I$ ,  $U$ ,  $R$  – матриці струмів, напруг і опорів.

Функції двох напруг мережі, що прикладаються до обмотки статора є заданими, а кутова частота напруг мережі постійна

$$I = \begin{bmatrix} I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{2A} \\ I_{2B} \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{2A} \\ U_{2B} \end{bmatrix};$$

$$R = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2R_{1A} + R_{1C} & R_{1C} - R_{1B} & & \\ R_{1C} - R_{1A} & 2R_{1B} + R_{1C} & & \\ & & 2R_{2A} + R_{2C} & R_{2C} - R_{2B} \\ & & R_{2C} - R_{2A} & 2R_{2B} + R_{2C} \end{bmatrix}. \quad (8.11)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_{1A} \\ u_{1B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_m \sin \omega t \\ u_m \sin(\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix}, \quad \omega = \text{const}. \quad (8.12)$$

Оскільки асинхронний двигун є симетричним приймачем електроенергії, модель формуємо на основі змінних двох фаз  $A$  та  $B$ . Величина третьої легко фази знаходиться за I законом Кірхгофа. Матриця

опорів обмоток статора й ротора (8.11) також вироджується у скаляр  $R_{1A} = R_{1B} = R_{1C} = R_1$ ;  $R_{2A} = R_{2B} = R_{2C} = R_2$ .

Перепишемо рівняння (8.10) в розгорнутій формі

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= A_{11}(U_1 - R_1 I_1) + A_{12}(\Omega_2 \Psi_2 - R_2 I_2); \\ \frac{dI_2}{dt} &= A_{21}(U_1 - R_1 I_1) + A_{22}(\Omega_2 \Psi_2 - R_2 I_2), \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

де  $i_1 = (i_{1A}, i_{1B})_t$ ,  $i_2 = (i_{2A}, i_{2B})_t$  – колонки фазних струмів обмоток статора й перетворених струмів ротора двигуна;

$A_{11}, A_{22}, A_{12}, A_{21}$  – матриці коефіцієнтів двигуна;

$R_1, R_2$  – опори обмоток статора і ротора;

$\Omega$  – матриця кутової швидкості.

Використання косокутної системи координат [3] дає змогу жорстко пов'язати їх з обмоткою статора, тобто

$$\Omega_1 = 0, \quad \Omega_2 = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.14)$$

Слід відмітити, що насичення магнітопроводу в асинхронних двигунах враховується рідко. Воно спостерігається при динамічному, конденсаторному, вентильному гальмуваннях, перенапругах тощо.

Колонка повних потокозчеплень обмотки ротора  $\Psi_2 = (\Psi_{2A}, \Psi_{2B})_t$  має вигляд

$$\Psi_{2j} = \frac{I_{1j} + I_{2j}}{\alpha_m} + \frac{I_{2j}}{\alpha_2}; \quad j = A, B. \quad (8.15)$$

Рівняння електромагнітного стану слід доповнити рівнянням механічного руху

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0}{J} (M_{em} - M_{mex}); \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega; \quad n = \frac{30\omega}{\pi}. \quad (8.16)$$

де  $p_0$  – число пар магнітних полюсів машини;

$J$  – момент інерції ротора;

$M_{em}$  – електромагнітний момент;

$M_{mex}$  – механічний момент;

$\gamma$  – кут повороту ротора,

$n$  – швидкість обертання ротора.

Сформуємо матрицю коефіцієнтів  $A$  двигуна

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; \quad A_{11} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} & 0 \\ 0 & \alpha_1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} \end{bmatrix};$$

$$A_{12} = A_{21} = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} & 0 \\ 0 & -\frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} \end{bmatrix}; \quad A_{22} = \begin{bmatrix} \alpha_2 - \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} & 0 \\ 0 & \alpha_2 - \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} \end{bmatrix}. \quad (8.17)$$

Вираз для моменту  $M_{em}$  має вигляд [3]

$$M_{em} = \sqrt{3} p_0 \alpha_m (I_{2A} I_{1B} - I_{2B} I_{1A}). \quad (8.18)$$

Як приклад реалізації моделі проаналізуємо пуск асинхронного двигуна з номінальним навантаженням та подальший накид навантаження. Момент навантаження на валу є вентиляторним

$$M_{mex}(n) = 7,5 - 0,417n + 0,0113n^2 - 5,1 \cdot 10^{-6} n^3 - 7 \cdot 10^{-10} n^4. \quad (8.19)$$

Номінальна напруга живлення обмотки статора  $U_{ном} = 380/220$  В, номінальна потужність на валу  $P_{ном} = 2200$  Вт, момент інерції  $J = 0,07$  кг·м<sup>2</sup>, номінальна швидкість обертання ротора  $n_{ном} = 730$  об/хв.

Змодельовано пуск до усталеної номінальної швидкості обертання з механічним моментом на валу (11.19). В момент 1 сек. на вал накладається навантаження  $M_{mex}(n) = 23 - 0,417n + 0,0113n^2 - 5,1 \cdot 10^{-6} n^3 - 7 \cdot 10^{-10} n^4$ .

На рисунках 8.2, 8.3, 8.4 показано графіки швидкості обертання ротора та перехідні процеси струму фази статора двигуна та електромагнітного моменту.

З графіків видно, що двигун виходить на усталений процес за 0,2 с до 726 об/хв., після накиду навантаження швидкість зменшується до 711 об/хв. Тут же спостерігається незначне перерегулювання швидкості (до 10 об/хв.),

що є можливим у реальних машинах. Середній пусковий струм становить 35 А, номінальний 5,5 А, після накиду навантаження 8,2 А.

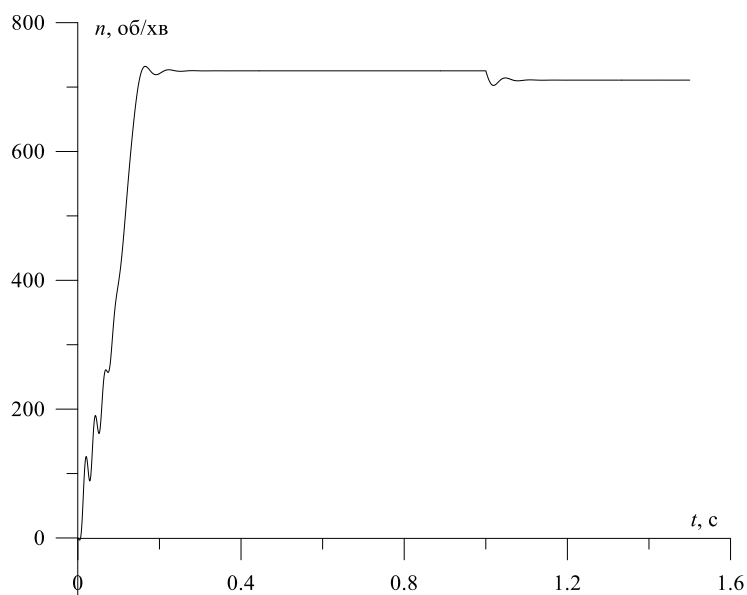


Рисунок 8.2 – Графік швидкості обертання ротора АД

Пусковий момент становить 62 Нм, номінальний 30 Нм, після накиду навантаження 45 Нм. Розраховані значення відповідають класичним методикам теорії та розрахунку електричних машин.

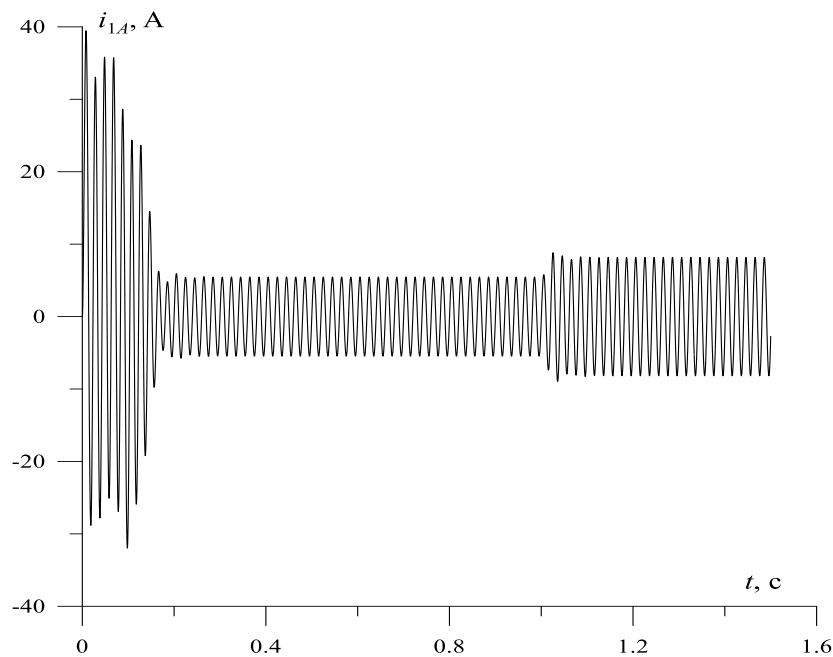


Рисунок 8.3 – Струм обмотки статора АД

Запропонована методика дає змогу розраховувати потрібні параметри для нашої моделі, описати перехідні процеси в асинхронних двигунах дифе-

ренціальними рівняннями в нормальній формі Коші. Такі рівняння нежорсткі й інтегруються простими в комп'ютерній реалізації явними методами.

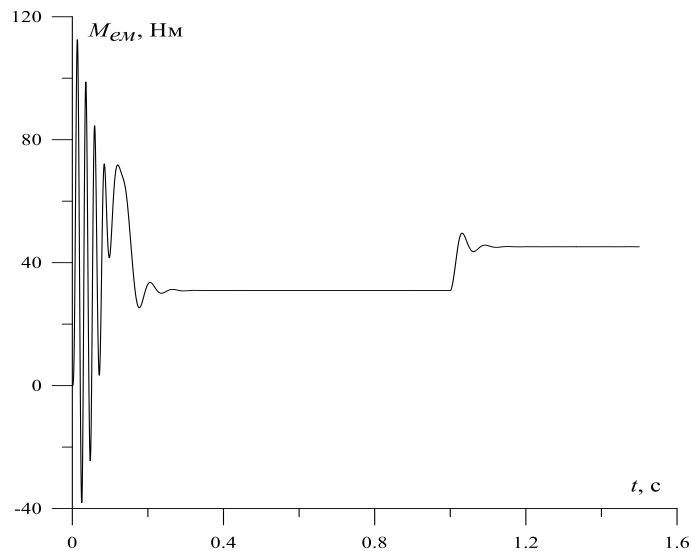


Рисунок 8.4 – Електромагнітний момент АД

Математична модель асинхронного двигуна дає змогу аналізувати роботу двигуна як автономно, так і елемента автотранспортного засобу.

### Практичне заняття №9 ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

*Мета роботи* – ознайомитись з методиками дослідження та розрахунку перехідних процесів в електроприводах.

#### *Теоретичні відомості*

Дослідження перехідних процесів в електроприводах має першорядне значення, оскільки дозволяє визначити не тільки умови роботи електродвигуна, але й можливості робочої машини по відношенню продуктивності, швидкодії, граничних прискорень, максимальних зусиль та моментів, які визначають надійність механізмів.

На перехідні режими перш за все впливає механічна інерція вузлів, які рухаються обертально або поступально, у тому числі якоря (ротора) власне двигуна. Дуже часто механічна інерція є визначальною у перехідних процесах й тільки її необхідно враховувати. Іноді дуже суттєвий вплив оказують електромагнітні процеси, які протікають у електричних колах двигунів. При контакт орному керуванні процеси носять розривний характер й розрахунки відповідно приходиться вести по ділянках, використовуючи для кожній ділянці свої параметри кіл. Зі зростанням вимог до швидкодії електроприводів приходиться більш повно та з більшою степінню точності враховувати електромагнітні явища.

