

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до організації самостійної роботи та  
проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД  
ЗАГАЛЬНО-ПРОМИСЛОВИХ МЕХАНІЗМІВ»**

*(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2018**

Методичні рекомендації до організації самостійної роботи та проведення практичних занять із навчальної дисципліни «Автоматизований електропривод загально-промислових механізмів» (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад : Т. П. Павленко, О. В. Донець. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 40 с.

Укладачі : д-р техн. наук, проф. Т. П. Павленко,  
канд. техн. наук, доц. О. В. Донець

Рецензент

**К. М. Василів**, доктор технічних наук, професор (НУ «Львівська політехніка»)

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 6 від 23.01.2017.*

Методичні рекомендації складено з метою допомогти студентам електротранспортних, електротехнічних, електромашинобудівних спеціальностей денної і заочної форм навчання під час підготовки до занять і складання заліку з курсу «Автоматизований електропривод загально-промислових механізмів».

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ .....	6
1.1 Параметри та характеристики однофазного трансформатора...	6
1.2 Параметри та характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням.....	8
1.3 Параметри та характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням.....	11
1.4 Параметри та характеристики трифазного асинхронного двигуна.....	15
2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ.....	20
2.1 Параметри і характеристики однофазного трансформатора....	20
2.2 Параметри і характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням.....	23
2.3 Параметри і характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням.....	28
2.4 Параметри і характеристики трифазного асинхронного двигуна.....	33
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	36
ДОДАТКИ .....	37

## ВСТУП

Завдання автоматизованого електроприводу полягає в автоматичному регулюванні заданих параметрів (координат) електроприводу або забезпечення необхідної функції зміни останніх.

Автоматичне регулювання в динамічному режимі виконується за допомогою регулятора. Завданням регулятора є компенсація впливу інерційних елементів системи. В інерційних елементах системи запасається енергія, вони характеризуються відповідними постійними часу  $T$ , що визначають в системі вплив тієї чи іншої інерційності. Постійні часу визначають час перехідного процесу, а також час регулювання величини і швидкодію системи.

Основними методами аналізу систем автоматизованого електроприводу є методи теорії автоматичного управління (ТАУ), що подаються у відповідному навчальному курсі.

У загальнопромислових системах автоматизованого електроприводу виникає завдання керування функцією моменту приводних двигунів. Така ситуація особлива актуальна у верстатному, ліфтовому, металургійному приводі. Вона повинна забезпечувати вимоги допустимого стабільного прискорення (ліфт), допустимих зусиль різання (верстати), зусилля і прискорення при прокаті металу (прокатне виробництво) тощо.

Для підготовки кваліфікованих спеціалістів із спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» необхідно мати сучасні лабораторні стенди частотно-регульованих асинхронних електроприводів з інверторами напруги та тиристорних електроприводів. Це дозволить студентам при проведенні лабораторних та науково-дослідних робіт поглибити свої знання з силових перетворювачів, навчитися налагоджувати та досліджувати їх, аналізувати одержані результати в виді осцилограм, робити відповідні висновки.

Практичні заняття – це зв'язуюча ланка теорії та практики, їх ціль – поглибити та закріпити теоретичні знання, які отримують студенти на лекціях, ознайомитись із вузлами електричних машин за допомогою наявних макетів, їх конструктивними особливостями та різноманітними типами тягових та допоміжних електричних машин, а також набути навички експлуатації, розрахунку, проектування.

Досягнення цієї мети визначається підготовкою робочих місць та організацією проведення практичних робіт.

Робочими місцями для проведення практичних робіт є спеціальні макети, що містять вузли та деталі електричних машин, а також макети, плакати.

Перед початком занять викладач знайомить студентів з порядком зміни робочих місць, загальною організацією проведення та оформлення робіт, основними правилами техніки безпеки. Особлива увага звертається на



підготовку студентів до занять, перевірку їх знань принципів схем, які вони будуть досліджувати. Студенти повинні дома готуватися до практичної роботи, уявити мету та задачу її проведення, ознайомитися з рекомендованою літературою.

В заключній частині виконання практичних робіт студенти оформлюють звітну частину, який містить логічно оформлені результати проведеного практичного завдання.

Тривалість практичного завдання – 2 години.

# 1 ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ

## 1.1 Параметри та характеристики однофазного трансформатора

Трансформатор – це статичний електромагнітний апарат, який призначений для перетворення енергії однієї – первинної системи змінного струму, в другу – вторинну систему змінного струму, яка має інші характеристики, зокрема, іншу напругу і інший струм.

Фізичну модель однофазного трансформатора, до вторинної обмотки якого підключено навантаження  $Z_H$ , зображено на рисунку 1, а. На рисунку 1, б подано умовне позначення трансформатора Т в електричних схемах.

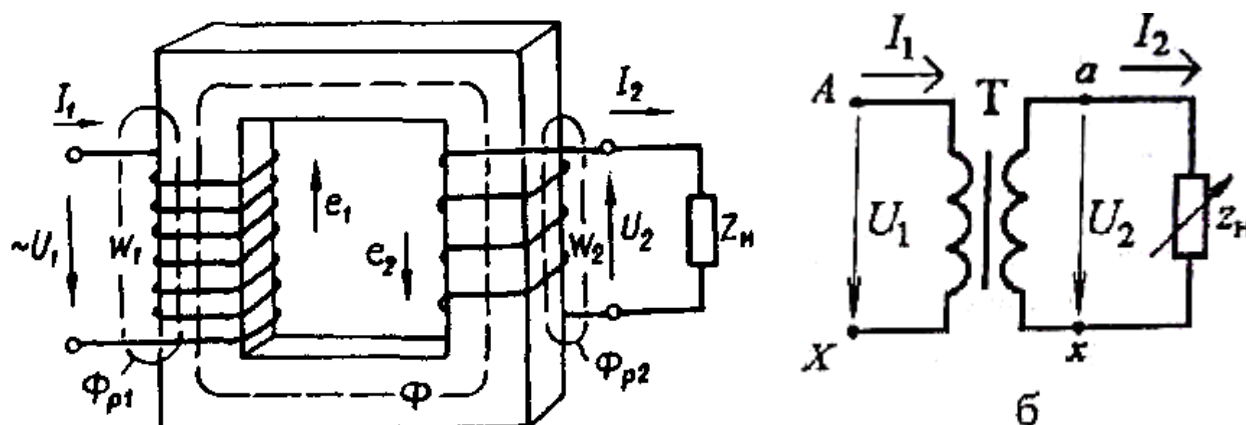


Рисунок 1 – Однофазний трансформатор :

а) фізична модель, б) позначення трансформатора на схемі

Під час вмикання первинної обмотки трансформатора до мережі змінного струму з напругою  $U_1$  ній виникає струм  $I_1$  який збуджує в магнітопроводі змінний магнітний потік  $\Phi$ . Замикаючись по магнітопроводу, змінний магнітний потік перетинає витки обмоток та індукуює в первинній обмотці  $w_1$  е. р. с.  $e_1$ , а вторинній обмотці  $w_2$  е. р. с.  $e_2$ . Під час вмикання вторинної мотки до навантажування е. р. с.  $e_2$  створить у ній струм  $I_2$ . Отже, у трансформаторі електрична енергія первинного кола з параметрами  $U_1$ ,  $I_1$  та частотою  $f$  перетворюється в електричну енергію змінного струму з параметрами  $U_2$ ,  $I_2$  та частотою  $f$ .

Поряд з основним магнітним потоком у трансформаторі ще змінні магнітні потоки розсіювання  $\Phi_{p1}$  та  $\Phi_{p2}$ , які замикаються навколо витків первинної та вторинної обмоток в основному через повітря. Магнітні лінії потоків розсіювання зчеплені тільки ; витками своєї обмотки і не беруть участі у передачі енергії з первинного кола до вторинного. У кожній з обмоток вони створюють е. р. с.  $e_1$  і  $e_2$ ; відповідно. Змінні е. р. с.  $e_1$  і  $e_2$  залежать від кількості витків і швидкості зміни магнітного.

Варіанти паспортних даних однофазних трансформаторів наведено в таблиці 1. Будемо вважати, що первинна обмотка трансформатора є обмоткою вищої напруги (ВН), а вторинна – обмоткою нижчої напруги (НН). Для заданого варіанта необхідно визначити:

- коефіцієнт трансформації;
- номінальні струми обмоток, струм первинної обмотки в режимі холостого ходу (ХХ) і струм аварійного короткого замикання (КЗ) цієї ж обмотки;
- залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) від струму навантаження;
- трансформатора (побудувати графік цієї залежності  $\eta(P)$ , де  $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$  – коефіцієнт навантаження, тобто відношення струму вторинної обмотки до його номінального значення);
- залежність напруги на вихідних затискачах трансформатора від коефіцієнта навантаження (побудувати цю залежність, яка називається зовнішньою характеристикою, у вигляді  $U_2(\beta)$ ).

У таблиці 1 позначені:  $S_{\text{ном}}$  – повна номінальна потужність;  $U_{\text{ВНном}}$ ,  $U_{\text{ННном}}$  – номінальні напруги обмоток ВН і НН;  $i_x$ ,  $P_0$  – струм і втрати потужності у режимі ХХ;  $P_k$ ,  $u_k$  – втрата потужності і напруга у режимі дослідного КЗ ( $i_x$ ,  $u_k$  подані в відсотках від номінальних величин, відповідно, струму і напруги первинної обмотки  $I_{1\text{ном}}$  та  $U_{1\text{ном}}$ );  $\cos\varphi_H$  – коефіцієнт потужності навантаження  $Z_H$ , яке підключається до трансформатора.

Принцип розв’язання задачі 1 подано нижче в прикладах 1 – 3.

## 1.2 Параметри та характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням

На рисунку 2 наведено спрощену схему включення двигуна постійного струму незалежного збудження постійного струму (ДПС НЗ), яку називають ще схемою паралельного збудження. Вважають, що мережа постійного струму має необмежену потужність і її напруга не залежить від навантаження. Тому кола обмотки збудження і обмотки якоря є незалежними один від одного.

