

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ**  
**ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

*Кафедра тракторів, автомобілів  
та технічного сервісу машин*

*Ярошенко Л. В.*

***ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН***

*Частина 3*

***АСИНХРОННІ ДВИГУНИ***

*Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
для студентів сільськогосподарських вищих навчальних  
закладів спеціальності: 6.091902 – “Механізація сільського  
господарства”*

ВІННИЦЯ – 2003

## **УДК 631.3-52:621.31(075.3)**

Ярошенко Л. В. Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарських машин. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів спеціальності: 6.091902 – “Механізація сільського господарства”: в 5 ч. – Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2003. - Ч. 3.: Асинхронні двигуни. – 52 с.

Рецензенти:

д. т. н., проф. каф. ТЕГІЗБ ВДТУ А. Ф. Пономарчук,  
д. т. н., проф., зав. каф. ТА ТСМ ВДАУ В. Ф. Анісімов

Приведено методичні вказівки та короткі теоретичні пояснення до виконання лабораторних робіт із дисципліни “Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарських машин” (частина 3 - “Асинхронні двигуни”). Методичні вказівки складено відповідно до базової навчальної програми з даної дисципліни. Розглянуто будову, принцип роботи, методику розрахунку та правила вибору асинхронних двигунів сільськогосподарського призначення.

Розраховано на студентів факультету механізації сільського господарства, спеціальність 6.091902 - “Механізація сільського господарства”

***Рекомендовано науково-методичною радою  
Вінницького державного аграрного університету  
(протокол № 7 від 24 лютого 2003 року)***

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГУНА

*Мета роботи:* вивчити конструкцію асинхронного електродвигуна, засвоїти правила визначення “початків” та “кінців” обмоток статора, дослідити роботу двигуна при пускових і номінальних режимах, а також при обриві однієї з фаз статора перед пуском та під час його роботи при з’єднанні обмоток статора “зіркою” і “трикутником”.

### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЯСНЕННЯ

Трифазний асинхронний двигун винайшов російський інженер-винахідник М. О. Доліво-Добровольський в 1889 р. Цей двигун має значні переваги над іншими електричними машинами: простий у конструктивному відношенні, надійний, не має потреби в збудженні. Ці переваги асинхронних двигунів дозволили широко застосовувати їх у промисловості, сільському господарстві та інших галузях народного господарства всіх країн світу.

Асинхронний двигун складається з двох основних частин, розділених повітряним зазором: нерухомого статора й обертового ротора. Кожна з цих частин має осердя й обмотку. При цьому обмотка статора включається в мережу і є як би первинною, а обмотка ротора - вторинною, тому що енергія в неї надходить з обмотки статора за рахунок магнітного зв'язку між цими обмотками, як у трансформатора.

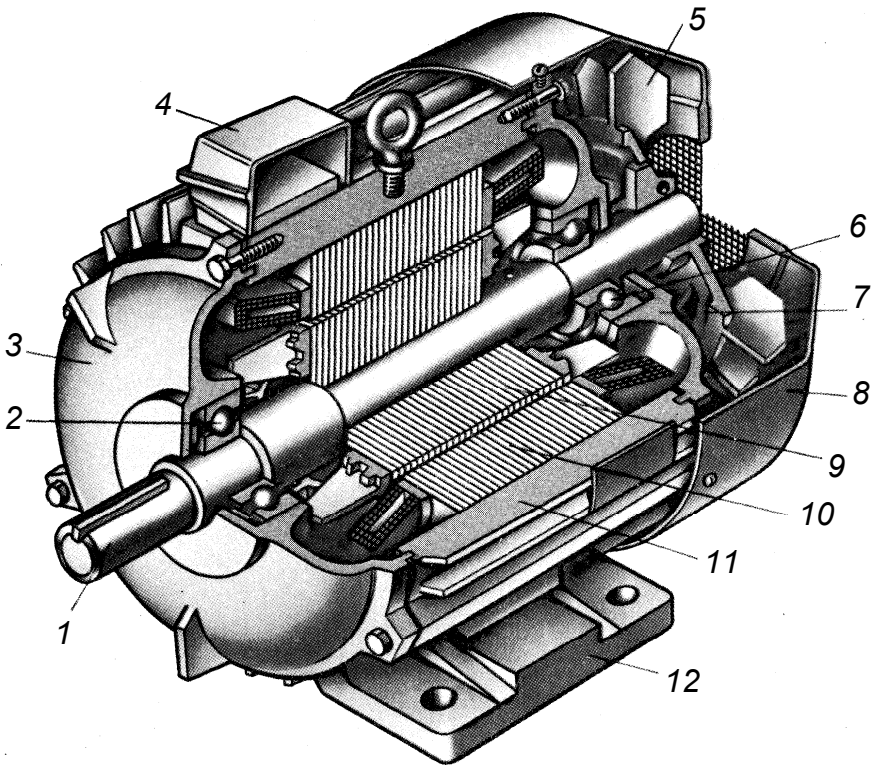
За своєю конструкцією асинхронні двигуни поділяються на два види: двигуни з короткозамкнутим ротором і двигуни з фазним ротором. Будову *трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором* показано на мал. 5.1. Двигуни цього виду мають найбільш широке застосування.