При лінійних характеристиках двигуна та виконавчого органу динамічний момент також лінійно залежить від швидкості. Такі перехідні процеси характерні для електроприводів з двигунами постійного струму з незалежним збудженням та іншими двигунами, характеристики яких можуть бути частково або повністю подані прямими лініями.

На рисунку 9.1 наведені лінійні механічні характеристики двигуна 1 та виконавчого органу 2, які побудовані за рівняннями

$$\begin{aligned} M &= M_{K3} - \beta\omega, \\ M_C &= M_{CO} - \beta_C\omega, \end{aligned} \quad (9.1)$$

де  $\beta = \frac{c^2}{R}$ ;

$M_{K3}$  та  $M$  - моменти двигуна та виконавчого органу при нульовій швидкості.

Підставляючи ці вирази у рівняння руху, отримаємо

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_{VCT}, \quad (9.2)$$

де  $T_M = \frac{J}{\beta + \beta_C}$  - електромеханічна стала часу;

$\omega_{VCT} = \frac{M_{K3} - M_{CO}}{\beta + \beta_C}$  - усталена швидкість, яка відповідає точці перетину

характеристик двигуна та виконавчого органу.

При початкових умовах:  $t = 0, \omega = \omega_{Поч}$  рівняння (9.2) має розв'язок

$$\omega(t) = (\omega_{Поч} - \omega_{VCT}) e^{-\frac{t}{T_M}} + \omega_{VCT}. \quad (9.3)$$

Момент двигуна буде змінюватись з часом за законом

$$M(t) = (M_{Поч} - M_{VCT}) e^{-\frac{t}{T_M}} + M_{VCT}. \quad (9.4)$$

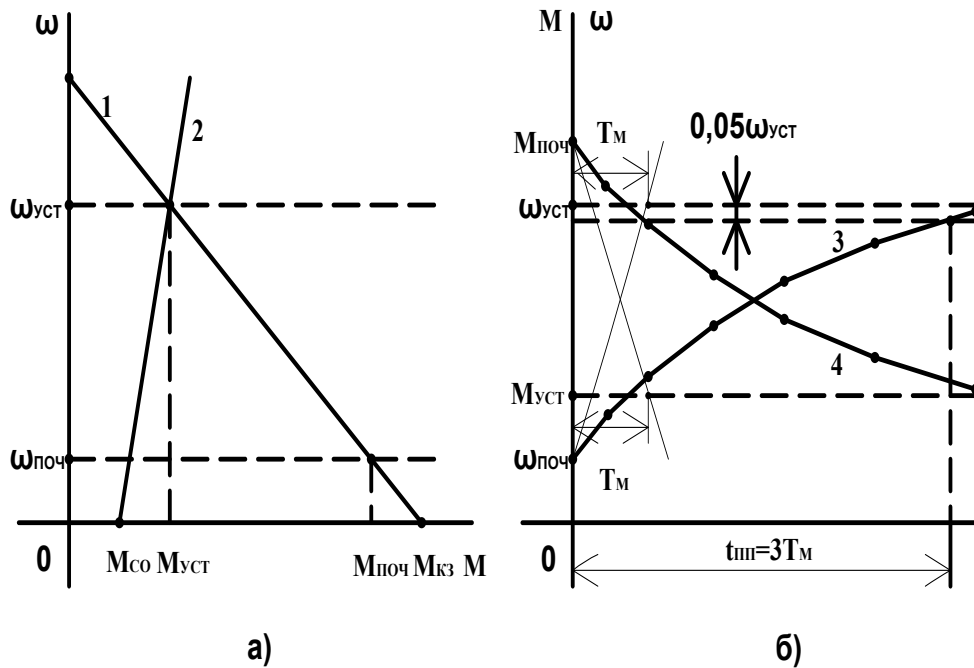


Рисунок 9.1 – Лінійні механічні характеристики двигуна та виконавчого органу (а) й графіки переходного процесу розбігу електроприводу (б)

Для поширеного в практиці випадку, коли  $\beta_C = 0$ , параметри, які входять в (9.3) та (9.4), спрощуються й приймають вигляд

$$T_M = \frac{J}{\beta} = \frac{J\omega_0}{M_{K3}}; \quad \omega_{уст} = \frac{M_{K3} - M_C}{\beta}.$$

Час переходного процесу  $t_{пер}$ , за який швидкість зміниться від деякого початкового рівня  $\omega_{поч}$  до кінцевого  $\omega_{кін}$  або момент від  $M_{поч}$  до  $M_{кін}$ , визначається за формулою

$$t_{пер} = T_M \ln \frac{\omega_{уст} - \omega_{поч}}{\omega_{уст} - \omega_{кін}} = T_M \ln \frac{M_{уст} - M_{поч}}{M_{уст} - M_{кін}}. \quad (9.5)$$

Теоретично, як це впливає з (9.5), час переходного процесу є нескінченно великим. Тому в технічних розрахунках оперують з так званим практичним часом переходного процесу  $t_{пер} = 3T_M$ . За цей інтервал часу швидкість досягає 95% від усталеного значення (рис.9.1,б).

Задача 9.1. Розрахувати та побудувати криві перехідного процесу  $\omega(t)$  й  $M(t)$  при лінійної характеристики двигуна та наступних вихідних даних:  $\omega_{\text{поч}} = 0$ ;  $\omega_{\text{уст}} = 150 \text{c}^{-1}$ ;  $M_{\text{поч}} = M_{\text{кз}} = 100 \text{Нм}$ ;  $\omega_0 = 200 \text{c}^{-1}$ ;  $M_{\text{уст}} = M_{\text{с}} = 40 \text{Нм}$ ;  $J = 0,1 \text{кгм}^2$ . Оцінити практичний час перехідного процесу.

*Розв'язок.*

Електромеханічна стала часу електроприводу

$$T_M = \frac{J\omega_0}{M_{\text{кз}}} = \frac{0,1 \cdot 200}{100} = 0,2 \text{с}.$$

Закон зміни швидкості електроприводу за формулою (9.3)

$$\omega(t) = (0 - 150)e^{-\frac{t}{0,2}} + 150 = 150 \left( 1 - e^{-\frac{t}{0,2}} \right).$$

Закон зміни моменту електроприводу за формулою (9.4)

$$M(t) = (100 - 40)e^{-\frac{t}{0,2}} + 40 = 60e^{-\frac{t}{0,2}} + 40.$$

Результати розрахунку  $\omega(t)$  та  $M(t)$  подані у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Розраховані величини електроприводу

$t, \text{с}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\omega(t), \text{с}^{-1}$	0	59	94,8	116,5	129,7	137,7	142,5
$M(t), \text{Нм}$	100	76,4	62,1	53,4	48,1	44,9	43

За даними таблиці 9.1 на рисунку 9.2 побудовані криві перехідного процесу  $\omega(t)$  та  $M(t)$ . Практичний час перехідного процесу  $t_{\text{III}} = 3 \cdot 0,2 = 0,6 \text{с}$ .

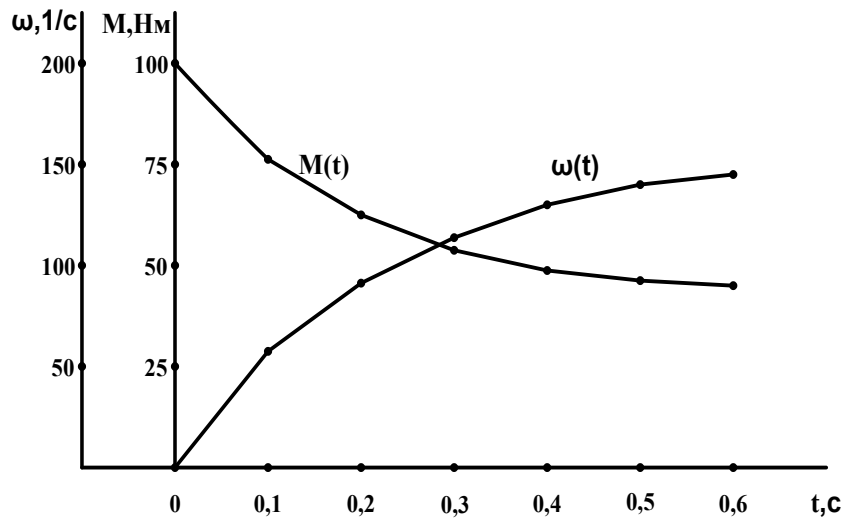


Рисунок 9.2 – Криві перехідного процесу  $\omega(t)$  та  $M(t)$  електроприводу

Задача 9.2. Двигун (рис.9.3) працював в усталеному режимі в точці А, долаючи момент навантаження  $M_{C1} = 150 \text{ Нм}$ . В момент часу  $t = 0$ , що приймається за початок відліку, відбулася стрибкоподібна зміна моменту навантаження до рівня  $M_{C2} = 250 \text{ Нм}$ . Розрахувати та побудувати залежності  $\omega(t)$  й  $M(t)$ , які відповідають цьому збільшенню навантаження.

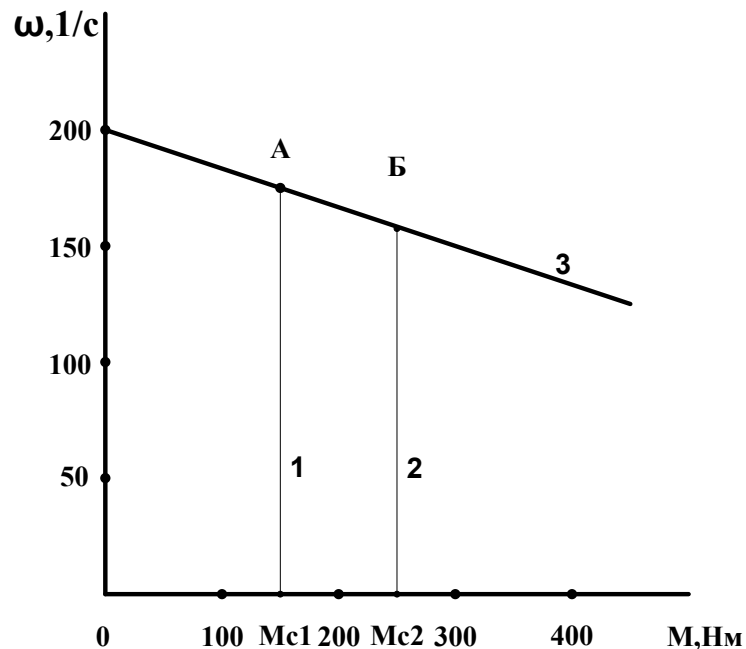


Рисунок 9.3 – Механічні характеристика до задачі 9.2:  
1,2 – виконавчого органу, 3 – двигуна.

Задача 9.3. На рисунку 9.4 наведена механічна характеристика двигуна. Розрахувати та побудувати залежності  $\omega(t)$  та  $M(t)$ , якщо  $M_c = 0$ ,  $\omega_{\text{поч}} = 200 \text{ c}^{-1}$ .

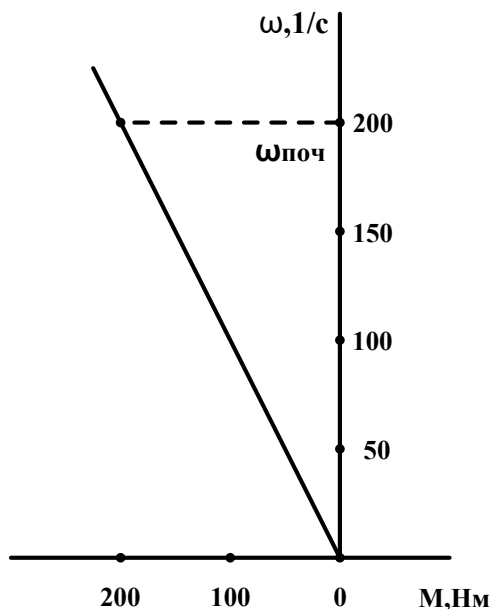


Рисунок 9.4 – Механічна характеристика до задачі 9.3

### Практичне заняття №10 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.

**Мета роботи** – ознайомитися зі схемами інверторів та методами розрахунку електричних параметрів електроприводів та систем керування.