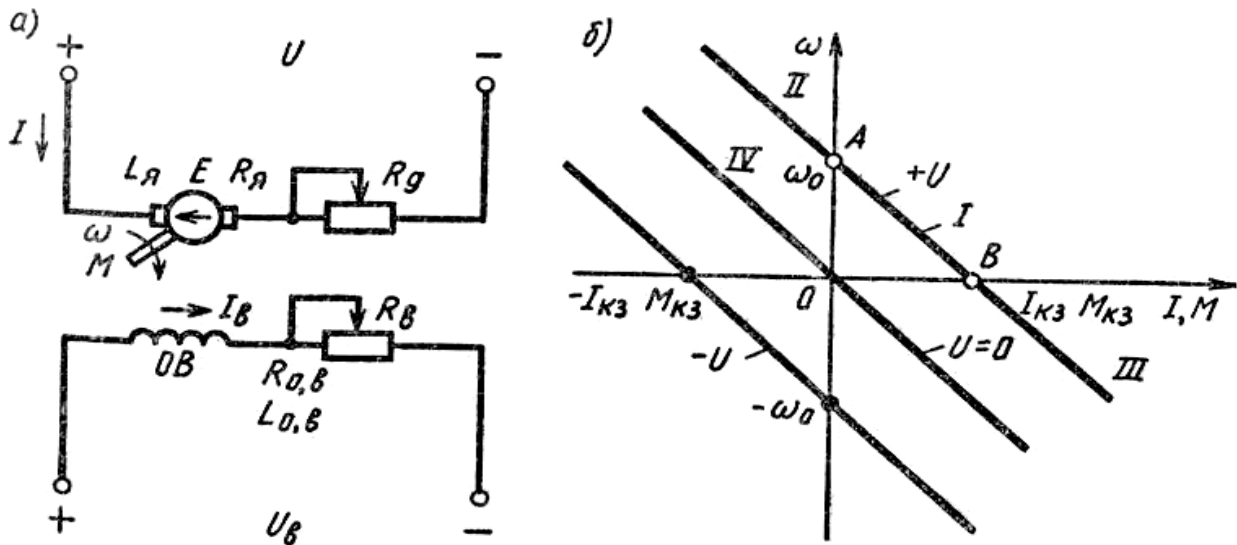


Рисунок 2 – а – схема включення і характеристики ДПС НЗ (б)

На схемі прийняті наступні позначення:

- $I$  – струм в колі обмотки якоря;
- $I_{\text{в}}$  – струм в колі обмотки збудження;
- $E$  – ЕРС у якорі;
- $\omega$  – кутова швидкість (рад/с);
- $M$  – момент двигуна (Н(м));
- $R_{\text{я}}$  – опір якоря;
- $L_{\text{я}}$  – індуктивність обмотки якоря;
- $L_{\text{об}}$  – індуктивність обмотки збудження;
- $R_{\text{д}}$  – додатковий резистор в колі обмотки якоря;
- $R_{\text{в}}$  – додатковий резистор в колі обмотки збудження.

Опір якоря електродвигуна розраховується:

$$R_{\text{я}} = r_{\text{оя}} + r_{\text{дп}} + r_{\text{ко}} + r_{\text{щ}} \quad (1.1)$$

де  $r_{\text{оя}}$  – опір обмотки якоря;  
 $r_{\text{дп}}$  – опір додаткових полюсів;  
 $r_{\text{ко}}$  – опір компенсаційної обмотки;  
 $r_{\text{щ}}$  – опір щіткового контакту.

Рівняння для статичних характеристик двигуна розраховуються при наступних допущеннях: реакція якоря не враховується, момент на валу двигуна дорівнює електромагнітному моменту.

Рівняння напруги:

$$U = E + I R \quad (1.2)$$

ЕРС якоря:

$$E = k \Phi \omega \quad (1.3)$$

Електромагнітний момент:

$$M = k \Phi I \quad (1.4)$$

де  $R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$  – повний опір кола якоря, Ом;

$\Phi$  – магнітний потік, Вб;

$U$  – напруга, що підводиться до якоря, В;

$k$  – конструктивний коефіцієнт двигуна.

$$k = \frac{pN}{(2\pi a)} \quad (1.5)$$

де  $p$  – число пар полюсів;

$N$  – число активних провідників обмотки якоря;

$a$  – число паралельних віток обмотки якоря.

На рисунку 3 зображено електричну схему вмикання двигуна постійного струму (ДПС) з паралельним збудженням.

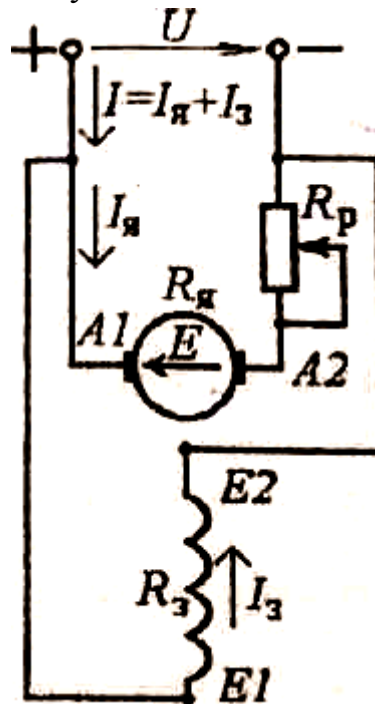


Рисунок 3 – Електрична схема вмикання двигуна постійного струму з паралельним збудженням

Варіанти паспортних даних цих двигунів наведено в таблиці 2, де позначено  $P_{2ном}$ ,  $U_{ном}$ ,  $n_{ном}$ ,  $\eta_{ном}$  – відповідно, номінальні потужність, напруга, ККД і частота обертання;  $R_{я}$  – опір якірного кола;  $R_3$  – опір обмотки збудження.

Для заданого варіанта даних необхідно виконати таке.

1. Для номінального режиму роботи визначити струм  $I_{ном}$ , споживаний двигуном з мережі; струм збудження  $I_{з.ном}$ ; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{ном}$ ; електромагнітну потужність  $P_{ЕМном}$ ; електрорушійну силу (ЕРС)  $E_{ном}$ .

Визначити частоту обертання якоря  $n_o$  у режимі ідеального холостого ходу.

Побудувати природну механічну характеристику  $n(M)$ , де  $n$ ,  $M$  – частота обертання і обертаючий момент якоря.

Аналітично або, використовуючи побудовану за пунктом 3 характеристику  $n(M)$ , визначити частоту обертання якоря при обертаючому моменті  $M = 0,6M_{ном}$ .

5. Побудувати штучну механічну характеристику  $n(M)$  при номінальній напрузі  $U_{ном}$ , якщо у коло якоря ввімкнутий регулювальний реостат з опором  $R_p = 2,5R_{я}$  (рис. 3).

6. Визначити опір  $R_p$  регулювального реостата, який треба увімкнути у коло якоря (рис. 3) для обмеження пускового струму якоря до  $I_{япуск} = 2,4 I_{яном}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_{ном}$ .

7. Знайти величину напруги живлення при пуску  $U_{пуск}$ , до якої її треба знизити при вмиканні двигуна, щоб пусковий струм якоря  $I_{я}$  пуск не перевищував би  $I_{я.пуск} = 2,3 I_{яном}$ , без вмикання додаткових опорів.

Принцип розв'язання задачі 2 подано нижче в прикладах 4 – 6.

### 1.3 Параметри та характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Схему двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС ПЗ) наведено на рисунку 4, а. Обмотка збудження включена послідовно з якорем, що створює умови для форсованої зміни потоку двигуна. При цьому аналіз динамічних властивостей двигуна без урахування вихрових струмів під час швидких змін потоку призводить у більшості випадків до значних похибок. Їх вплив можна врахувати, якщо поставити коротко замкнуту обмотку на осі  $\beta$  (рис. 4, б).

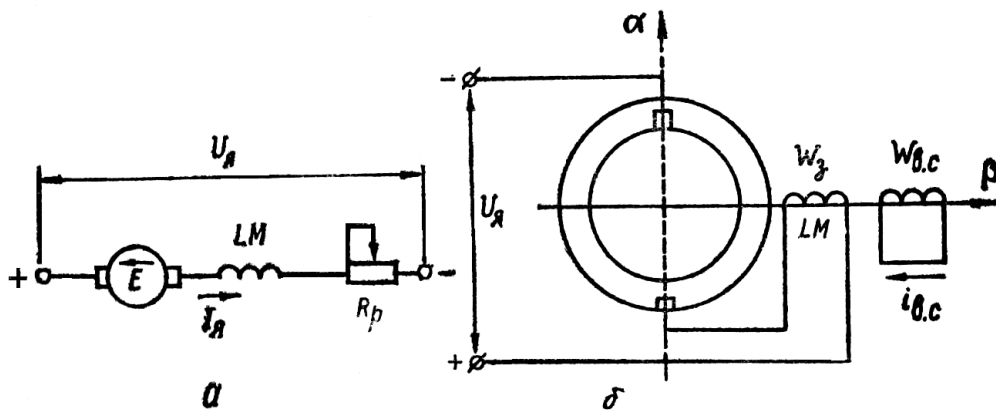


Рисунок 4 – Схема двигуна постійного струму послідовного збудження

Якщо прийняти, що ця обмотка зв'язана з потоком машини  $\Phi$  по повздовжній осі коефіцієнтом, який дорівнює одиниці, то динамічний режим роботи двигуна можна описати:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_{B.C.} R_{B.C.} + W_{B.C.} \frac{d\Phi}{dt}; \\ U_a &= c\Phi\omega + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + W_f \frac{d\Phi}{dt}; \\ M &= c\Phi i_a, \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Якщо для двигуна незалежного збудження потік не залежить від струму навантаження, то для двигуна послідовного збудження потік є функцією струму навантаження.

Електромеханічна і механічна характеристики двигуна:

$$\omega = \frac{(U - IR)}{[k\Phi(I)]}; \quad (1.7)$$

$$\omega = \frac{U}{[k\Phi(I)]} - \frac{MR}{[k\Phi(I)]^2}, \quad (1.8)$$

де  $R=R_a+R_{oz}+R_\partial$  – опір електричного кола.

Магнітний потік і струм пов'язані між собою кривими намагнічування  $\Phi(I)$  (рис. 5). Криву намагнічування можливо описати за допомогою аналітичного вираження, що дозволить отримати формули для характеристик двигуна.

Залежність  $\Phi = \varphi(I)$  – характеристика намагнічення – не має простого аналітичного виразу, її зразковий вигляд зображений на рисунку 5.

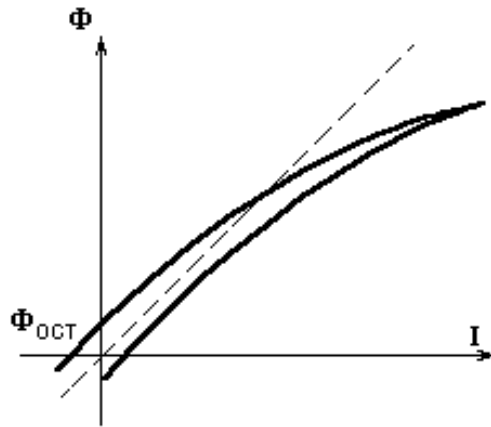


Рисунок 5 – Характеристика намагнічення машини постійного струму

У першому наближенні залежність між швидкістю двигуна і моментом, що розвивається ним, в сталому режимі можна знайти в припущенні, що потік збудження і струм в якорі двигуна зв'язані між собою лінійною залежністю (пунктир на рис. 5):

$$\Phi = \alpha I. \quad (1.9)$$

$$M = k\Phi I = k\alpha I^2, \quad (1.10)$$

Розрахункові формули для електромеханічної і механічної характеристик:

$$\omega = \frac{U}{(k\alpha I)} - \frac{R}{(k\alpha)}, \quad (1.11)$$

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k\alpha M}} - \frac{R}{(k\alpha)}. \quad (1.12)$$

Таким чином, при зробленому допущенні  $\omega(I)$  і  $\omega(M)$  характеристики двигуна послідовного збудження зображаються гіперболою (рис. 6).



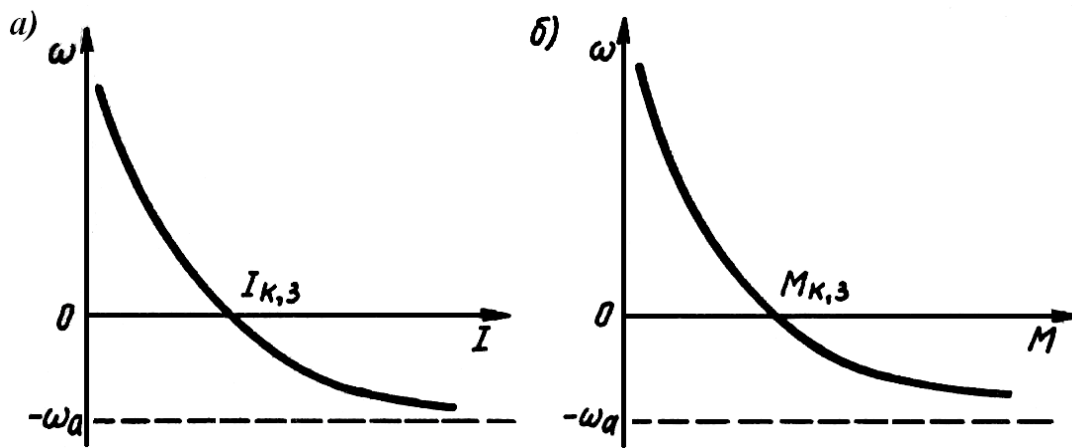


Рисунок 6 – Електромеханічна (а) і механічна характеристика ДПС ПЗ

Особливістю отриманих характеристик є у тому, що при невеликих струмах і моментах двигуна, відповідних малим моментам навантаження, його швидкість приймає великі значення, при цьому характеристики не перетинають вісь швидкості.

Жорсткість механічної характеристики двигуна послідовного збудження  $\beta = \frac{dM}{d\omega}$  змінна і зростає із збільшенням навантаження.

Таким чином, для ДПС ПЗ включеного за основною схемою (рис. 4, а) не існують режими холостого ходу і генераторного паралельно з мережею (рекуперативного гальмування), оскільки не існують ділянки характеристик у другому квадранті.

Для ДПС з послідовним збудженням електрична схема вмикання зображена на рисунку 7. Варіанти номінальних даних цих двигунів наведено в таблиці 3, де позначено:  $P_{2ном}$ ,  $U_{ном}$ ,  $n_{ном}$ , – відповідно, номінальні потужність, напруга, частота обертання та ККД;  $R_{я}$  – опір якорного кола.

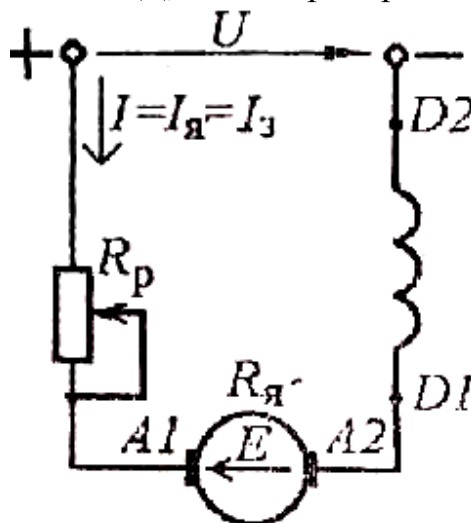


Рисунок 7 – Електрична схема вмикання двигуна постійного струму з послідовним збудженням

Криву намагнічування ДПС  $\Phi(I)$  у відносних одиницях  $k\Phi(kI)$  зображено на рисунку 8, де  $kI=I/I_{ном}$  – кратність струму збудження (який одночасно є і струмом якоря);  $k\Phi=\Phi/\Phi_{ном}$  – кратність магнітного потоку збудження ( $I_{ном}$ ,  $\Phi_{ном}$  – номінальні значення відповідних величин).

Для заданого варіанта даних необхідно виконати таке.

Для номінального режиму роботи визначити; потужність, споживану двигуном з мережі  $P_{I_{ном}}$ ; струм  $I_{ном}$ ; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{ном}$ ; ЕРС обмотки якоря  $E_{ном}$ ; обертаючий момент  $M_{ном}$ ; корисний момент на валу двигуна  $M_{2ном}$ .

Побудувати природну механічну характеристику двигуна  $n(M)$ , де  $n$  – частота обертання якоря,  $M$  – обертаючий момент якоря.

Побудувати штучну механічну характеристику  $n(M)$  при номінальній напрузі  $U_{ном}$ , якщо у коло якоря ввімкнутий регулювальний реостат з опором  $R_p = 2,5R_a$  (рис. 7).

4. Використовуючи побудовані по пунктам 2 і 3 характеристики  $n(M)$ , визначити частоти обертання двигуна при зниженні обертаючого моменту на 60%, а також при збільшенні його на 15% від номінального значення при увімкнутому регулювальному реостаті  $R_p$  та при його відсутності.

5. Визначити частоту обертання якоря при номінальному обертаючому моменті  $M_{ном}$  зі зниженням напруги живлення двигуна на 15% від номінального значення  $U_{ном}$ .

Принцип розв'язання задачі 3 подано нижче п прикладах 7–8.

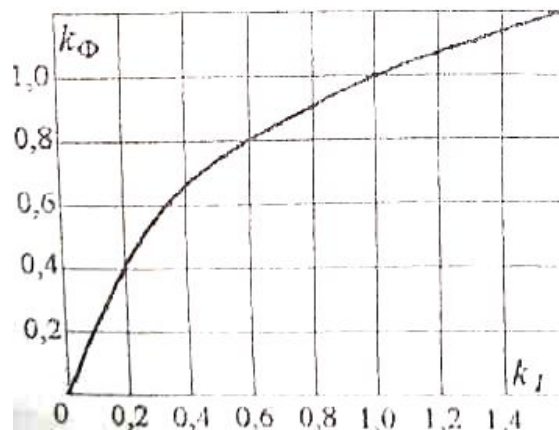


Рисунок 8 – Крива намагнічування  $\Phi(I)$  двигуна постійного струму з послідовним збудженням

## 1.4 Параметри та характеристики трифазного асинхронного двигуна

Принцип дії асинхронної машини в найзагальнішому вигляді полягає в наступному: один з елементів машини – статор використовується для створення рухомого з певною швидкістю магнітного поля, а в замкнутих провідних пасивних контурах іншого елементу – ротора наводяться ЕРС, що викликає протікання струмів і утворення сил (моментів) при їх взаємодії з магнітним полем. Всі ці явища мають місце при несинхронному – асинхронному русі ротора відносно поля, що і дало машинам такого типу назву – асинхронні.

Трифазний АД має обмотку статора, що підключається до трифазної мережі змінного струму (рис. 9, а) з напругою  $U_1$  і частотою  $f_1$ , і обмотку ротора, яка може бути виконана по двох варіантах.

Перший варіант передбачає виконання звичайної трифазної обмотки з провідників з виводами на три контактні кільця. Така конструкція відповідає АД з фазним ротором (рис. 9, а) і дозволяє включати в роторне коло різні електротехнічні елементи, наприклад резистори для регулювання швидкості, струму і моменту ЕП, і створювати з тією ж метою спеціальні схеми включення АД.

Інший вид обмотки отримують заливкою алюмінію в пази ротора (рис. 9, б), внаслідок чого утворюється конструкція, відома під назвою «біляча клітка».

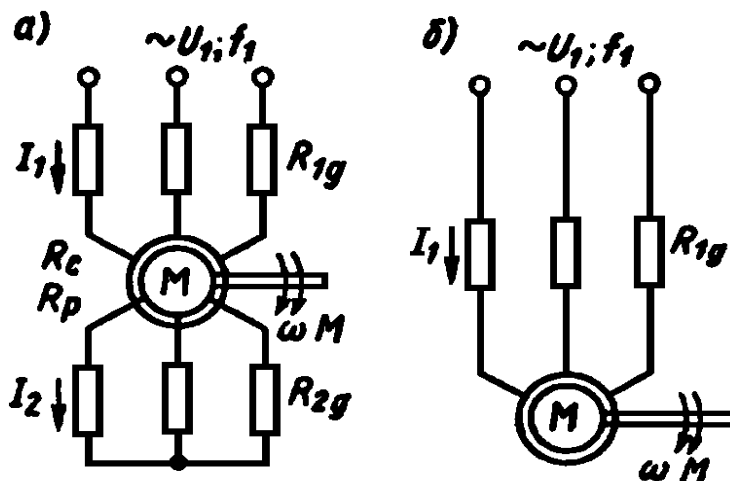


Рисунок 9 – Схеми включення АД з фазним ротором (а)  
і з короткозамкнутим ротором (б)

Схема АД з такою обмоткою, що не має електричних виводів, отримала назву короткозамкнута.

За трифазною схемою вмикання АД з фазним ротором будується трифазна еквівалентна схема (рис. 10, а) і відповідна їй двофазна модель зображена на рисунку 10, б.

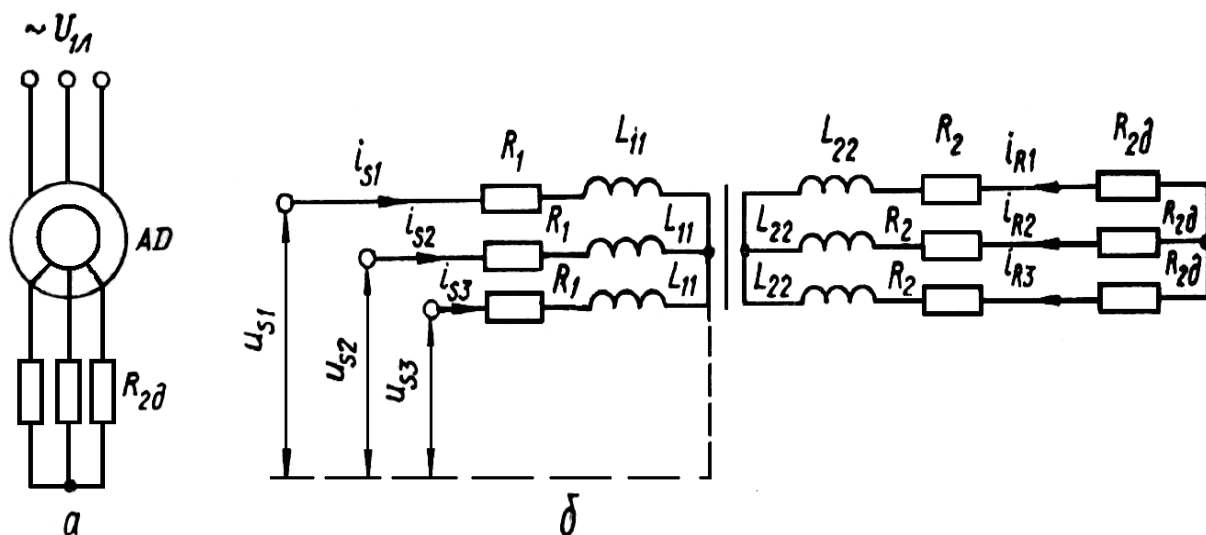


Рисунок 10 – Схеми трифазного асинхронного двигуна (а, б)

Математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії в АД можна виконати з використанням однієї з математичних моделей узагальненого електромеханічного перетворювача.