#### *Теоретичні відомості*

Для перетворювачів частоти використовується одно-, дво-, та трифазні схеми інверторів напруги, які представлені на рисунку 10.1 – 10.3. відповідно.

Вихідні дані для розрахунку наступні:

- потужність навантаження  $P_{ln}$ ;
- фазна напруга на навантаженні  $U_{\phi-}$ ;
- номінальний коефіцієнт потужності навантаження  $\cos\varphi_n$ ;
- діапазон зміни частоти на навантаженні  $f_{max} / f_{min} = D$ .

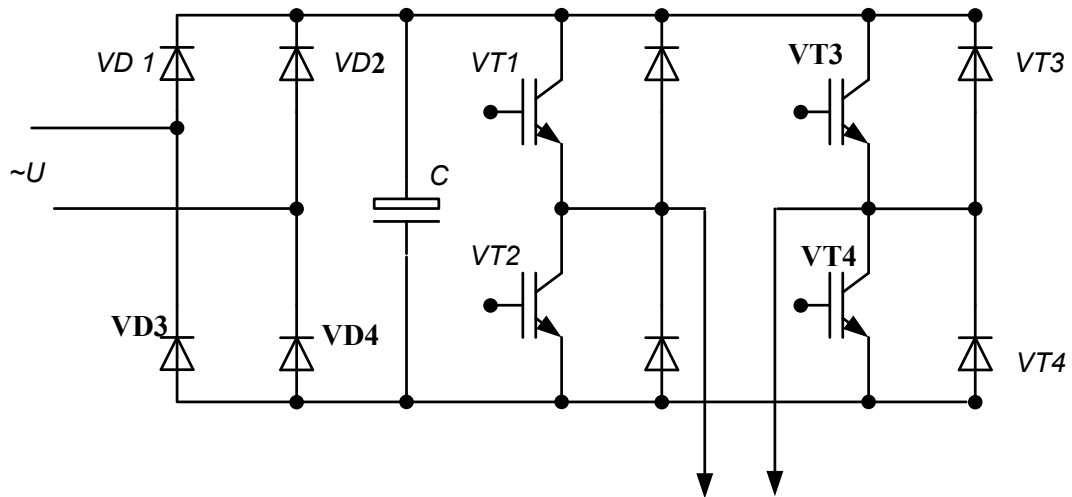


Рисунок 10.1 – Схема однофазного перетворювача частоти

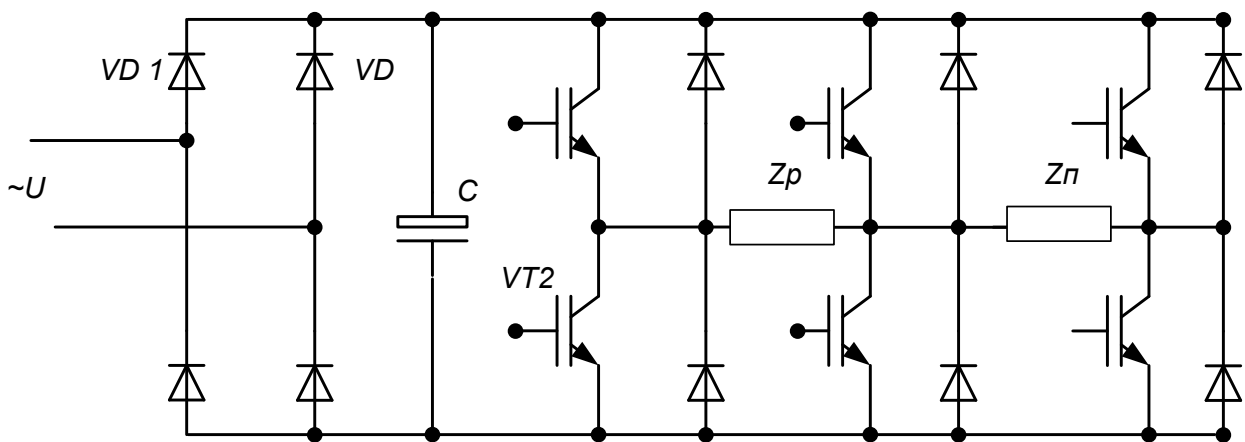


Рисунок 10.2 – Схема двофазного перетворювача частоти ( $Z_p$  – робоча обмотка,  $Z_{п}$  – пускова обмотка двигуна)

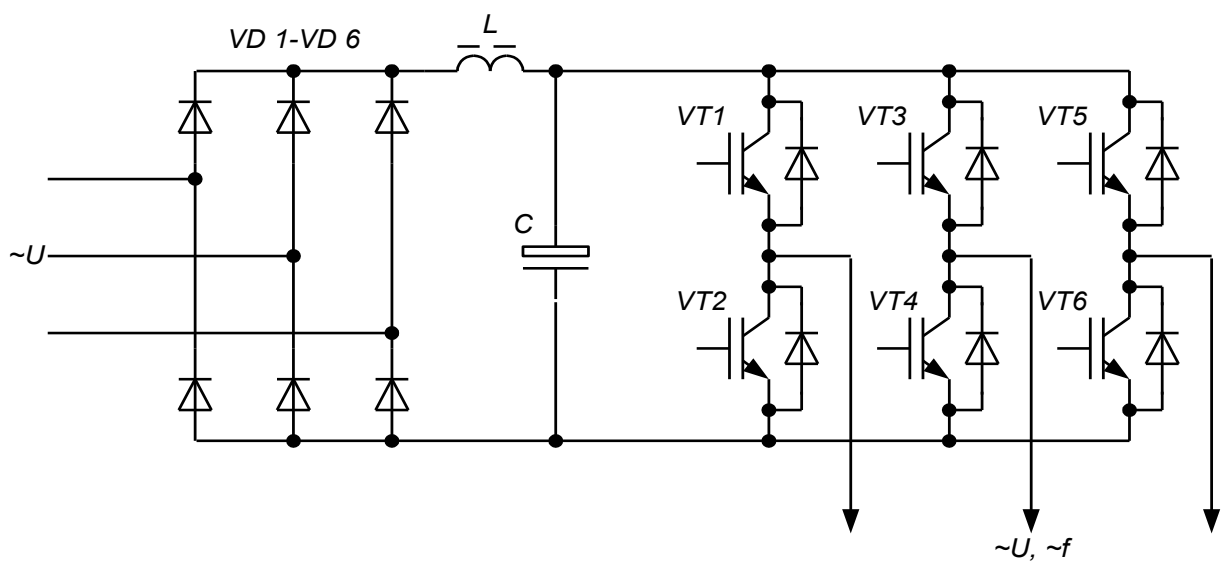


Рисунок 10.3 – Схема трифазного перетворювача частоти (AИH)

1. Діючу напругу лінійної синусоїдальної напруги  $U_{1л}$  на навантаженні розраховують відповідно до виразу:

$$U_{1\phi} = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3}},$$

де  $U_{1\phi}$  – фазна напруга, що живить перетворювач в безтрансформаторних перетворювачах  $U_{1\phi} = 220$  В.

2. Діюче значення фазного струму навантаження у трифазних інверторах:

$$I_{\phi} = \frac{P_{1н}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_n}, \quad P_{1н} = \frac{P_n}{\eta_n}.$$

3. Необхідна напруга живлення перетворювача  $U_{d \max}$  :

в трифазних АІН:  $U_{d \max} = \frac{3 \cdot U_{1\phi}}{\sqrt{2}};$

для однофазних схем АІН:  $U_{d \max} = U_{1\phi \text{ ср}}.$

4. Значення модулюючої частоти  $f_{mn}$  вибирають, виходячи зі значення діапазону регулювання  $D$ , відповідно до таких рекомендацій:

$$f_{\max} = \frac{U_{d \max \square}}{U_{\min \square}} \cdot J_n$$

де  $f_n = 50$  Гц;

$U_{\min \square}$  відповідає  $f_{\min} = 5$  Гц або розраховується як  $f_{\min} = \frac{f_n}{D};$

$U_{\max \square}$  – максимальна змінна напруга на виході АІН:  $U_{\max \square} = \frac{2U_{d \max}}{\sqrt{2}}.$

5. Значення параметра навантаження  $k$ :  $k = \frac{r_n}{2 \cdot \pi \cdot f_{mn}} = \frac{r_n}{\omega L_n}, \quad k = \frac{1}{\omega \tau},$  а

допоміжний коефіцієнт  $a = e^{-\frac{k\pi}{3}}, \quad \tau = \frac{L_n}{r_n}.$

6. Максимальне значення струму через ключові транзистори:

Для АІН напруга фази яких має прямокутну форму (рис.10.4), миттєве значення струму навантаження:

$$i_{H(t)} = \frac{U_d}{r_H} \left( 1 - \frac{2e^{-\frac{r_H \cdot t}{L_H}}}{1 + e^{-\frac{r_H \cdot t}{L_H}}} \right) \text{ або } i_{H(0)} = I_0 \left( 1 - \frac{2e^{-kV}}{1 + a^3} \right),$$

де  $I_0 = \frac{U_d}{r_H}$  – базисний струм;

$r_H = r_{\phi.дв} + r_{кл}$ ;  $k = \frac{r_H}{\omega L_H}$  – параметр навантаження;

$V = \omega t$  – змінний часовий кут.

Максимальне значення струму навантаження при  $V = \pi$  (рис.10.4):

$$I_{\max} = I_0 \frac{1 - a^3}{1 + a^3}.$$

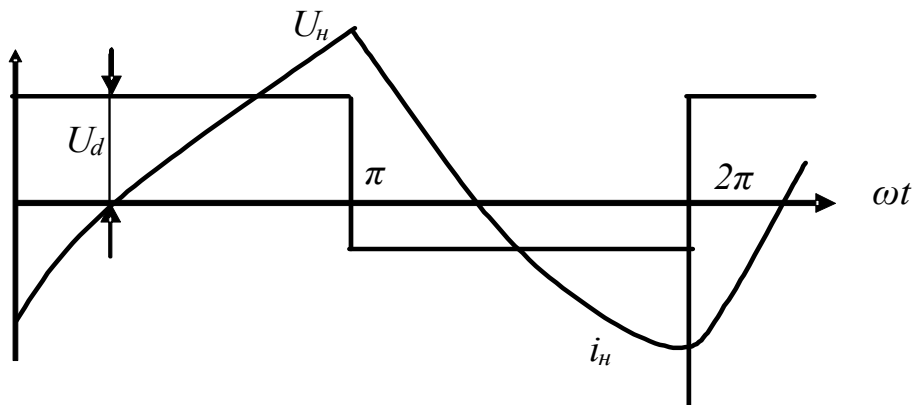


Рисунок 10.4 – Перехідний струм через ключ транзистора в однофазному інверторі напруги

Для двофазних інверторів напруга також має прямокутну форму, а напруга на фазах зсунута одна відносно другої на кут  $90^\circ$ , (рис.10.5).

$$i_{A(V)} = -\frac{U_d}{r_H} \cdot \frac{1 - a^{\frac{3}{2}}}{1 + a^3} \cdot e^{-kV}, \quad 0 < V < \frac{\pi}{2}; \quad i_{A(V)} = \frac{U_d}{r_H} \left( \frac{1 - a^{\frac{3}{2}}}{1 + a^3} \cdot e^{-kV} \right), \quad \frac{\pi}{2} < V < \pi.$$

При з'єднанні трифазного навантаження зіркою кожна фаза інвертора напруги або включена паралельно з другою фазою і послідовно з третьою, або послідовно з іншою фазою. Напруга фази має або величину  $\frac{U_d}{3}$ , або  $\frac{2}{3}U_d$  при триступеневій діаграмі напруги, див. рисунок 10.6.