У теорії машин змінного струму вводиться поняття індуктивності головного потоку (контуру намагнічування)  $L_m = \frac{m}{2} L_{12}$ , де  $m$  – кількість фаз машини. При цьому повні зведені індуктивності фаз статора і ротора

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma}; \quad (1.13)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma}, \quad (1.14)$$

де  $L_{1\sigma}$ ,  $L_{2\sigma}$  – індуктивності полів розсіювання;

$L_m$  – індуктивність головного потоку;

$1\sigma$ ,  $2\sigma$  – коефіцієнти потоків розсіювання відповідно статорного і роторного кіл.

Вектори напруг, струмів, потокозчеплень асинхронного двигуна мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{2}{3}(u_{s1} + u_{s2}e^{j\gamma} + u_{s3}e^{j2\gamma}); \\ i_1 &= \frac{2}{3}(i_{s1} + i_{s2}e^{j\gamma} + i_{s3}e^{j2\gamma}); \\ \psi_1 &= \frac{2}{3}(\psi_{s1} + \psi_{s2}e^{j\gamma} + \psi_{s3}e^{j2\gamma}). \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Аналогічно формуються вектори, що належать до ротора асинхронного двигуна.

Рівняння механічної характеристики, записаної в формі струмів:

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{d}{dt}(e^{j\varphi_e} i_2) = u_1; \quad (1.16)$$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_m \frac{d}{dt}(e^{-j\varphi_e} i_1) = 0; \quad (1.17)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n L_m I_m [i_1 (e^{j\varphi_e} i_2)^*]. \quad (1.18)$$

Не дивлячись на простоту фізичних явищ і матеріалізуючи їх конструктивів виконати повний математичний опис процесів в асинхронній машині дуже складний:

- по-перше, всі напруги, струми, потокозчеплення – змінні, тобто характеризуються частотою, амплітудою, фазою або відповідними векторними величинами;

- по-друге, взаємодіють рухомі контури, взаємне розташування яких змінюється в просторі;

- по-третє, магнітний потік нелінійно пов'язаний із струмом (виявляється насичення магнітного кола), що намагнічує, активні опори роторному кола залежать від частоти (ефект витіснення струму), опори всіх кіл залежать від температури і тому подібне.

Електричну схему трифазного асинхронного двигуна зображено на рисунку 11.

Варіанти даних цих двигунів наведено в таблиці 4.

Номінальна напруга цих двигунів 220/380 В (фазна/лінійна) при частоті  $f = 50$  Гц.

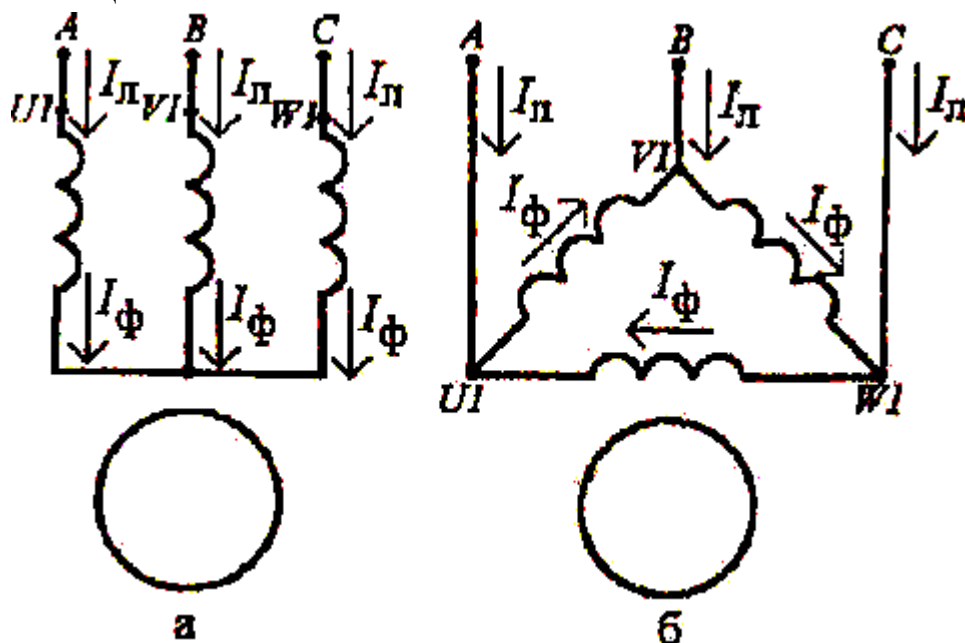


Рисунок 11 – Електрична схема трифазного асинхронного двигуна

В таблиці 4 позначено:  $P_{2ном}$  – номінальна потужність;  $p$  – число пар полюсів, утворюваних обмоткою статора;  $S_{ном}$  – номінальне ковзання;  $\lambda_M = M_{max}/M_{ном}$  – перевантажувальна здатність з обертаючого моменту ( $M_{max}$ ,  $M_{ном}$  – його максимальне і номінальне значення);  $\lambda_I = I_{пуск}/I_{ном}$  – кратність пускового струму ( $I_{пуск}$ ,  $I_{ном}$  – пускове і номінальне значення струму, споживаного з мережі);  $\cos\phi I_{ном}$  – номінальний коефіцієнт потужності. Також задано схему з'єднання обмоток статора (3 – зірка, рис. 11, а, Т – трикутник, рис. 11, б).

Відповідно цим даним треба виконати таке завдання:

- Вибрати лінійну напругу живильної трифазної мережі  $U_{ном}$ .
- Визначити синхронну частоту обертання поля статора  $n_1$ , номінальну  $n_{2ном}$  і критичну  $n_{2кр}$  частоти обертання ротора.
- Визначити потужність  $P_{Iном}$ , яку двигун споживає з мережі, і сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{ном}$  у номінальному режимі; номінальний  $I_{ном}$  і пусковий  $I_{пуск}$  струми двигуна, його номінальний  $M_{ном}$  і максимальний  $M_{max}$  обертаючі моменти.
- Розрахувати і побудувати графік залежності  $M(S)$ , де  $M$  – обертаючий момент,  $S$  – ковзання ротора. З цій залежності визначити пусковий обертаючий момент двигуна  $M_{пуск}$  і кратність цього моменту  $k_{пуск} = M_{пуск}/M_{ном}$ .

5. Розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічних характеристики – залежності  $n_2(M)$ , де  $n_2$  – частота обертання ротора, за такими умовами:

а) природну механічну характеристику при заданій напрузі мережі  $U_c$  (як у п. 3), а також визначити з неї діапазон частот обертання ротора, при яких можлива стійка робота двигуна;

б) штучну механічну характеристику при зниженій напрузі живильної мережі на 15%, тобто при  $U = 0,85U_c$ ;

в) штучну механічну характеристику при умові, що сумарний активний опір у кожній фазі обмотки ротора став у двічі більшим, ніж у двигуна, для якого розраховані попередні характеристики, тобто  $R'_2 = 2,0R_2$  (це можливо, якщо б даний двигун був двигуном з фазним ротором (рис. 12), і тоді б у фазі обмотки ротора можна було увімкнути регульовальні реостати з опорами  $R_p$ , що дорівнюють  $R_2$ ); при цьому індуктивний опір фаз обмотки ротора  $X_{20}$  не змінюється; напругу мережі вважати рівною  $U_c$ .

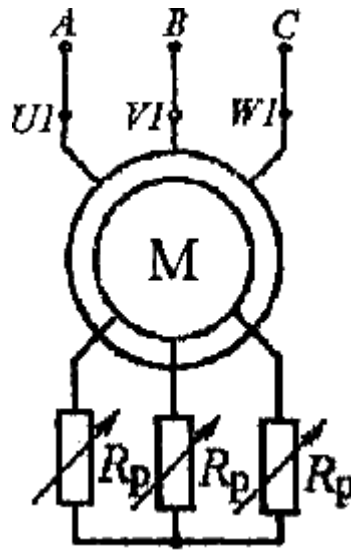


Рисунок 12 – Електрична схема трифазного асинхронного двигуна с фазним ротором

Принцип розв'язання задачі 4 подано нижче в прикладах 9–13.

## 2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

### 2.1 Параметри і характеристики однофазного трансформатора

**Приклад 1.** Однофазний трансформатор (рис. 1) має такі номінальні дані: повна потужність  $S_{ном} = 12\text{кВА}$ ; напруга первинної обмотки  $U_{1ном} = 220\text{В}$ , напруга вторинної обмотки  $U_{2ном} = 133\text{В}$ . Напруга короткого замикання  $u_k = 5\%$  від номінального значення  $U_{1ном}$ . Струм холостого ходу  $i_x = 8\%$  від номінального струму  $I_{1ном}$ .

Визначити; коефіцієнт трансформації  $n$ ; номінальні струми первинної  $I_{1ном}$  і вторинної  $I_{2ном}$  обмоток; струми аварійного короткого замикання цих обмоток  $I_{1Акз}$ ,  $I_{2Акз}$ ; струм холостого ходу первинної обмотки  $I_{10}$ .

#### **Розрахунок завдання:**

Коефіцієнт трансформації

$$n = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{220}{133} = 1,654$$

Номінальні струми обмоток

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{U_{1ном}} = \frac{12 \cdot 10^3}{220} = 54,5 \text{ А};$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{U_{2ном}} = \frac{12 \cdot 10^3}{133} = 90,2 \text{ А};$$

Напруга в режимі дослідження короткого замикання

$$U_{1к} = \frac{u_k \cdot U_{1ном}}{100} = \frac{5 \cdot 220}{100} = 11\text{В}.$$

Струми аварійного короткого замикання обмоток при номінальній напрузі

$$I_{1Акз} = I_{1ном} \frac{U_{1ном}}{U_{1к}} = 54,5 \cdot \frac{220}{11} = 1090 \text{ А};$$

$$I_{2Акз} = I_{1Акз} \cdot n = 1090 \cdot 1,654 = 1803 \text{ А}.$$

Струм в режимі холостого ходу

$$I_{10} = \frac{i_x \cdot I_{1ном}}{100} = \frac{8 \cdot 54,5}{100} = 4,36 \text{ А}.$$



**Приклад 2.** Однофазний трансформатор (рис. 1) має такі номінальні дані: напруга первинної обмотки  $U_{1ном} = 660\text{В}$ , напруга вторинної обмотки  $U_{2ном} = 400\text{В}$ ; струм первинної обмотки  $I_{1ном} = 3,8\text{А}$ . В режимі дослідного короткого замикання (КЗ) втрати потужності складають  $P_K = 80\text{Вт}$ , напруга  $U_{1к} = 33\text{В}$ . Навантаження має активно-індуктивний характер при  $\cos\varphi_H = 0,75$ .

Розрахувати та побудувати зовнішню характеристику трансформатора.

**Розрахунок завдання:**

Зовнішньою характеристикою трансформатора вважають залежність напруги  $U_2$  від коефіцієнта навантаження  $\beta$ , тобто  $U_2(\beta)$ ,

$$\text{де } \beta = \frac{I_2}{I_{2ном}};$$

$I_2$  – струм вторинної обмотки трансформатора;

$I_{2ном}$  – її номінальний струм.

З теорії трансформаторів відома наближена формула зовнішньої характеристики

$$U_2 = U_{20} \cdot \left[ 1 - \beta \cdot \frac{u_K}{100} \cdot \cos(\varphi_H - \varphi_K) \right],$$

де  $U_{20}$  – напруга вторинної обмотки в режимі ХХ;

$u_K$  – напруга короткого замикання в % від номінального значення  $U_{1ном}$ , які визначаються виразами.

$$U_{20} = U_{2ном} = 400\text{В},$$

$$u_K = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} \cdot 100\% = \frac{33}{660} \cdot 100\% = 5\%$$

Кут зсуву фаз між струмом і напругою на навантаженні

$$\varphi_H = \arccos(\cos\varphi_H) = \arccos(0,75) = 41,41^\circ$$

Кут зсуву фаз між струмом і напругою при дослідному КЗ

$$\varphi_K = \arccos\left(\frac{P_K}{U_{1к} \cdot I_{1ном}}\right) = \arccos\left(\frac{80}{33 \cdot 3,8}\right) = 50,36^\circ$$

Тоді

$$U_2 = 400 \cdot \left[ 1 - \beta \cdot \frac{5}{100} \cdot \cos(41,41^\circ - 50,36^\circ) \right] = 400 \cdot (1 - 0,0494\beta).$$

Зовнішня характеристика (рис. 13) являє собою пряму лінію, яка проводиться через дві точки: А (координати  $\beta = 0$ ;  $U_2 = 400\text{В}$ ), В (координати  $\beta = 1$ ;  $U_2 = 380\text{В}$ ).

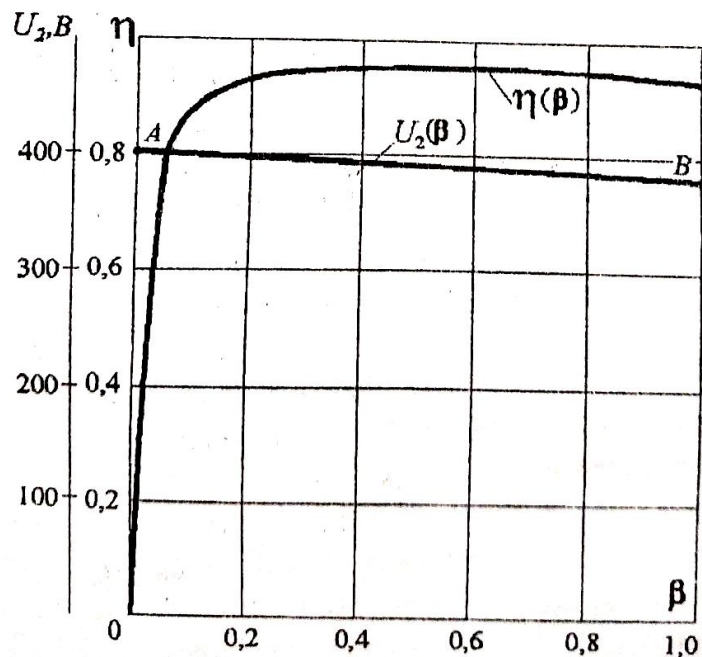


Рисунок 13 – Зовнішня характеристика однофазного трансформатора

**Приклад 3.** Однофазний трансформатор (рис. 1) має такі дані: повна номінальна потужність  $S_{ном}$  – 6кВА; втрати потужності в режимі холостого ходу (ХХ)  $P_o = 60$ Вт; втрати потужності в режимі дослідного КЗ  $P_K = 200$ Вт. Навантаження має активно-індуктивний характер при  $\cos\varphi_H = 0,75$ .

Розрахувати та побудувати графік ККД трансформатора  $\eta(\beta)$ ,

де  $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$  – коефіцієнт навантаження.

**Розрахунок завдання:**

З теорії трансформаторів відома наближена формула розрахунку залежності  $\eta(\beta)$ :

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_H}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos\varphi_H + P_o + \beta^2 \cdot P_K}$$

Підставляючи в цю формулу задані величини, визначаємо для даного трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,75}{\beta \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,75 + 60 + \beta^2 \cdot 200} = \frac{4500 \cdot \beta}{4500 \cdot \beta + 60 + \beta^2 \cdot 200}$$

Беремо ряд конкретних значень  $\beta$  від ХХ ( $\beta = 0$ ) до номінального навантаження ( $\beta=1$ ) і визначаємо чисельно залежність  $\eta(\beta)$ , яка наведена в таблиці 5.

Розрахована крива залежності  $\eta(\beta)$  побудована на рисунку 13.

Таблиця 5 – Дані розрахунку кривої ККД

$\beta$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\eta$	0	0,788	0,879	0,93	0,945	0,951	0,953	0,953	0,952	0,95	0,948	0,945

## 2.2 Параметри і характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням

**Приклад 4.** Двигун постійного струму з паралельним збудженням (рис. 3) має такі дані в номінальному режимі: потужність  $P_{2ном} = 90 \text{ кВт}$ , напруга  $U_{ном} = 220 \text{ В}$ ; частота обертання  $n_{ном} = 1060 \text{ об/хв}$ ; ККД  $\eta_{ном} = 0,892$ . Опір якірного кола складає  $R_{\text{я}} = 0,03 \text{ Ом}$ ; опір обмотки збудження –  $R_z = 25,6 \text{ Ом}$ .

Визначити для номінального режиму потужність  $P_{1ном}$  і струм  $I_{ном}$ , які двигун споживає з мережі; струм обмотки збудження  $I_{зном}$  і струм якоря  $I_{\text{яном}}$ ; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{ном}$ ; ЕРС якоря  $E_{ном}$ ; електромагнітну потужність  $P_{емном}$ ; обертаючі електромагнітний  $M_{ном}$  і корисний  $M_{2ном}$  моменти.

Указівка: при розрахунку реакцією якоря знехтувати.

### Розрахунок завдання:

Для номінального режиму:

Потужність і струм, які двигун споживає з мережі

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{90}{0,892} = 100,9 \text{ кВт};$$

$$I_{ном} = \frac{P_{1ном}}{U_{ном}} = \frac{100,9 \cdot 10^3}{220} = 458,6 \text{ А.}$$

Струм обмотки збудження і струм якоря

$$I_{зном} = \frac{U_{ном}}{R_z} = \frac{220}{25,6} = 8,6 \text{ А};$$

$$I_{\text{яном}} = I_{ном} - I_{зном} = 458,6 - 8,6 = 450 \text{ А.}$$

Сумарні втрати потужності в двигуні

$$\Delta P_{ном} = P_{1ном} - P_{2ном} = 100,9 - 90 = 10,9 \text{ кВт.}$$

ЕРС якоря

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 450 \cdot 0,03 = 206,5 \text{ В.}$$

Електромагнітна потужність

$$P_{емном} = E_{ном} \cdot I_{\text{яном}} = 206,5 \cdot 450 = 92925 \text{ Вт.}$$

Обертаючі електромагнітний і корисний моменти

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{емном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{92925}{1060} = 837,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{2ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{90 \cdot 10^3}{1060} = 810,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

**Приклад 5.** Двигун постійного струму з паралельним збудженням (рис. 3) має такі дані в номінальному режимі: напруга  $U_{ном} = 44\text{В}$ ; струм якоря  $I_{яном} = 20\text{ А}$ . Опір якоря складає  $R_я = 0,15\text{Ом}$ .

Визначити опір регулювального реостата  $R_p$ , який треба увімкнути в коло якоря для обмеження пускового струму якоря до  $I_{япуск} = 2,2I_{яном}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_{ном}$ , а також знайти значення напруги живлення  $U_{пуск}$ , до якого треба її знизити, щоб пусковий струм якоря  $I_я$  пуск не перевищував би значення  $I_{япуск} = 2,5I_{яном}$  при відсутності регулювального реостата.

**Розрахунок завдання:**

Опір регулювального реостата при  $U_{ном}$  визначається з формули для струму якоря

$$I_я = \frac{U_{ном}}{R_я + R_p} = 2,2 I_{яном}$$

Після перетворення

$$R_p = \frac{U_{ном}}{2,2 I_{яном}} - R_я = \frac{44}{2,2 \cdot 20} - 0,15 = 0,85 \text{ Ом.}$$

Напруга живлення  $U_{пуск}$  при  $R_p = 0$  для  $I_{япуск} = 2,5I_{яном}$  визначається з формули для струму якоря

$$U_{пуск} = 2,5 \cdot I_{яном} \cdot R_я = 2,5 \cdot 20 \cdot 0,15 = 75 \text{ В.}$$

**Приклад 6.** Двигун постійного струму з паралельним збудженням (рис. 3) має такі номінальні дані: напруга  $U_{ном} = 220\text{В}$ ; струми якоря і збудження:  $I_{яном} = 130\text{А}$ ,  $I_{зном} = 5\text{А}$ ; частота обертання  $n_{ном} = 1000\text{об/хв}$ . Опір якоря складає  $R_я = 0,1\text{Ом}$ .

Побудувати механічні характеристики  $n(M)$  при номінальній напрузі  $U_{ном}$ : а) природну; б) штучну – при умові, що в коло якоря увімкнено регулювальний реостат з опором  $R_p = 0,2\text{Ом}$ .

Аналітично або, користуючись природною механічною характеристикою, визначити частоту обертання якоря при  $M = 0,5 \cdot M_{ном}$ .

**Розрахунок завдання:**

Відомо, що електрорушійна сила (ЕРС) двигуна  $E$  і електромагнітний момент  $M$  визначаються формулами:

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n; \tag{2.1}$$

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \quad (2.2)$$

де  $C_E, C_M$  – електрична і механічна сталі двигуна;

$\Phi$  – магнітний потік;

$I_{\text{я}}$  – струм якоря.