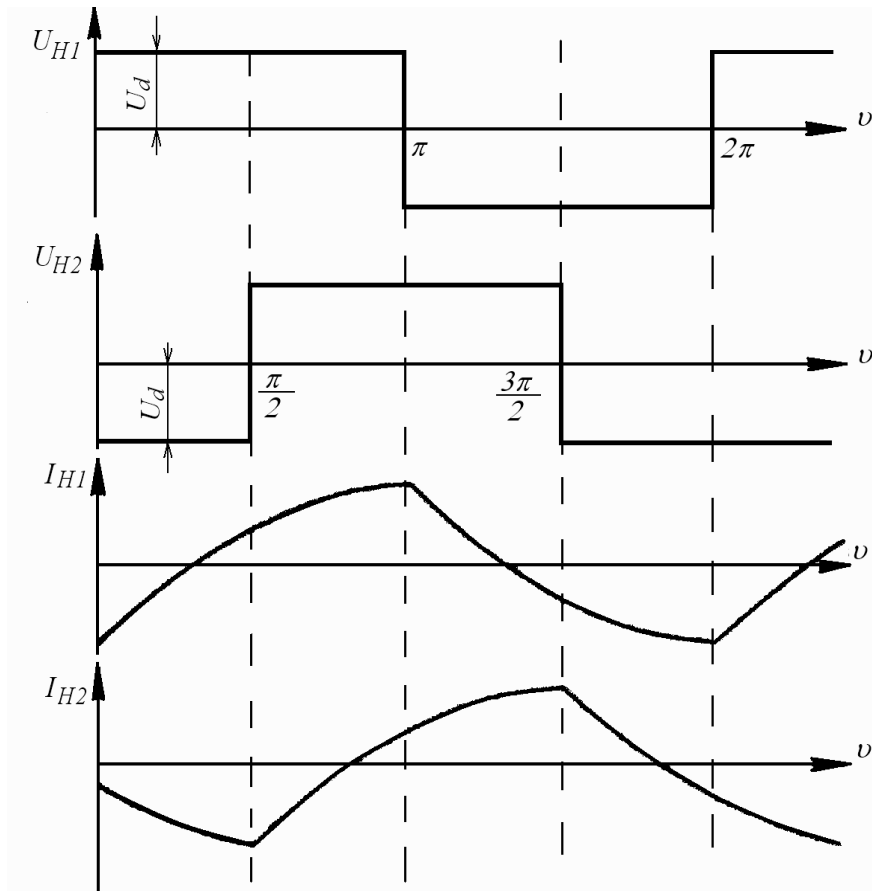


Рисунок 10.5 – Перехідні струми через ключі транзистора при прямокутній формі напруги у двофазній схемі інвертора напруги

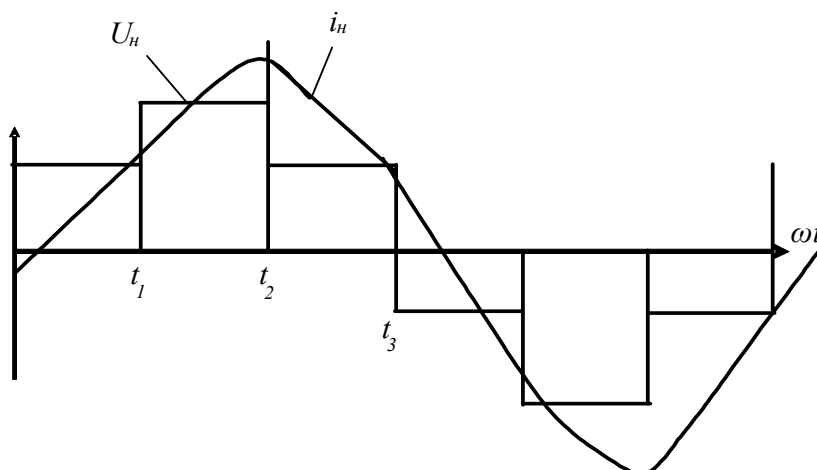


Рисунок 10.6 – Форма перехідного струму через ключі інвертора в одній фазі інвертора напруги при триспівеневій формі вихідної фазної напруги

Значення струму знаходиться для трьох інтервалів:  $0 < V < \frac{\pi}{3}$ ;  $\frac{\pi}{3} < V < \frac{2\pi}{3}$ ;

$\frac{2\pi}{3} < V < \pi$ , відповідно струми на тих інтервалах:

$$i_{н(V)} = \frac{U_d}{3r_n} \left[ 1 - \frac{(1+a)(2-a)}{1+a^3} \cdot e^{-kV} \right], \quad i_{н(V)} = \frac{U_d}{3r_n} \left[ 2 - \frac{(1+a)^2}{1+a^3} \cdot e^{-kV} \right].$$

$$i_{н(V)} = \frac{U_d}{3} \left[ \frac{(1+a)(1-2a)}{1+a^3} \cdot e^{-kV} \right].$$

За знайденими миттєвими значеннями струму в момент  $t_1, t_2, t_3$  можна знайти і діючі значення струмів навантаження та середнє значення струму джерела живлення та інші параметри АІН. Вибір транзисторного модуля проводимо за величиною розрахункового більшого значення  $I_{VT\max}$  та величиною зворотної напруги  $U_{VT\max\text{зв.}}$ , що прикладається до вентилів.

При п'ятипульсній діаграмі напруги розрахунок можна проводити аналогічно до трипульсної діаграми напруги.

Задаючись значеннями  $t$  в межах від  $t = 0$  до  $t = 0,01$  с для значення  $f = 50$  Гц, та значеннями  $t$  від  $t = 0$  до  $t = 0,1$  с для  $f_{\min} = 5,0$  Гц, розраховуємо криві зміни струму  $i_n = f(t)$ , звідки вибираємо значення  $i_{VT\max}$ , за яким вибираємо транзистори інвертора.

За необхідності розраховується також наступні величини:

7. Максимальна напруга на зворотних діодах:

$$U_{VD.\text{зв.}\max} = 2 \cdot U_{cp} \text{ — для трифазної мостової схеми;}$$

$$U_{VD.\text{зв.}\max} = U_{cp} \text{ — для однофазної та двофазної схем АІН.}$$

8. Максимальна зворотна і пряма напруга на комутуючих транзисторах:

$$U_{VT.\text{зв.}\max} = 2 \cdot U_{cp}.$$

9. Базисний струм:  $I_0 = \frac{U_{cp}}{3 \cdot R_n}$  — для трифазної схеми;

$$I_0 = \frac{U_{cp}}{R_n} \text{ — для однофазної та двофазної схем АІН;}$$

10. Середнє значення струму ключових транзисторів:  $I_{a.VT} = I_0 \cdot \frac{I}{I_m}$ .

Величину  $\frac{I}{I_m}$  вибирають, виходячи з параметра  $\cos\phi$ , відповідно до рекомендацій, викладених у [1].  $\frac{I}{I_m} = 0,25 \div 0,3$ .

11. Середнє значення струму зворотних діодів:  $I_{a.VD} = I_0 \cdot \frac{I}{I_m}$ .

У результаті розрахунків вибирають транзистори і зворотні діоди для них, використовуючи розрахункові значення  $I_{\max}$ ,  $U_{VD.зв.\max}$ ,  $I_{a.VT}$ ,  $I_{a.VD}$ , або при застосуванні модулів вибирають ці модулі за максимальними значеннями  $I_{VT\max}$  та  $U_{зв.\max}$  для конкретного типу модуля.

Регулювання вхідної напруги може здійснюватися зміною моменту закривання того ключа, який (які) в даний момент часу відкритий (чи закриті). Структура силової частини інвертора при алгоритмі переключення ключів не змінюється. Розглянемо порядок розробки алгоритмів керування ключами інвертора для трифазної мостової схеми інвертора, при з'єднанні навантаження зіркою (рис.10.7).

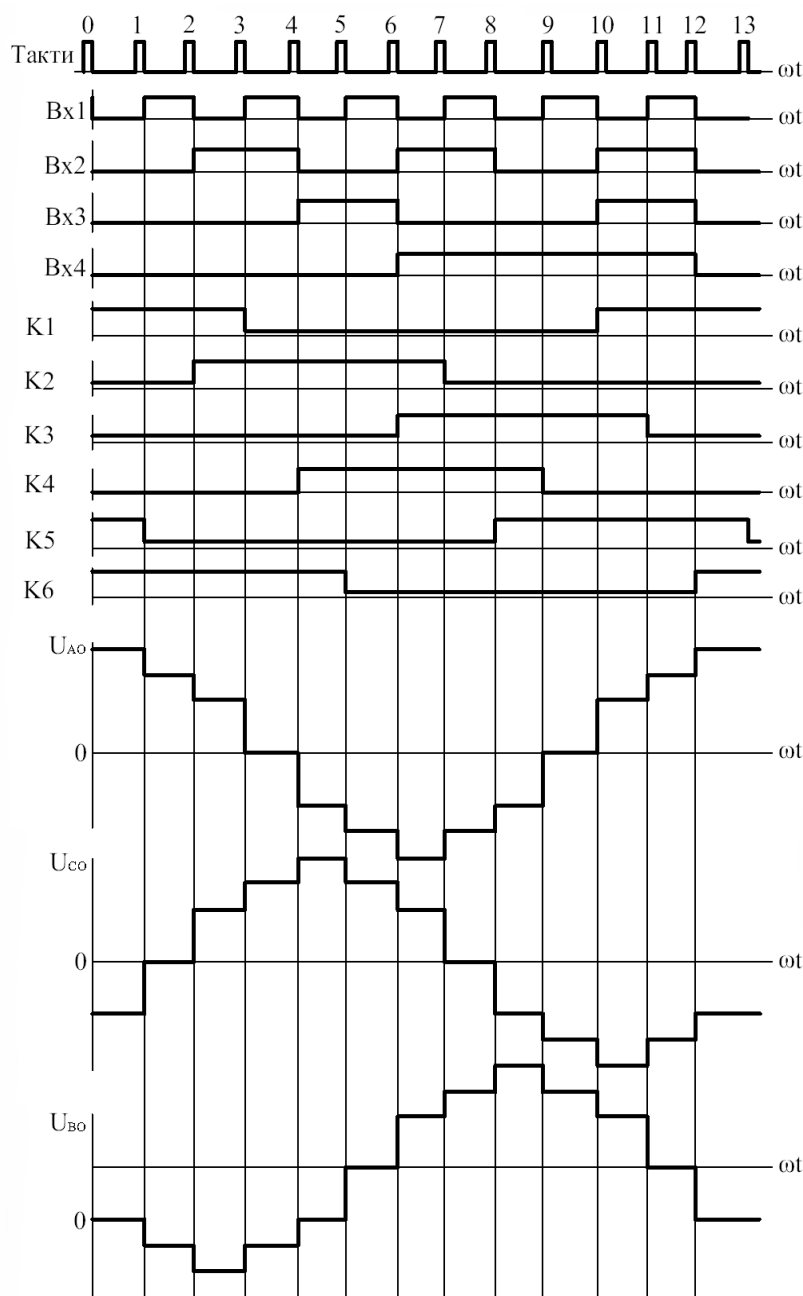


Рисунок 10.7 – Алгоритм переключення ключів у трифазному мостовому інверторі при симетричному навантаженні, з'єднаному зіркою

Регулювання змінної напруги  $U_{\sim}$  та  $f_{\sim}$  на виході інвертора може здійснюватись або регулюванням вхідної напруги (вхідної напруги випростувача), або регулюванням часу включення  $t_i$  кожного ключа інвертора, при цьому  $U_{\sim} = U_d \cdot \gamma$  на кожному інтервалі регулювання.

Спрощена структурна схема керування електроприводом транспортного засобу наведена на рисунку 10.8.