В номінальному режимі:

$$E_{\text{ном}} = C_E \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot n_{\text{ном}}, \quad (2.3)$$

$$M_{\text{ном}} = C_M \cdot \Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я ном}} \quad (2.4)$$

З формул (2.1 – 2.4) маємо

$$\frac{E}{E_{\text{ном}}} = \frac{\Phi \cdot n}{\Phi_{\text{ном}} \cdot n_{\text{ном}}}, \quad (2.5)$$

$$\frac{M}{M_{\text{ном}}} = \frac{\Phi \cdot I_{\text{я}}}{\Phi_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я ном}}} \quad (2.6)$$

Якщо напруга живлення є незмінною, то в двигуні з паралельним збудженням магнітний потік  $\Phi$  майже не змінюється навіть при зміні його навантаження. Тому, враховуючи, що  $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ , маємо з формул (2.5) і (2.6)

$$n = n_{\text{ном}} \cdot \frac{E}{E_{\text{ном}}}, \quad (2.7)$$

$$I_{\text{я}} = I_{\text{я ном}} \cdot \frac{M}{M_{\text{ном}}}. \quad (2.8)$$

Відомо також, що ЕРС визначається ще формулою

$$E = U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}. \quad (2.9)$$

Значення струму з формули (2.8) підставляємо в формулу (2.9) і отримуємо

$$E = U - I_{\text{я ном}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \frac{M}{M_{\text{ном}}}. \quad (2.10)$$

Підставляючи в формулу (2.7) значення  $E$ , з формули (2.10) маємо базову формулу для розрахунку механічних характеристик

$$n = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot R_{\text{я}}. \quad (2.11)$$

Для даного двигуна визначаються:

номінальна електрорушійна сила

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{я ном}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 130 \cdot 0,1 = 207 \text{ В};$$

номінальна електромагнітна потужність

$$P_{EM\text{ ном}} = E_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я ном}} = 207 \cdot 130 = 26910 \text{ Вт};$$

номінальний електромагнітний момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{EM\text{ ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{26910}{1000} = 257 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Природна механічна характеристика  $n(M)$  при  $U = U_{\text{ном}}$  визначається за базовою формулою (2.11) таким чином

$$n = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot R_{\text{я}} = n_0 - C \cdot M \cdot R_{\text{я}}, \quad (2.12)$$

де частота обертання якоря при холостому ході ( $M = 0$ )

$$n_0 = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} = 1000 \cdot \frac{220}{207} = 1063 \frac{\text{об}}{\text{хв}};$$

стала двигуна

$$C = \frac{I_{\text{я ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} = \frac{130 \cdot 1000}{207 \cdot 257} = 2,444 \frac{\text{об}}{\text{хв} \cdot \text{Ом} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}}.$$

Природна механічна характеристика є прямою лінією (рис. 14), яку можна побудувати за двома точками: точці А з координатами ( $M = 0$ ,  $n = n_0 = 1063 \text{ об/хв}$ ) і точці В з координатами ( $M = M_{\text{ном}} = 257 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $n = n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об/хв}$ ).

Штучна механічна характеристика  $n(M)$  при вмиканні регулювального реостата з опором  $R_p = 0,2 \text{ Ом}$  і при збереженні  $U = U_{\text{ном}}$  визначається за базовою формулою (2.11) таким чином.

$$n = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} - \frac{I_{\text{я ном}} \cdot n_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}} \cdot M_{\text{ном}}} \cdot M \cdot (R_{\text{я}} + R_p) = n_0 - C \cdot M \cdot (R_{\text{я}} + R_p),$$

де частота обертання якоря при холостому ході  $n_0$  та стала двигуна  $C$  зберігаються, як і для випадку розрахунку природної механічної характеристики.

Штучна механічна характеристика теж є прямою лінією (рис. 14), яка теж будується за двома точками.

Точка А має координати ( $M = 0$ ,  $n = n_0 = 1063 \text{ об/хв}$ ).

Для другої точці С при номінальному моменті  $M = M_{\text{ном}} = 257 \text{ Н} \cdot \text{м}$  розрахуємо частоту обертання.

$$n = n_0 - C \cdot M \cdot (R_{\text{я}} + R_p) = 1063 - 2,444 \cdot 257 \cdot (0,1 + 0,2) = 875 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

Частота обертання  $n'$  при  $U_{ном}$  і  $M = 0,5M_{ном}$  і при відсутності регулювального реостата визначається за формулою (12):

$$n' = n_D - C \cdot 0,5M_{ном} \cdot R_d = 1063 - 2,444 \cdot 0,5 \cdot 257 \cdot 0,1 = 1031,5 \frac{об}{хв}.$$

Такий же результат отримуємо графічно з природної механічної характеристики для  $M = 0,5M_{ном}$  (рис. 14, точка D).

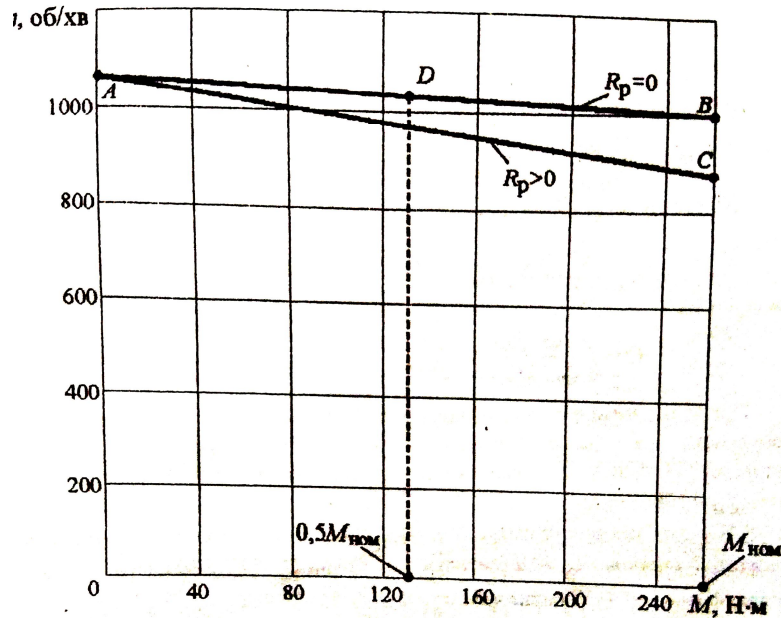


Рисунок 14 – Природні механічні характеристики

## 2.3 Параметри і характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням

**Приклад 7.** Двигун постійного струму з послідовним збудженням (рис. 7) має такі номінальні дані: потужність  $P_{2ном} = 12 \text{ кВт}$ ; напруга  $U_{ном} = 220 \text{ В}$ ; частота обертання  $n_{ном} = 600 \text{ об/хв}$ ; ККД  $\eta_{ном} = 0,83$ . Опір якорного кола з урахуванням обмотки збудження складає  $R_{\text{я}} = 0,2 \text{ Ом}$ .

Визначити для номінального режиму: потужність  $P_{1ном}$  і струм  $I_{ном}$ , які двигун споживає з мережі; сумарні втрати потужності в двигуні  $\Delta P_{ном}$ ; ЕРС якоря  $E_{ном}$ ; електромагнітну потужність  $P_{ЕМном}$ ; обертаючі електромагнітний  $M_{ном}$  і корисний  $M_{2ном}$  моменти.

**Розрахунок завдання:**

Для номінального режиму роботи:

потужність і струм, які двигун споживає з мережі

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{12}{0,83} = 14,46 \text{ кВт};$$
$$I_{ном} = \frac{P_{1ном}}{U_{ном}} = \frac{14,46 \cdot 10^3}{220} = 65,7 \text{ А};$$

Струм якоря

$$I_{\text{я ном}} = I_{ном} = 65,7 \text{ А};$$

сумарні втрата потужності в двигуні

$$\Delta P_{ном} = P_{1ном} - P_{2ном} = 14,46 - 12 = 2,46 \text{ кВт};$$

ЕРС якоря

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{\text{я ном}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 65,7 \cdot 0,2 = 206,86 \text{ В};$$

електромагнітна потужність

$$P_{ЕМ ном} = E_{ном} \cdot I_{\text{я ном}} = 206,86 \cdot 65,7 = 13591 \text{ Вт};$$

обертаючі електромагнітний і корисний моменти

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ЕМ ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{13591}{600} = 216,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$
$$M_{2ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{12 \cdot 10^3}{600} = 191 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

**Приклад 8.** Двигун постійного струму з послідовним збудженням (рис. 7) має такі номінальні дані: напруга  $U_{ном} = 110 \text{ В}$ ; струм  $I_{ном} = 100 \text{ А}$ ; частота обертання  $n_{ном} = 750 \text{ об/хв}$ . Опір якорного кола з урахуванням обмотки збудження складає  $R_{\text{я}} = 0,2 \text{ Ом}$ . Характеристику намагнічування ДПС  $\Phi(I)$  –



залежність магнітного потоку  $\Phi$  від струму  $I$  у відносних одиницях  $k_\Phi(k_I)$  зображено на рисунку 8.

Побудувати при  $U_{ном}$ : а) природну та б) штучну механічні характеристики  $n(M)$ . Штучну механічну характеристику побудувати при вмиканні в коло якоря регулювального реостата з опором  $R_p = 0,2 \text{ Ом}$ .

Використовуючи побудовані природну та штучну механічні характеристики  $n(M)$ , визначити частота обертання двигуна при зниженні обертаючого моменту на 50%, а також при збільшенні його на 20% від номінального значення при увімкнутому регулювальному реостаті з опором  $R_p$  та при його відсутності.

Визначити частоту обертання якоря при номінальному обертаючому моменті  $M_{ном}$ , але зі зниженням напруги живлення двигуна на 20% під номінального значення  $U_{ном}$  при  $R_p = 0$ .

### **Розрахунок завдання:**

Для побудови механічних характеристик  $n(M)$  ДПС з послідовним збудженням не можна безпосередньо скористатися формулою (2.11), як була отримана для ДПС з паралельним збудженням (див. приклад 6). Справа у тому, що тепер у ДПС з послідовним збудженням магнітний потік збудження  $\Phi$  залежить від струму якоря  $I_a$ , що подано на рисунку 8 у відносних одиницях  $k_\Phi(k_I)$ , і змінюється разом з ним ( $I_a = I = I_z$ , де  $I, I_z$  – відповідно, струм, споживаний двигуном з мережі, та струм обмотки збудження).

Тому зроблено наступне перетворення формул (2.1, 2.2, 2.9) з прикладу 6. З формули ЕРС

$$E = C_E \cdot n \cdot \Phi$$

маємо

$$n = \frac{E}{C_E \cdot \Phi}$$

Підставимо у останню  $E = U - R_a \cdot I_a$ , і одержимо

$$n = \frac{U - R_a \cdot I_a}{C_E \cdot \Phi}. \quad (2.13)$$

З використанням відносних значень  $k_I$  і  $k_\Phi$  виражаємо струм якоря і магнітний потік:

$$\begin{aligned} I_a &= k_I \cdot I_{а ном}; \\ \Phi &= k_\Phi \cdot \Phi_{ном}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Підставимо це у формулу (2.13) і тоді

$$n = \frac{U - k_I \cdot I_{я ном} \cdot R_я}{C_E \cdot k_\Phi \cdot \Phi_{ном}} \quad (2.15)$$

У номінальному режимі ЕРС якоря

$$E_{ном} = C_E \cdot n_{ном} \cdot \Phi_{ном},$$

Відкіля

$$\Phi_{ном} = \frac{E_{ном}}{C_E \cdot n_{ном}},$$

з урахуванням чого з (2.15) отримаємо формулу для розрахунків частоти обертання якоря

$$n = n_{ном} \frac{U - k_I \cdot I_{я ном} \cdot R_я}{k_\Phi \cdot E_{ном}} \quad (2.16)$$

Крім того, на основі формули обертаючого моменту

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_я$$

з урахуванням (2.14) маємо

$$M = C_M \cdot k_\Phi \cdot k_I \cdot \Phi_{ном} \cdot I_{я ном},$$

і, через те, що

$$M_{ном} = C_M \cdot \Phi_{ном} \cdot I_{я ном},$$

отримаємо формулу для розрахунку обертаючого електромагнітного моменту

$$M = k_I \cdot k_\Phi \cdot M_{ном} \quad (2.17)$$

Для побудови механічних характеристик знайдемо такі дані:  
номінальна ЕРС

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{я ном} \cdot R_я = 110 - 100 \cdot 0,2 = 90 \text{ В};$$

номінальна електромагнітна потужність

$$P_{ЕМ ном} = E_{ном} \cdot I_{ном} = 90 \cdot 100 = 9000 \text{ Вт};$$

номінальний обертаючий електромагнітний момент

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ЕМ ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{9000}{750} = 114,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для побудови природної механічної характеристики  $n(M)$  скористаємось формулою (2.16), яка при номінальній напрузі  $U = U_{ном}$  має вигляд

$$n = n_{ном} \cdot \frac{U_{ном} - k_I \cdot I_{я ном} \cdot R_{я}}{k_{\phi} \cdot E_{ном}}, \quad (2.18 \text{ б})$$

а також формулою (2.17) і ще кривою намагнічування  $k_{\phi}(k_I)$  у відносних одиницях, що зображена на рисунку 5.

Задаючись значеннями  $k_I$ , визначаємо  $k_{\phi}$  за рисунком 5, а величини  $M$  та  $n$  за формулами (2.17) і (2.18). Дані усіх розрахунків зводимо до таблиці 6. За результатами розрахунку на рисунку 10 зображена природна механічна характеристика (крива 1).

Таблиця 6 – Дані розрахунку механічних характеристик

$k_I$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$k_{\phi}$	0,65	0,8	0,91	1,0	1,08
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	29,8	55,0	83,4	114,6	148,5
$n, \text{об/хв при } R_p=0$	1308	1021	861	750	664
$n, \text{об/хв при } R_p=0,2 \text{ Ом}$	1205	896	714	583	478

Для побудови штучної механічної характеристики  $N(M)$  знов при  $U_{ном}$ , але з додатковим опором у колі якоря  $R_p = 0,2 \text{ Ом}$  з формули (2.18) отримуємо модифіковану формулу

$$n = n_{ном} \cdot \frac{U_{ном} - k_I \cdot I_{я ном} \cdot (R_{я} + R_p)}{k_{\phi} \cdot E_{ном}}. \quad (2.19)$$

Решта залишається, як і у попередньому випадку, тобто скористаємось формулою (2.17) і кривою намагнічування  $k_{\phi}(k_I)$ .

Задаючись значеннями  $k_I$  визначаємо  $k_{\phi}$  за рисунком 8, а величини  $n$  та  $M$  за формулами (2.17) і (2.19). Усі розрахунки зводимо до таблиці 6. За результатами розрахунку на рисунку 15 зображена штучна механічна характеристики (крива 2).

Користуючись природною механічною характеристикою, визначаємо частоти обертання якоря:

$$n_A = 1000 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \text{ при } M = 0,5 \cdot M_{ном} = 57,3 \text{ Н} \cdot \text{м (точка А)},$$

$$n_B = 685 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \text{ при } M = 1,2 \cdot M_{ном} = 137,5 \text{ Н} \cdot \text{м (точка В)}.$$

Користуючись штучною механічною характеристикою визначаємо частота обертання якоря:

$$n_C = 875 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \text{ при } M = 0,5 \cdot M_{\text{ном}} = 57,3 \text{ Н} \cdot \text{м (точка C)},$$

$$n_D = 510 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \text{ при } M = 1,2 \cdot M_{\text{ном}} = 137,5 \text{ Н} \cdot \text{м (точка D)}.$$

При зниженні напруги живлення на 20%, порівняно з його номінальним значенням, частота обертання якоря при  $M_{\text{ном}}$  і  $R_p = 0$  визначається таким чином.

Щоб за формулою (2.17) отримати  $M = M_{\text{ном}}$  необхідно взяти  $k_I = 1$ ;  $k_\phi = 1$ . Тоді, користуючись формулою (2.16), з урахуванням того, що у даному випадку  $U = 0,8U_{\text{ном}}$ , маємо:

$$n = n_{\text{ном}} \cdot \frac{0,8 \cdot U_{\text{ном}} - I_{\text{я ном}} \cdot R_{\text{я}}}{E_{\text{ном}}} = 750 \cdot \frac{0,8 \cdot 110 - 100 \cdot 0,2}{90} = 567 \text{ об/хв.}$$

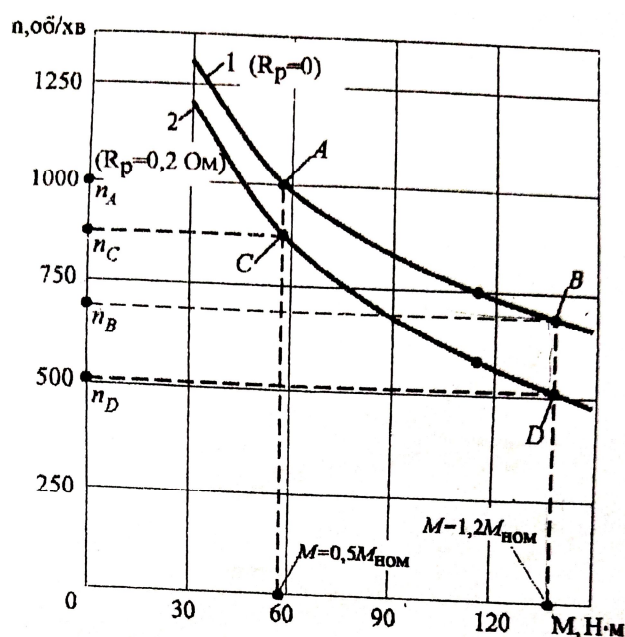


Рисунок 15 – Штучна механічна характеристика

## 2.4 Параметри і характеристики трифазного асинхронного двигуна

**Приклад 9.** Трифазний асинхронний двигун має такі дані: номінальна напруга 220/380В (фазна/лінійна) при частоті  $f_1 = 50\text{Гц}$ ; номінальне ковзання  $S_{\text{ном}} = 0,05$ ; число нар полюсів  $p = 6$ ; перевантажна здатність з обертаючого моменту  $\lambda_M = 1,8$ . Схема з'єднання обмоток статора – зірка (рис. 11, а).

Вибрати лінійну напругу живильної мережі  $U_c$  і визначити синхронну частоту обертання поля статора, номінальну  $n_{2\text{ном}}$  і критичну  $n_{2\text{кр}}$  частоти обертання ротора.

### **Розрахунок завдання:**

При з'єднанні обмоток статора зіркою

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi,$$

де  $U_L$  і  $U_\Phi$  – відповідно лінійна та фазна напруги обмотки статора.

Тому лінійна напруга мережі  $U_c = U_L = 380\text{В}$ .

Синхронна частота обертання поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \frac{\text{об}}{\text{хв}},$$

Номінальна частота обертання ротора

$$n_{2\text{ном}} = n_1 (1 - S_{\text{ном}}) = 500 (1 - 0,05) = 475 \frac{\text{об}}{\text{хв}},$$

Щоб визначити критичну частоту обертання ротора

$$n_{2\text{кр}} = n_1 (1 - S_{\text{кр}}),$$

необхідно знати критичне ковзання двигуна  $S_{\text{кр}}$ . Це таке значення ковзання  $S$ , при якому обертаючий момент  $M$  досягає максимального значення  $M_{\text{max}}$ .

Для визначення  $S_{\text{кр}}$  використовуємо відому формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{S/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S}$$

і номінальний режим роботи двигуна, при якому номінальному значенню ковзання відповідає номінальне значення обертаючого моменту.

$$M_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{S_{\text{ном}}/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S_{\text{ном}}}.$$

Зважаючи на те, що перевантажна здатність з обертаючого моменту

$$\lambda_M = M_{\max}/M_{\text{ном}},$$

з попередньої формули маємо

$$\frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{ном}}} + \frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{кр}}} = 2\lambda_M,$$

звідки отримуємо квадратне рівняння

$$S_{\text{кр}}^2 - 2\lambda_M S_{\text{ном}} S_{\text{кр}} + S_{\text{ном}}^2 = 0,$$

розв'язання якого дає вираз та значення критичного ковзання

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}}(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0,05(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,165.$$

Таким чином, критична частота обертання ротора

$$n_{2\text{кр}} = n_1(1 - S_{\text{кр}}) = 500(1 - 0,165) = 417,5 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

**Приклад 10.** Трифазний асинхронний двигун має такі дані у номінальному режимі: потужність на валу  $P_{2\text{ном}} = 22\text{кВт}$ ; напруга 220/380В (фазна/лінійна); ККД  $\eta_{\text{ном}} = 0,9$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,88$ . Кратність пускового струму  $\lambda_I = 5,5$ . Схема з'єднання обмоток статора – трикутник (рис. 11, б). Вибрати лінійну напругу живильної мережі  $U_c$  і визначити номінальні та пускові струми обмотки статора.

#### **Розрахунок завдання:**

При з'єднанні обмотки статора трикутником  $U_{\text{л}} = U_{\phi}$ , тому лінійна напруга мережі  $U_c = U_{\text{л}} = U_{\phi} = 220\text{В}$ .

Зважаючи на те, що потужність, яка споживається двигуном з мережі, має вираз, з одного боку,

$$P_{\text{Iном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}},$$

а з іншого

$$P_{\text{Iном}} = \sqrt{3}U_c I_{\text{л ном}} \cos\varphi_{\text{Iном}},$$

отримуємо номінальні лінійний та фазний струм обмотки статора двигуна

$$I_{\text{л ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{Iном}}} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,88} = 72,9 \text{ А};$$

$$I_{\phi \text{ ном}} = \frac{I_{\text{л ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{72,9}{\sqrt{3}} = 41,7 \text{ А}.$$

Пускові лінійний та фазний струми обмотки статора двигуна

$$I_{\text{л пуск}} = \lambda_I \cdot I_{\text{л ном}} = 5,5 \cdot 72,9 = 401 \text{ А};$$

$$I_{\text{ф пуск}} = \lambda_I \cdot I_{\text{ф ном}} = 5,5 \cdot 41,7 = 229 \text{ А}.$$

**Приклад 11.** Трифазний асинхронний двигун вмикається в мережу з лінійною напругою  $U_c = 380\text{В}$  і має такі дані у номінальному режимі: потужність на валу  $P_{2\text{ном}} = 45\text{кВт}$ ; напруга 220/380 (фазна/лінійна); частота обертання ротора  $n_{2\text{ном}} = 580\text{об/хв.}$ ; ККД  $\eta_{\text{ном}} = 0,9$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{1\text{ном}} = 0,81$ . Крім того, двигун має кратність пускового струму  $\lambda_I = 5,0$ ; його перевантажна здатність з обертаючого моменту  $\lambda_M = 1,8$ .