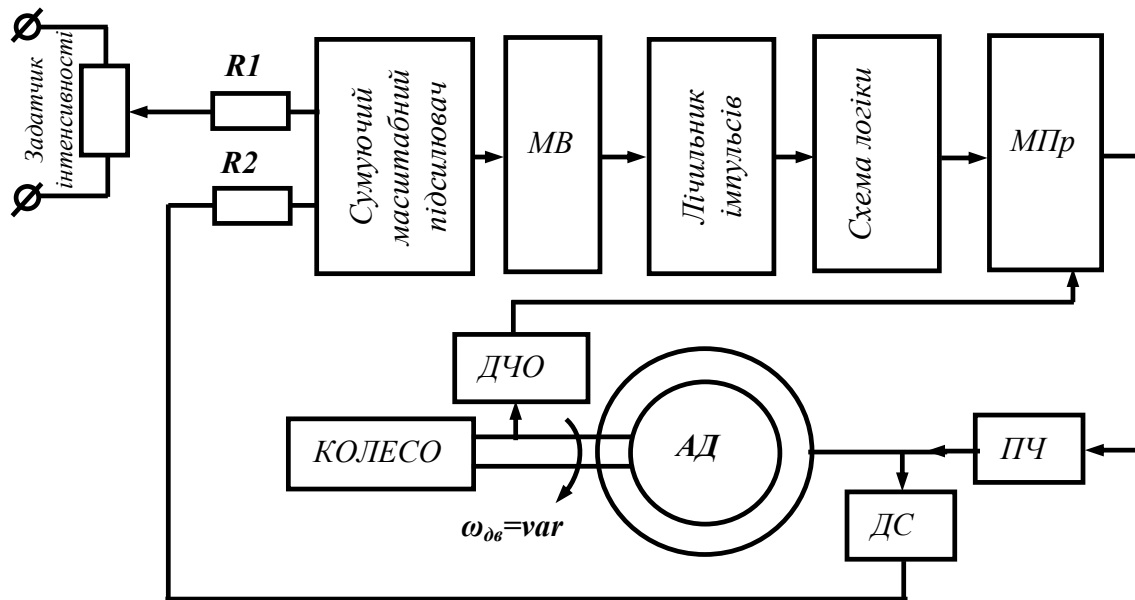


Рисунок 10.8 – Структурна схема керування електроприводом

Система електроприводу містить:

- двигун (АД) з регульованою частотою обертання, датчик струму (ДС), вихідна напруга ( $U_{дл}$ ), яка пропорційна струму статора двигуна. Ротор двигуна безпосередньо зв'язаний з датчиком частоти обертання ДЧО;
- силову схему установки перетворювача частоти ПЧ, яка складається з керованого випростувача, LC-фільтра, інвертора на транзисторах і діодах;
- регулятор частоти на базі мікропроцесора МПр, що забезпечує три керовані частоти відповідно: керування випростувачем, гальмівним опором (транзистором ШПП) автономним інвертором.

На мікропроцесор подається сигнал включення з схеми логіки, який формується шляхом порівняння опорного сигналу з задатчика інтенсивності і сигналу зворотнього зв'язку з давача струму ДС на сумуючому масштабному підсилювачі, вихідний сигнал якого керує частотою мультивібратора МВ і з допомогою лічильника імпульсів та схеми логіки керує роботою мікропроцесора МПр. Схема логіки синтезується за індивідуальним завданням.

## Практичне заняття №11

### РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

*Мета роботи* – ознайомитися з сучасними автономними джерелами живлення для електроприводів.

#### Теоретичні відомості

Розглянемо переваги та недоліки сучасних акумуляторних батарей. Вони характеризуються не тільки питомою густиною енергії, але також терміном служби, вимогами щодо встановлення, ступенем саморозряду та експлуатаційними витратами. Класичними серед акумуляторних батарей є нікель-кадмієві батареї. Нікель-кадмієві акумуляторні батареї (NiCd) використовуються досить давно, але мають відносно низьку енергетичну густину. Вони забезпечують тривалий термін служби, високі значення струму розряду і, що важливо, доступна вартість. Основна сфера їх застосування – радіостанції, біологічне та медичне обладнання, професійні відеокамери та електроінструмент. Нікель-кадмієві батареї містять токсичні речовини і є небезпекою для навколишнього середовища.

Нікель-металгідридні акумуляторні батареї (NiMH) мають більш високу в порівнянні з нікель-кадмієвими батареями енергетичну густину, але менший термін служби [4].

Свинцево-кислотні акумуляторні батареї (SLA, VRLA, SLI) найбільш вигідні при використанні в енергоємних пристроях, де питання їх ваги істотного значення не має. Вони найкраще підходять для використання в системах освітлення та джерелах безперебійного живлення, в автомобільній техніці.

Свинцеві акумуляторні батареї (далі АКБ) містять три основні типи – АКБ технології AGM, GEL та Flooded [9].

– GEL-технологія Gelled Electrolite. До електроліту підмішується оксид кремнію  $\text{SiO}_2$  і він стає желеподібним. У цьому желе є маса пор, які заповнені електролітом. Саме така консистенція електроліту дозволяє працювати GEL-акумулятору у будь-якому режимі. Недоліком є те, що акумулятор такої технології не обслуговується.

– AGM-технологія Absorptive Glass Mat. Замість загущеного до желе електроліту в них застосовується скломат, який просочують електролітом. Пори скломатів електроліт заповнює не до кінця. У об'ємі, що залишився, відбувається рекомбінація газів. Як відомо, GEL та AGM АКБ типу не бояться глибокого розряду та витримують багатократні режими «заряд-розряд». Недоліком є те, що при використанні таких акумуляторів потрібно урахувати чутливість до умов заряджання, тобто перезаряд може викликати непоправні наслідки в роботі АКБ.

Такі акумулятори можна використовувати не тільки в промисловості, в авто, а й удома. Наприклад, для сонячних систем термін служби складає 5-10 років. AGM акумулятори витримують до 600 циклів розряду в нуль. Особливо добре такі акумуляторні батареї зарекомендували себе при мінусових температурах навколишнього середовища.

– Flooded-акумулятори з рідким електролітом (залівні), як і раніше, мають широке застосування. Будучи забезпечені рециркуляційними клапанами, вони переходять у клас малообслуговуваних АКБ. Такі клапани не допускають виділення газів, а перевіряти рівень електроліту потрібно лише раз на рік. Це дає змогу використовувати Flooded акумулятори не тільки на відкритому повітрі, а й усередині приміщень. Акумулятори відкритого виду більш витривалі в порівнянні з акумуляторами, що не обслуговуються, питома вартість А·год в них нижча і вони краще піддаються балансуванню [9].

На рисунку 11.1 показано загальний вигляд акумуляторів, виконаних за гелевою та AGM технологіями.



Рисунок 11.1 – Вигляд акумуляторів, виконаних за гелевою та AGM технологіями

Подібна технологія суттєво збільшує кількість зарядно-розрядних циклів. Причому глибоких розрядів до 80%. ФЕС та інша силова електротехніка широко використовують такі АКБ. Маркують їх OpzS та OpzV. Недолік таких АКБ – висока ціна. Літій-полімерні акумуляторні батареї представляють дешевшу версію літій-іонних батарей: принцип їхньої дії заснований на тих же процесах. У таблиці 11.1 наведено порівняльні характеристики шести основних типів акумуляторних батарей, де подано основні параметри батарей та їх кількісні енергетичні показники.

Розглянемо детальніше особливості та характеристики гелевих акумуляторів за технологією AGM та літій-іонних акумуляторів.

Літій-іонні акумуляторні батареї (Li-Ion) найкраще підходять для тих пристроїв, у яких необхідна висока ємність батарей і одночасно пред'являються жорсткі вимоги до їхньої ваги. Вони володіють дуже високою енергетичною густиною і малою вагою, що є найбільш важливими

перевагами будь-яких акумуляторних батарей. Однак при цьому вимагають суворого дотримання правил експлуатації та техніки безпеки.

Таблиця 11.1 – Характеристики типів акумуляторних батарей

Характеристики	Типи акумуляторних батарей				
	NiCd	NiMH	Кислотні	Li-Ion	Li-Ion по-лімерні
Енергетична густина, Вт/кг	45...80	60...120	30...50	110...160	100...130
Внутрішній опір, мОм	100...200 (батарея на 6 В)	200...300 (батарея на 6 В)	менш100 (батарея на 12 В)	150...250 (батарея на 7,2 В)	200...300 (батарея на 7,2 В)
Число циклів заряд/розряд до зниження ємності на 80 %	1500	300...500	200... 300	500...100 0	300...500
Ча швидкого заряду заряду, год	1	2...4	8...16	2...4	2...4
Допустимий перезаряд	середній	низький	високий	дуже низький	низький
Саморозряд за місяць при кімнатній температурі, %	20	30	5	10	10
Напруга на елементі, В	1,25	1,25	2	3,6	3,6
Струм навантаження відносно ємності С	20С 1сек	5С до 0,5 сек	5С 0,2 сек	>2С до 1 сек	>2С до 1 сек
Діапазон робочих температур, °С	-40...60	-20...60	-20...60	-20...60	0...60
Обслуговування через	30...60дн.	60...90дн.	3...6 міс.	не регл.	не регл.

Принцип Li-ion акумуляторів простий. В середині коробки міститься два електроди (у формі пластини, циліндру, тощо), розділені мембраною, які містяться в електроліті з іонами літію. В найбільш популярних на сьогоднішній день версіях літій-іонного виду один електрод – графітний, інший виготовлений з оксиду кобальту. Акумулятори цього типу мають більш високу густину енергії, завдяки цьому забезпечують в 2-4 рази більшу ємність, порівняно з свинцево-кислотними акумуляторами, до яких відносяться гелеві і AGM батареї. Великою перевагою літій-іонних акумуляторів є висока швидкість повного 100% перезаряду протягом 1-2 годин.

Основні переваги – відносно високий струм, тривалий термін служби, гарна термічна стабільність і підвищена безпека.

Літій-залізо-фосфатні акумулятори менш схильні до «старіння», ніж батареї з основної літій-іонної групи та стійкі до перезаряду. На рисунку 11.2 показано залежність ємності літій-іонного акумулятора від температури та часу зберігання при відсутності навантаження.

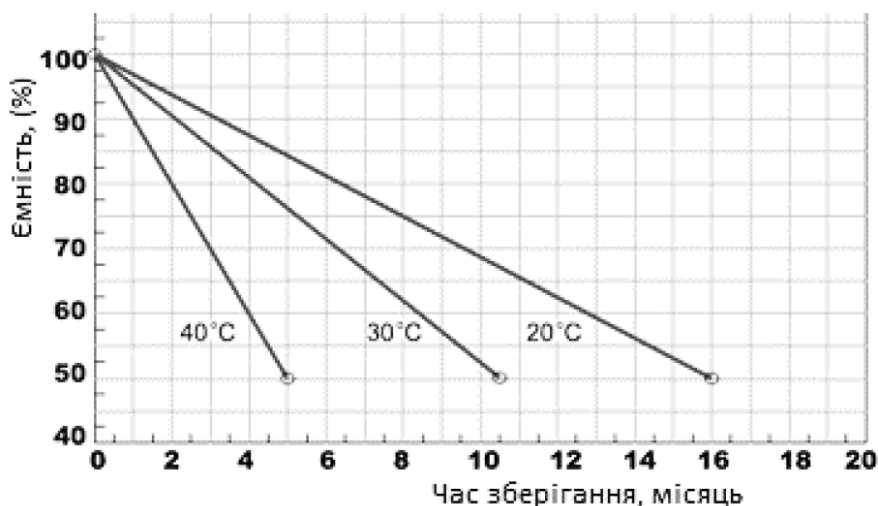


Рисунок 11.2 – Графік залежності ємності АКБ від температури і часу зберігання

Електричний заряд  $Q$  у ампер-годинах (А·год) дорівнює енергії  $E$  у ват-годинах (Вт·год), поділеної на напругу  $U$  у вольтах (В).

$$Q_{A\cdot год} = \frac{E_{Вт\cdot год}}{U} \quad (11.1)$$

Таким чином, знаючи величину навантаження у ватах, можна підібрати акумуляторну батарею відповідної ємності.