Визначити номінальну потужність  $P_{1\text{ном}}$ , споживану двигуном із мережі; суму всіх втрат потужності у двигуні  $\Delta P_{\text{ном}}$ ; номінальний і пусковий струми обмотки статора двигуна; номінальний  $M_{\text{ном}}$  і максимальний  $M_{\text{max}}$  обертаючі моменти.

**Розрахунок завдання:**

Номінальна потужність, споживана двигуном із мережі

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{45}{0,9} = 50 \text{ кВт}.$$

Сума всіх втрат у двигуні

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 50 - 45 = 5 \text{ кВт}.$$

При заданій напрузі мережі  $U_c = 380\text{В}$  фази обмотки статора з'єднуються зіркою (рис. 11, а). При цьому лінійний і фазний струми однакові:

$$I_{\text{л ном}} = I_{\text{ф ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{1\text{ном}}} = \frac{45 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,81} = 93,8 \text{ А}.$$

Пускові струми:

$$I_{\text{л пуск}} = I_{\text{ф пуск}} = \lambda_I \cdot I_{\text{л ном}} = 5,0 \cdot 93,8 = 469 \text{ А}.$$

Номінальний і максимальний обертаючі моменти

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{45 \cdot 10^3}{580} = 741 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{max}} = \lambda_M \cdot M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 741 = 1334 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Єфремов И. С. Теория и расчет троллейбусов (электрическое оборудование). Ч.2 : учебное пособие для вузов / И. С. Єфремов, Г. В. Косарев. – М.: Высш. школа, 1981. – 248 с., ил.
2. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посібник / [М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін. за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського]. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.
3. Гаврилов Я. И. «Вагоны метро с импульсными преобразователями» / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацаканов – М. : «Транспорт» – 1986 г.
4. Костинюк Л. Д. Моделивання електроприводів : навч. посібник / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
5. Максимов А. Н. Городской электротранспорт: троллейбус : учебник для нач. проф. образования / А. Н. Максимов. – М. : Издательский центр «Академия», 2004 – 256 с.
6. Добровольская Э. М. Электropоезда метрополитена : учебник для нач. проф. образования / Э. М. Добровольская. – М. : ИРПО: М.: Изд. центр «Академия», 2003. – 320 с.
7. Преобразовательная техника в электроприводе и электрическом транспорте: Тематический сб. / ред. : И. С. Ефремов. и В. А. Лабунцов. – М. :, 1980 – 140 с. Ил. – /труды / мош. Энергетич. ин-т.
8. Фролов Ю. С. Метрополитены : учебник для вузов / Ю. С. Фролов, Д. М. Голицынский, А. П. Ледяев; Под ред. Ю. С. Фролова. – М. : «Желдориздат», 2001. – 528 с.
9. Григорьевич Я. В. Автоматический расчет тиристорных схем / Я. В. Григорьевич. – Харків : Вища школа. При ХГУ. 1986. – 159 с.



## ДОДАТКИ

Таблиця 1 – Параметри однофазного трансформатора і його навантаження

№ варіанта	Повна потуж- ність, кВА	Номинальні напруги обмотки, В		Струм XX, %	Втрати потужності, Вт		Напру- га КЗ, %	Коефіцієнт поту- жності активно- індуктивного навантаження
		ВН	НН		XX	КЗ		
		$U_{ВНном}$	$U_{ННном}$		$P_o$	$P_k$		
1	0,25	660	230	17,6	6	18	7,3	0,90
2	0,25	380	230	17,5	6	18	7,2	0,85
3	0,5	660	230	15,9	11	32	6,7	0,90
4	0,5	380	230	15,9	10	32	6,6	0,85
5	0,63	660	230	14,3	11	36	6,0	0,90
6	0,63	380	230	14,2	11	36	6,0	0,85
7	1	660	230	12,6	15	50	5,4	0,90
8	1	380	230	12,5	15	49	5,3	0,85
9	1,6	660	230	10,9	20	68	4,6	0,90
10	1,6	380	230	10,8	20	67	4,6	0,85
11	2,5	660	230	9,1	25	88	3,9	0,90
12	2,5	380	230	9,0	25	86	3,8	0,85
13	4	660	230	8,3	35	125	3,5	0,90
14	4	380	230	8,2	34	122	3,5	0,85
15	6,3	660	230	9,6	60	223	4,1	0,90
16	6,3	380	230	9,5	59	218	4,0	0,85
17	10	660	230	9,2	88	333	3,9	0,90
18	10	380	230	9,1	85	325	3,8	0,85
19	16	660	230	9,1	131	509	3,8	0,90
20	16	380	230	8,9	127	497	3,7	0,85
21	0,25	660	133	17,5	6	18	7,2	0,85
22	0,25	380	133	17,4	6	17	7,1	0,80
23	0,25	220	133	17,3	6	17	7,0	0,75
24	0,5	660	133	15,9	10	32	6,6	0,85
25	0,5	380	133	15,7	10	31	6,5	0,80
26	0,5	220	133	15,6	10	30	6,3	0,75
27	0,63	660	133	14,2	11	36	6,0	0,85
28	0,63	380	133	14,1	11	35	5,8	0,80
29	0,63	220	133	13,9	11	34	5,7	0,75
30	1	660	133	12,5	15	49	5,3	0,85

Таблиця 2 – Параметри двигуна постійного струму з паралельним збудженням

№ варіанта	Потужність, кВт	Напру- га, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2ном}$	$U_{ном}$	$n_{ном}$	$\eta_{ном}$	$R_{я}$	$R_z$
1	4	220	900	0,723	1,60	191
2	3,15	220	750	0,693	2,38	255
3	2	220	450	0,576	3,16	199
4	4,25	220	730	0,680	1,61	110
5	3	220	475	0,603	3,14	139
6	3,55	220	425	0,601	2,67	117
7	15	220	1400	0,779	0,37	103
8	7,5	220	1000	0,760	0,79	175
9	6	220	875	0,740	0,80	85
10	4,25	220	580	0,650	1,84	105
11	11	220	1060	0,785	0,45	100
12	8,5	220	875	0,760	0,62	98
13	8	220	600	0,680	0,85	58
14	11	220	800	0,760	0,48	73
15	8,5	220	515	0,680	0,93	91
16	15	220	850	0,807	0,21	45
17	11	220	530	0,705	0,56	46
18	15	220	580	0,753	0,34	44
19	17	220	500	0,730	0,33	34
20	20	220	475	0,750	0,26	32
21	7,5	440	2120	0,871	1,54	1124
22	5,5	440	1450	0,814	3,06	964
23	4,25	440	975	0,740	5,93	971
24	3,14	440	730	0,690	9,64	994
25	7,5	440	1450	0,825	1,54	414
26	5,5	440	900	0,741	4,96	1304
27	4,25	440	690	0,674	6,62	438
28	10	440	1320	0,812	1,23	260
29	7,5	440	975	0,810	2,53	1045
30	5,5	440	690	0,708	5,24	671

Таблиця 3 – Параметри двигуна постійного струму з послідовним збудженням

№ варіанта	Потуж- ність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2ном}$	$U_{ном}$	$n_{ном}$	$\eta_{ном}$	$R_{я}$
1	45	220	1000	0,870	0,06
2	22	440	600	0,840	0,64
3	11	220	750	0,830	0,35
4	55	440	500	0,880	0,22
5	37	220	1500	0,880	0,08
6	15	440	750	0,800	1,07
7	10	220	500	0,770	0,46
8	45	440	1000	0,870	0,27
9	22	220	1500	0,840	0,17
10	11	440	1000	0,830	1,49
11	55	220	600	0,880	0,05
12	37	440	750	0,880	0,30
13	15	220	500	0,800	0,29
14	10	440	1500	0,770	1,99
15	45	220	750	0,870	0,07
16	22	440	500	0,840	0,62
17	11	220	1000	0,830	0,34
18	55	440	1500	0,880	0,21
19	37	220	1000	0,880	0,08
20	15	440	600	0,800	1,24
21	10	220	750	0,770	0,45
22	45	440	500	0,870	0,26
23	22	220	1500	0,840	0,17
24	11	440	750	0,830	1,44
25	4	220	900	0,723	1,45
26	3,15	220	750	0,693	1,96
27	2	220	450	0,576	3,55
28	4,25	220	730	0,680	1,49
29	3	220	475	0,603	2,32
30	3,55	220	425	0,601	1,96

Таблиця 4 – Параметри трифазних асинхронних двигунів

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Число пар полісів	Номинальне ковзання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{ном}}$	$p$	$S_{\text{ном}}$	$\lambda_{\text{м}}$	$\lambda_{\text{л}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos \varphi_{1\text{ном}}$
1	Т	0,09	1	0,086	2,2	5,0	0,600	0,700
2	З	0,12	1	0,097	2,2	5,0	0,630	0,700
3	Т	0,18	1	0,080	2,2	5,0	0,660	0,760
4	З	0,25	1	0,080	2,2	5,0	0,680	0,770
5	Т	0,37	1	0,083	2,2	5,0	0,700	0,860
6	З	0,55	1	0,085	2,2	5,0	0,730	0,860
7	Т	0,75	1	0,080	2,2	5,5	0,770	0,870
8	З	1	1	0,065	2,2	5,5	0,720	0,870
9	Т	1,1	1	0,075	2,2	5,5	0,775	0,870
10	З	1,5	1	0,072	2,2	6,5	0,810	0,850
11	Т	2,2	1	0,069	2,2	6,5	0,830	0,870
12	З	3	1	0,067	2,2	6,5	0,845	0,880
13	Т	4	1	0,065	2,2	7,5	0,865	0,890
14	З	5,5	1	0,064	2,2	7,5	0,875	0,910
15	Т	11	1	0,050	2,4	7,5	0,840	0,890
16	З	0,09	2	0,086	2,2	5,0	0,550	0,600
17	Т	0,12	2	0,080	2,2	5,0	0,630	0,660
18	З	0,18	2	0,087	2,2	5,0	0,640	0,640
19	Т	0,25	2	0,080	2,2	5,0	0,680	0,650
20	З	0,37	2	0,090	2,2	5,0	0,680	0,690
21	Т	0,55	2	0,087	2,2	4,5	0,705	0,700
22	З	0,75	2	0,087	2,2	4,5	0,720	0,730
23	Т	1,1	2	0,067	2,2	5,0	0,750	0,810
24	З	1,5	2	0,067	2,2	5,0	0,770	0,830
25	Т	2,2	2	0,066	2,2	6,0	0,800	0,830
26	З	3	2	0,066	2,2	6,5	0,820	0,830
27	Т	4	2	0,065	2,2	6,0	0,840	0,840
28	З	5,5	2	0,065	2,2	7,0	0,855	0,860
29	Т	7,5	2	0,064	2,2	7,5	0,875	0,860
30	З	11	2	0,060	2,4	7,5	0,875	0,870

*Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до організації самостійної роботи, проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД  
ЗАГАЛЬНО-ПРОМИСЛОВИХ МЕХАНІЗМІВ»**

*(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ПАВЛЕНКО** Тетяна Павловна,  
**ДОНЕЦЬ** Олександр Вадимович

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2015, поз. 150 М

---

Підп. до друку 06.07.2018. Формат 60 x 84/16  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,6.  
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.