Літій-іонна акумуляторна батарея, що використовується в роботі, складається з двох модулів і взята з автомобіля Nissan Leaf. Вони виконані в металічному боксі. Габаритні розміри: довжина 220 мм, ширина 305 мм, товщина 24 мм, вага 4,5 кг [7].

Загальний вигляд одного модуля показаний на рисунку 11.3.

Для монтажу візьмемо два модулі, що з'єднуються послідовно. Кожний модуль має 4 акумуляторних батареї (комірки), що під'єднані послідовно-паралельно. Напруга однієї комірки складає 3,6 В, ємність 33,1 А·год. Вага кожної близько 800 грам. Електрохімічна система комірок – це літовані оксиди марганцю, кобальту та вуглець. Анод виконаний зі спеціалізованого вуглецевмісного матеріалу, а катод  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  і  $\text{LiNiO}_2$ .



Рисунок 11.3 – Загальний вигляд одного модуля літій-іонного акумулятора

Напруга кожного модуля в залежності від її зносу складає від 6,4 В до 8,4 В. Тобто, вихідна напруга літій-іонного акумулятора лежить в межах від 12,8 В до 16,8 В. При замірі ємності вибраних модулів знос складає 10%. Ємність батареї складає  $Q_{\text{АКБ}} = 66,2 \text{ А} \cdot \text{год}$ .

Внутрішній опір при діагностиці зносу АКБ складає 0,12 Ом, що говорить про те, що знос батареї лежить в межах 80...90%.

Розрахована потужність батареї (двох модулів) в залежності від заряду модулів буде лежати в межах

$$P_{\text{Вт} \cdot \text{год}} = Q_{\text{А} \cdot \text{год}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta = 66,2 \cdot (11,5 \dots 16,8) \cdot 0,85 \approx 650 \dots 950 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Тут нижня межа, при якій спрацьовує контролер заряду-розряду і перемикає акумулятор на сонячну батарею складає 11,5 В. На таку і потужність вибраний інвертор, а саме потужністю 1000 Вт, а навантаження за рахунок втрат в інверторі та інших елементах має бути вибрано орієнтовно на рівні 700 Вт.

З отриманої формули видно, що акумулятор буде витримувати навантаження в межах до 1 кВт протягом однієї години, або 400...500 Вт протягом 2 годин, 200 Вт – 4 години і т.д.

Дослідимо математичну модель використаної АКБ. При моделюванні гелевого акумулятора (АКБ) беремо наступні характеристики:

- робоча напруга;
- режим розряду (постійний або імпульсний);
- максимальний струм заряду-розряду;
- маса і габаритні характеристики;

Для моделювання використаємо пакет Matlab. Дана модель характеризується простотою симуляції зарядно-розрядних характеристик.

Введемо в блок симуляції такі параметри: номінальну напругу, В (Nominal Voltage), номінальну ємність, А/год (Rated Capacity); початковий ступінь заряду, % (Initial State-OfCharge). На рисунку 11.4 зображено блок

елементів для моделювання в схемі заряду-розряду АКБ з допомогою перетворення Лапласа.

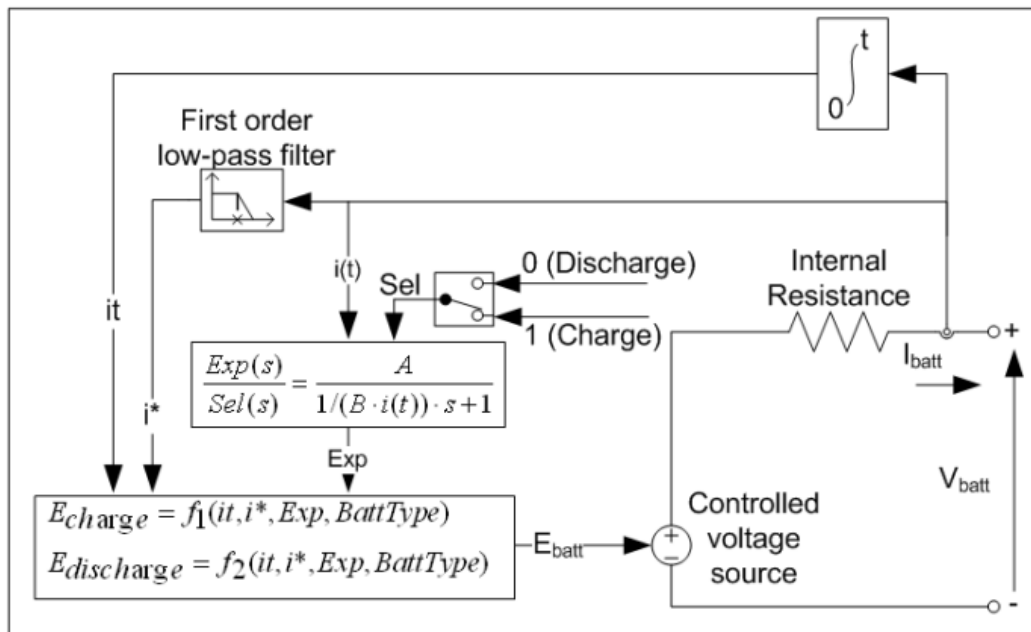


Рисунок 11.4 – Еквівалентна схема АКБ в пакеті Matlab

Схема включає джерело керування напруги (Controlled voltage source), внутрішній опір джерела (Internal Resistance), електронний ключ (Sel), що керує зарядом і розрядом АКБ при логічних умовах 1 і 0, фільтр першого порядку, що імітує контроль струму, блок заряду і розряду ( $E_{charge}$ ,  $E_{discharge}$ ) та інтегруючий логічний блок заряду [9].

Математичні вирази, що описують фізичні процеси розряду ( $i^* > 0$ ) та розряду в акумуляторі ( $i^* < 0$ ) АКБ представимо відповідно у вигляді (11.5) та (11.6) [2].

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right). \quad (11.2)$$

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0,1Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + L^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right). \quad (11.3)$$

Елементи математичної моделі представляють собою наступні величини:

$E_0$  – експоненційна динаміка зони (В);

$Sel(s)$  – імітує режим роботи від акумулятора (0 – під час розряду, 1 – під час заряду);

$K$  – постійна поляризації ( $A \cdot \text{год}^{-1}$ );  
 $i^*$  – низькочастотна поточна динаміка (A);  
 $i$  – струм АКБ (A);  
 $it$  – вилучена ємність ( $A \cdot \text{год}$ );  
 $V$  – експоненційна ємність ( $A \cdot \text{год}^{-1}$ );  
 $Q$  – максимальна ємність батареї ( $A \cdot \text{год}$ );  
 $A$  – експоненційна напруга (В).

Параметри еквівалентної схеми можна змінювати в залежності від типу досліджуваного акумулятора. Типова розрядна крива складається з трьох ділянок, що показані на рисунку 11.5.

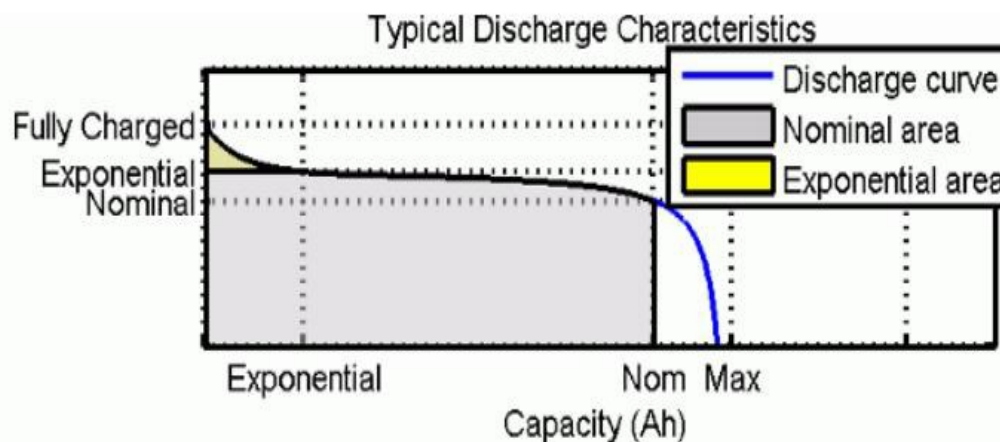


Рисунок 11.5 – Типова розрядна характеристика літій-іонної АКБ

Перша ділянка показує спадаючу експоненційну залежність заряду АКБ від її ємності. Друга ділянка показує напругу, яка може бути накопиченою з акумулятора, поки напруга батареї не знизиться нижче номінального значення. Третя ділянка показує повний розряд акумуляторної батареї, коли напруга спадає дуже швидко.

На рисунку 11.6 подано модель заряду акумуляторної батареї від ідеального джерела живлення. Блок Controlled Voltage Source виступає у вигляді зарядного пристрою постійної напруги. У нашому випадку для заряду літій-іонного АКБ досить подати константу 14, що подається на вхід цього блоку, тоді на виході зарядного пристрою з'явиться напруга величиною 14 В.

На рисунку 11.6 резистор  $R$  імітує модель опору проводів між зарядним пристроєм і акумулятором, тобто мізерний спад напруги в них. Елемент Score1 показує напругу джерела через датчик напруги і струм заряду батареї, через датчик струму.

Елемент Score1 виводить на друк ємність акумулятора SOC% (рис.11.7); струм заряду (Current A); напругу (Voltage V) та при потребі інші параметри (рис.11.8).

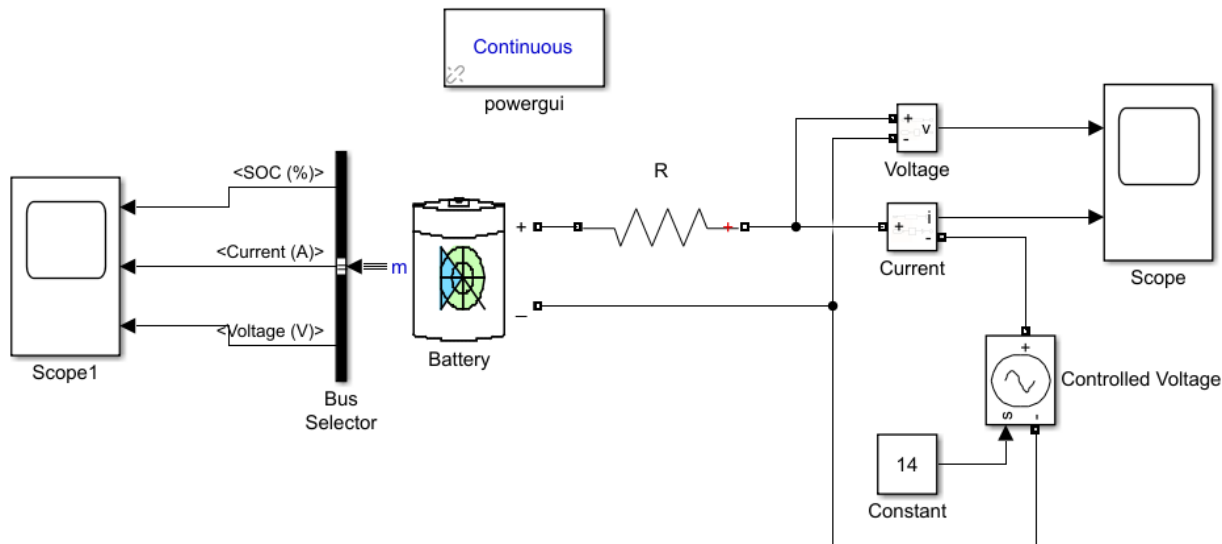


Рисунок 11.6 – Модель заряду акумуляторної батареї

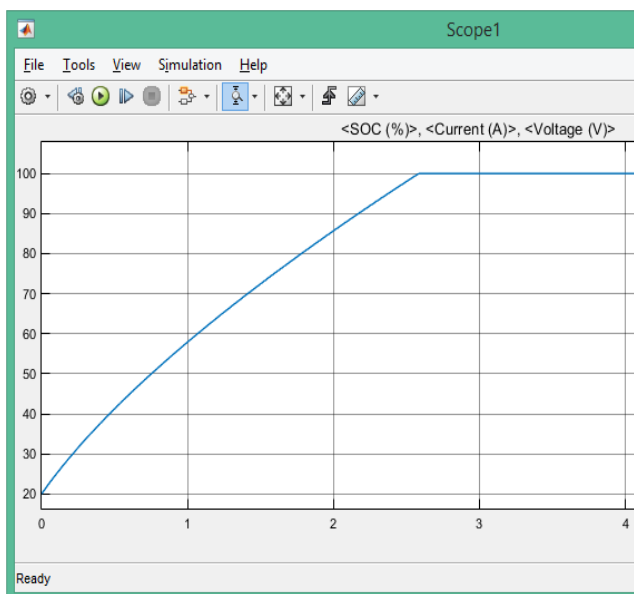


Рисунок 11.7 – Симуляція процесу заряду АКБ

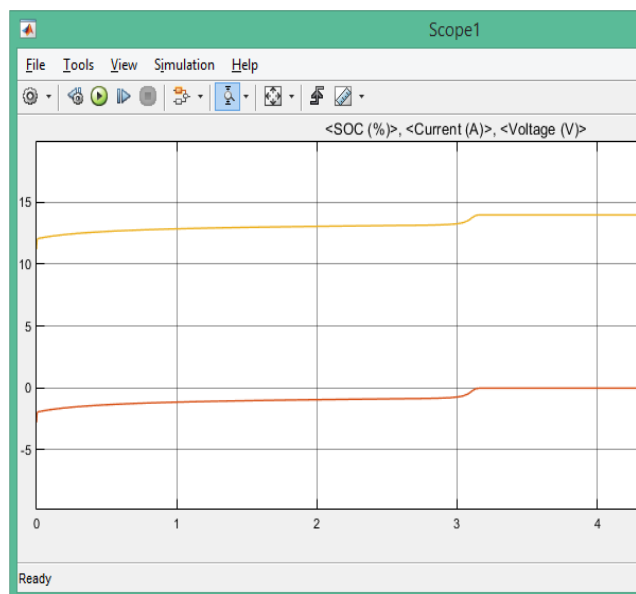


Рисунок 11.8 – Графіки симуляції струму та напруги заряду АКБ

Графік розряду АКБ зображений на рисунку 11.9.

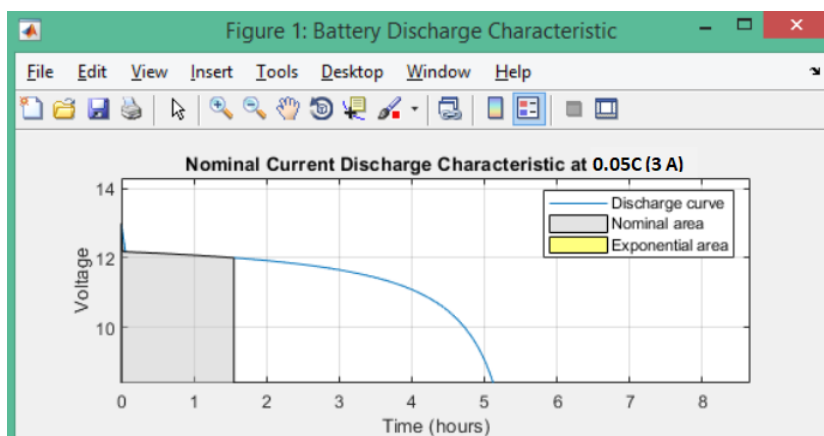


Рисунок 11.9 – Розрядні характеристики АКБ при струмі розряду 3 А

З графіка видно, що просідання напруги навіть при відносно високому струмі розряду в межах допустимого, а потужність буде постійною аж до 90% розряду АКБ.

Побудова моделі дозволила отримати результат процесу заряду акумуляторної батареї. Її заряд проходить струмом, близьким до 3 А при нарузі 14 В. Як видно з рисунку 11.8, час, витрачений на повний процес заряду батареї, ємністю 63 А·год складає приблизно 8,3 годин, що й співмірно з технічною документацією використовуваної в роботі АКБ.

## **Практичне заняття №12**

### **ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

*Мета роботи* – ознайомитися з методикою розрахунку потужності та вибору двигунів для електроприводів.

#### **Теоретичні положення**

Основою для розрахунку та вибору електродвигуна є навантажувальна діаграма та діаграма швидкості виконавчого органу робочої машини.

Навантажувальна діаграма розраховується на підставі технологічних даних, які характеризують роботу машин та механізмів й параметрів механічної передачі, та являє собою залежність приведенного до валу двигуна статичного моменту опору від часу  $M_C(t)$ .

Діаграма швидкості являє собою залежність швидкості руху виконавчого органу від часу  $V_{BO}(t)$  або  $\omega_{BO}(t)$ . Після виконання операції приведення ці залежності зображуються у вигляді графіка швидкості валу двигуна у часі  $\omega(t)$ .

На рисунку 12.1 наведений приклад навантажувальної діаграми та діаграми швидкості.

Орієнтовно розрахунковий момент двигуна

$$M_{POЗP} \geq k_3 M_{CE}, \quad (12.1)$$

де  $M_{CE}$  - еквівалентний момент навантаження;

$k_3 = 1,1 \dots 1,3$  - коефіцієнт запасу, який враховує динамічні режими електродвигуна.

У разі, коли момент навантаження  $M_C$  змінюється у часі й навантажувальна діаграма має декілько ділянок (рис.12.1.а), то  $M_{CE}$  визначається як середньоквадратична величина

$$M_{CE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{M_{Ci}^2 t_i}{t_{Ц}}}, \quad (12.2)$$

де  $M_{Ci}$ ,  $t_i$  - відповідно момент та тривалість  $i$ -ої ділянки навантажувальної діаграми.

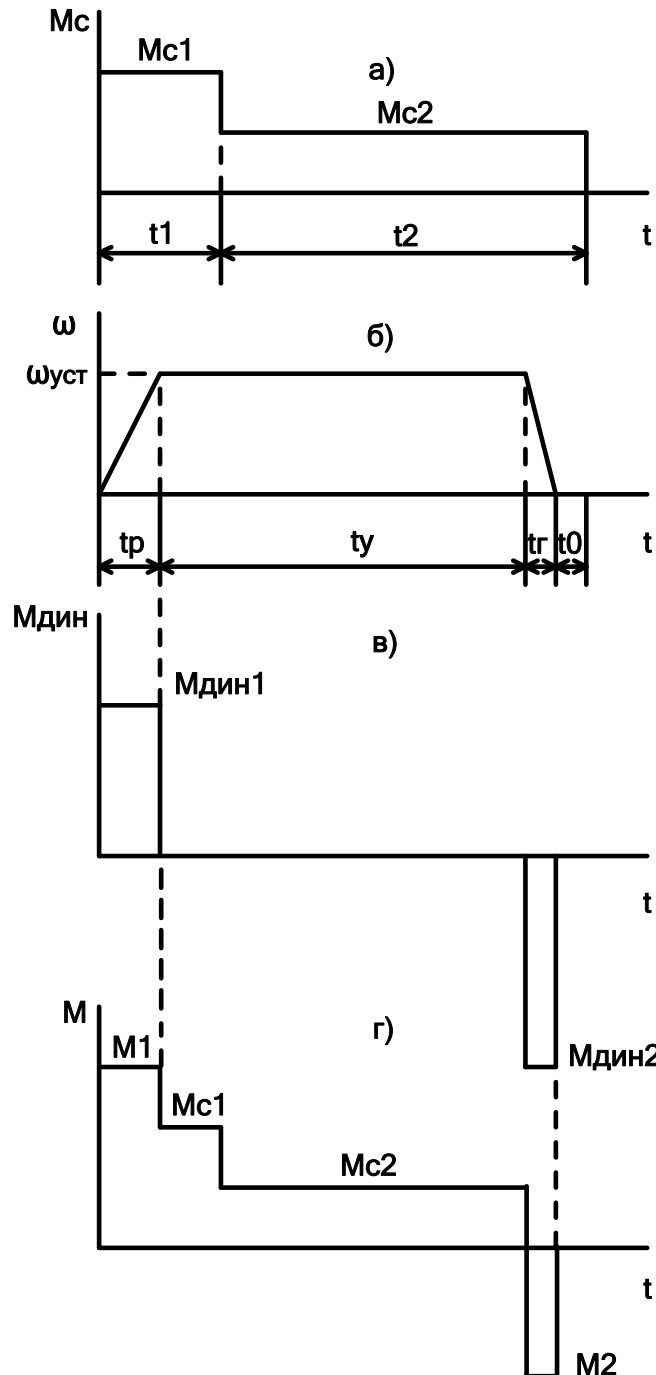


Рисунок 12.1 – Навантажувальна діаграма виконавчого органу (а), діаграма швидкості (б), графік динамічного моменту (в) та залежність моменту двигуна від часу (г)

Для діаграми швидкості на рис.12.1,б розрахункова швидкість двигуна  $\omega_{PO3P} = \omega_{YCT}$ .

Розрахункова потужність двигуна визначається за формулою

$$P_{PO3P} = M_{PO3P} \omega_{PO3P} = k_3 M_{CE} \omega_{YCT}. \quad (12.3)$$

За каталогом вибіраємо двигун ближчої більшої потужності та швидкості. Вибраний двигун при цьому має за родом та величиною напруги відповідати мережам змінного або постійного струму даного підприємства; за конструктивним виконанням – умовам його компоновки з виконавчим органом та способам кріплення на робочій машині, а за способом вентиляції й захисту від дії навколишнього середовища – умовам його роботи.

Вибраний двигун перевіряється на перевантажувальну здатність. Для цього розраховується навантажувальна діаграма двигуна  $M(t)$  за допомогою рівняння механічного руху

$$M = M_C + J \frac{d\omega}{dt} = M_C + M_{ДИН}. \quad (12.4)$$

Динамічний момент  $M_{ДИН}$  визначається сумарним приведеним моментом інерції  $J$  та заданим прискоренням на ділянці розгону й сповільненням на ділянці гальмування діаграми  $\omega(t)$  (рис.12.1,б). Якщо прийняти графік  $\omega(t)$  на ділянках розбігу та гальмування лінійним, то

$$M_{ДИНР} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = J \frac{\omega_{YCT}}{t_P} = const;$$

$$M_{ДИНГ} = -J \frac{\omega_{YCT}}{t_G}. \quad (12.5)$$

Використовуючи графік  $M_{ДИН}(t)$  (рис.12.1,в) та залежність  $M(t)$ , яка побудована на підставі (12.4), спів ставимо максимально допустимий момент двигуна  $M_{max}$  з максимальним моментом  $M_1$  (рис.12.1,г).

$$M_{max} \geq M_1. \quad (12.6)$$

Для двигуна постійного струму звичайного виконання та синхронного двигуна  $M_{\max} = M_{\text{ДОП}} = (1,5 \dots 2,5)M_H$ , для асинхронного двигуна з фазним ротором  $M_{\max} = M_K$ .

При виборі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором двигун має бути перевірений також за умовами пуску

$$M_{\Pi} \geq M_{\text{СП}}. \quad (12.7)$$

Якщо вибраний двигун задовольняє розглянутим вище вимогам, то далі здійснюється його перевірка за нагрівом.

Розглянемо метод середніх втрат, що є найбільш точним та універсальним методом із непрямих методів. У відповідності з методом допустимий нагрів двигуна буде мати місце при умові

$$\Delta P_{\text{СЕР}} \leq \Delta P_H, \quad (12.8)$$

тобто коли середні втрати у двигуні  $\Delta P_{\text{СЕР}}$  не перевищують втрати  $\Delta P_H$ .

У тому випадку, коли на окремих ділянках циклу навантаження постійне (рис.12.2), то середні втрати визначаються за формулою

$$\Delta P_{\text{СЕР}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i}, \quad (12.9)$$

де  $t_{\text{Ц}} = \sum_1^n t_i$  - час циклу.

Номінальні втрати потужності двигуна визначаються за каталожними даними

$$\Delta P_H = \frac{P_H (1 - \eta_H)}{\eta_H}. \quad (12.10)$$

Метод еквівалентного струму доцільно використовувати у тому випадку, коли відомий графік зміни струму двигуна у часі, отриманий розрахунковим шляхом або експериментально.

Умова перевірки двигуна за нагрівом методом еквівалентного струму має вигляд

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n I_i^2 t_i} = I_{EKB} \leq I_H. \quad (12.11)$$

Формула (12.11) справедлива, якщо постійні втрати не змінюються за цикл роботи, а опори головних кіл двигуна залишаються незмінними за цикл роботи.

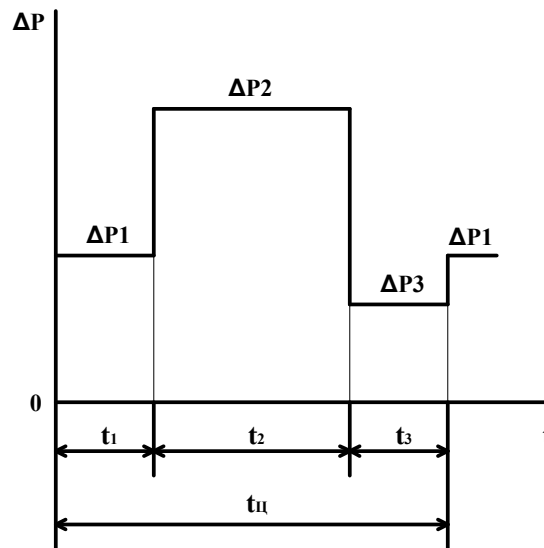


Рисунок 12.2 – Графік роботи двигуна з циклічним навантаженням

Метод еквівалентного моменту зручно використовувати у тому випадку, коли відомий графік зміни моменту двигуна у часі  $M(t)$ . Крім того, має виконуватись ще одна умова – постійність магнітного потоку двигуна за весь цикл роботи.

Умова перевірки двигуна за нагрівом методом еквівалентного моменту має вигляд

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n M_i^2 t_i} = M_{EKB} \leq M_H. \quad (12.12)$$

Метод еквівалентної потужності використовується, якщо відомий графік зміни потужності у часі, а також при виконанні умов постійності магнітного потоку та швидкості двигуна на всіх ділянках робочого циклу.

Нагрів двигуна не перевищить допустимого рівня, якщо

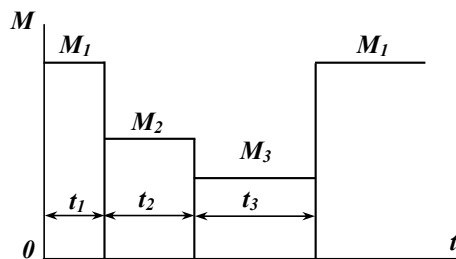
$$\sqrt{\frac{1}{t_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n P_i^2 t_i} = M_{EKB} \omega_H = P_{EKB} \leq P_H. \quad (12.13)$$

Задача 12.1. Визначити розрахункову потужність асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для приводу механізму, за графіком моменту навантаження на валу двигуна, зображеному на рис.12.2. Швидкість обертання вала двигуна  $n_2=1470 \text{ об/хв}$ . Вибрати двигун за каталогом.

*Розв'язок.*

Визначимо еквівалентний момент

$$M_E = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{120^2 \cdot 80 + 80^2 \cdot 15 + 60^2 \cdot 10}{8 + 15 + 10}} = 86,6 \text{ Нм}.$$



$$\begin{aligned} M_1 &= 120 \text{ Нм}; t_1 = 8 \text{ хв}. \\ M_2 &= 80 \text{ Нм}; t_2 = 15 \text{ хв}. \\ M_3 &= 60 \text{ Нм}; t_3 = 10 \text{ хв}. \end{aligned}$$

Рисунок 12.2 – Графік зміни навантажувального моменту на валу двигуна до прикладу 12.1

Розрахункова потужність двигуна дорівнює

$$P_p = P_E = 0,105 M_E n_{2H} = 0,105 \cdot 86,6 \cdot 1470 = 13,37 \text{ кВт}.$$

За величиною  $P_p = 13,37 \text{ кВт}$  вибираємо двигун 4А160S4У3, що має такі дані:  $P_H = 15 \text{ кВт}$ ,  $n_2 = 1465 \text{ об/хв}$ ,  $K_M = 2,3$ .

Максимальний момент двигуна

$$M_{\max} = M_H K_M = 97,8 \cdot 2,3 = 225 \text{ Нм},$$

$$\text{де } M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_{2H}} = 9,55 \frac{15 \cdot 10^3}{1465} = 97,8 \text{ Нм}.$$

Із графіка зміни навантажувального моменту величина найбільшого моменту дорівнює 120 Нм. Перевантажувальна здатність двигуна буде достатня, оскільки  $120 < 0,81 \cdot 225$ , де коефіцієнт 0,81 враховує пониження напруги на 10%.

Задача 12.2. Визначити розрахункову потужність та вибрати за каталогом трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором для приводу механізму, що працює у повторно-короткочасному режимі з графіком зміни навантажувального моменту на валу зображеним на рисунку 12.3. Швидкість обертання вала механізму дорівнює 930 об/хв. Перевірити двигун на перевантажувальну здатність.

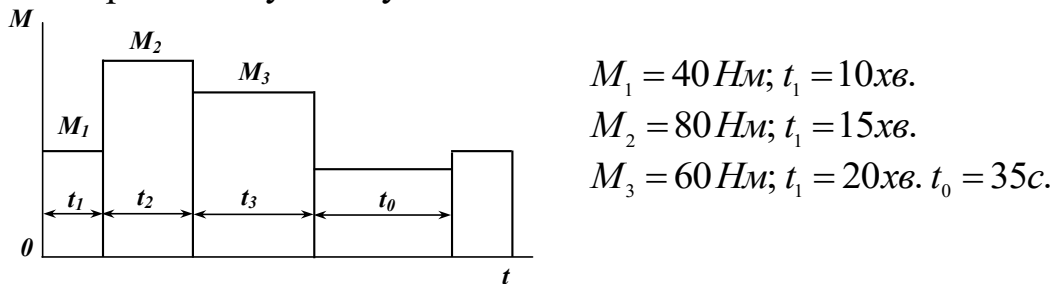


Рисунок 12.3 – Графік зміни навантажувального моменту на валу двигуна до прикладу 12.2

*Розв'язок.*

Еквівалентний момент на валу дорівнює

$$M_E = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{40^2 \cdot 10 + 80^2 \cdot 15 + 60^2 \cdot 20}{10 + 15 + 20}} = 63,9 \text{ Нм.}$$

Тривалість вмикання

$$TB = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} \cdot 100\% = \frac{10 + 15 + 20}{10 + 15 + 20 + 35} \cdot 100\% = 56,3\%.$$

Еквівалентна потужність дорівнює

$$P_E = 0,105 M_E n_2 = 0,105 \cdot 63,9 \cdot 930 = 6,24 \text{ кВт.}$$

Розрахункова потужність для стандартного  $TB_{CT} = 60\%$

$$P_P = P_E \sqrt{\frac{TB}{TB_{CT}}} = 6,24 \cdot \sqrt{\frac{56,3\%}{60\%}} = 6,0 \text{ кВт.}$$

Для  $TB_{CT} = 60\%$  вибираємо двигун 4АС132S6У3 з технічними даними:

$$P_H = 6,0 \text{ кВт}, n_{2H} = 935 \text{ об / хв}, \eta_H = 0,8, K_M = 2,1, s_H = 6,4.$$

Максимальний момент двигуна дорівнює

$$M_{\max} = K_M M_H = 2,1 \cdot 61,3 = 128,7 \text{ Нм},$$

$$\text{де } M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_{2H}} = 9,55 \frac{6 \cdot 10^3}{935} = 61,3 \text{ Нм}.$$

Отже, перевантажувальна здатність двигуна достатня, оскільки  $80 \text{ Нм} < 0,81 \cdot 128,7 \text{ Нм}$ , де коефіцієнт 0,81 враховує зниження напруги на 10%.

Задача 12.3. Визначити розрахункову потужність асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для приводу ТЗ, якщо момент статичного опору  $M_{CT} = 200 \text{ Нм}$ , а частота обертання колеса  $n_{BT} = 120 \text{ об / хв}$ . Передатне відношення редуктора  $i = 20$ ,  $\eta_{II} = 0,85$ .

*Розв'язок.*

Швидкість обертання ротора двигуна дорівнює

$$n_D = n_{BT} i = 120 \cdot 20 = 2400 \text{ об / хв}.$$

Визначаємо момент статичного опору двигуна

$$M_{CD} = \frac{M_{CT}}{i \cdot \eta_{II}} = \frac{200}{20 \cdot 0,85} = 11,8 \text{ Нм}.$$

Розрахункова потужність асинхронного двигуна

$$P_P = \frac{M_{CD} \cdot n_D}{9550} = \frac{11,8 \cdot 2400}{9550} = 2,96 \text{ кВт}.$$

За каталогом вибираємо найближчий, більший за потужністю асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з номінальною швидкістю обертання, що відповідає визначеній швидкості. Вибраним буде двигун типу 4АС112МА2У3 потужністю  $3 \text{ кВт}$  з швидкістю обертання  $2920 \text{ об / хв}$ .

## Список використаної літератури

1. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 387 с.
2. Гащук П. Автомобіль. Теорія колісного рушія: навч. посіб. Київ : Кондор, 2021. 327 с.
3. Захарчук В. І. Основи теорії та конструкції автомобільних двигунів : навч. посіб. Київ. Каравела, 2022. 235 с.
4. Лобатюк В.А., Мокін О.Б., Мокін Б.І. Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму. Монографія. ВНТУ: Вінниця, 2019. 135 с.
5. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Горенюк В. В. Метод ідентифікації моделей оптимального руху електромобіля з асинхронним електроприводом. Вісник ВПІ, вип. 1, 2020. с. 32-38.
6. Сажко В. А. Електрообладнання автомобілів і тракторів : підручник. 3-є вид., стер. Київ : Каравела, 2021. 399 с.
7. Шавьолкін О. О. Енергетична електроніка: навч. посібник. К.: КНУТД, 2017. 396 с.
8. Vorobiov V.V. Energy efficient asynchronous electric drive of an electromobile. Bulletin of the NTU “KhPI”. Series: Problems of automated electrodrive. No. 4 (1358), 2020. pp. 52-56.
9. Gillespie Thomas. Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International, 2021. 480 p.

Е-50

Електропривід транспортних засобів. Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка денної та заочної форм навчання / уклад. В.В. Лишук, М.В. Хвищун, Т.П. Цизь. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 98 с.

Комп'ютерний набір  
Редактор

В.В.Лишук  
В.В.Лишук

Підп. до друку “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 р.

Формат 60x84/16.

Папір офс. Гарн. Таймс.

Ум. друк. арк.6,25. Обл. – вид. арк.6,0.

Тираж \_\_\_\_ прим. Зам. \_\_\_\_\_.

Відділ іміджу та промоції  
Луцького національного технічного університету  
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75  
Друк – ВІП Луцького НТУ