Нерухома частина двигуна - статор - складається з корпусу 11 та осердя 10 із трифазною обмоткою. Корпус двигуна відливають з алюмінієвого сплаву чи з чавуну, або роблять зварним. Розглянутий двигун має закрите обдувне виконання. Тому поверхня його корпусу має ряд повздовжніх ребер, призначення яких полягає в тому, щоб збільшити поверхню охолодження двигуна.

У корпусі розташоване осердя 10 статора, що має шихтовану конструкцію: відштамповані листи з електротехнічної сталі, яка має найменші втрати на перемагнічування, товщиною, звичайно, 0,5 мм

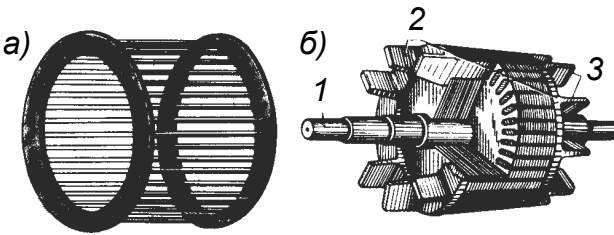
покриті шаром ізоляційного лаку, зібрані в пакет і скріплені спеціальними скобами чи повздовжніми зварними швами по зовнішній поверхні пакета. Така конструкція осердя сприяє значному зменшенню вихрових струмів Фуко, що виникають у процесі перемагнічування осердя обертовим магнітним полем. На внутрішній поверхні осердя статора є повздовжні пази, у яких розташовані пазові частини обмоток статора. Фазні обмотки виготовляють з ізолюваного мідного проводу, який укладають у пази таким чином, щоб між їх серединами був кут  $120^{\circ}$ .

У розточці статора розташована обертова частина двигуна - ротор, що складається з вала 1 і осердя 9 із короткозамкнутою обмоткою. Така обмотка, названа «колесо білки», являє собою ряд метале-



**Мал. 5.1 - Будова трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором: 1 - вал; 2, 6 - підшипники; 3, 7 - підшипникові щити; 4 - коробка виводів; 5 - вентилятор; 8 - кожух вентилятора; 9 - осердя ротора з короткозамкнутою обмоткою; 10 - осердя статора з обмоткою; 11 - корпус; 12 - лапи**

вих (алюмінієвих чи мідних) стержнів, розташованих у пазах осердя ротора, замкнених із двох сторін короткозамикаючими кільцями (мал. 5.2а). Осердя ротора також має шихтовану конструкцію, але листи ротора не покриті ізоляційним лаком, а мають на своїй поверхні тонку плівку окислу. Це є достатньою ізоляцією, що обмежує вихрові струми, тому що величина їх невелика через малу частоту перемагнічування осердя ротора. Наприклад, при частоті мережі 50 Гц і номінальному ковзанні 6 % частота перемагнічування осердя ротора складає 3 Гц. Ротор і статор розділені повітряним зазором.



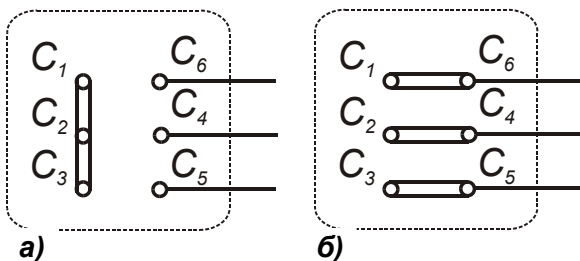
*Мал. 5.2 - Короткозамкнутий ротор: а - обмотка «клітка білки»; б - ротор з обмоткою, виконаної методом лиття під тиском; 1 - вал; 2 - короткозамикаючі кільця; 3 - вентиляційні лопатки*

Короткозамкнута обмотка ротора в більшості двигунів виконується заливанням зібраного осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом. При цьому одночасно зі стержнями обмотки відливаються короткозамикаючі кільця і вентиляційні лопатки (див. мал. 5.2б).

Вал ротора обертається (див. мал. 5.1) у підшипниках кочення 2 і 6, розташованих у підшипникових щитах 3 і 7. Охолодження двигуна здійснюється методом обдування зовнішньої поверхні корпусу з ребрами. Потік повітря створюється відцентровим вентилятором 5, прикритим кожухом 8. На торцевій поверхні цього кожуха є отвори для забору повітря.

Кінці обмоток фаз виводять на затискачі коробки виводів 4. Звичайно асинхронні двигуни призначені для включення в трифазну мережу на дві різні напруги, що відрізняються в  $\sqrt{3}$  разів. Наприклад, двигун розрахований для включення в мережу на напруги 220/380 В. Якщо в мережі лінійна напруга 380 В, то обмотку статора варто з'єднати зіркою, а якщо 220 В, то трикутником. В обох випадках напруга на обмотці кожної фази буде 220 В. Виводи обмоток фаз позначають так, як вказано в табл. 5.1. і розташовують на панелі таким чином, щоб з'єднання обмоток фаз було зручно виконувати за допомогою перемичок без перехресування останніх (мал. 5.3).

Монтаж двигуна в місці його установки здійснюється або за допомогою лап 12 (див. мал. 5.1), або за допомогою фланця. В остан-



**Мал. 5.3 – Схеми з'єднань обмоток статора трифазних асинхронних двигунів:  
а - зіркою; б - трикутником**

Таблиця 5.1

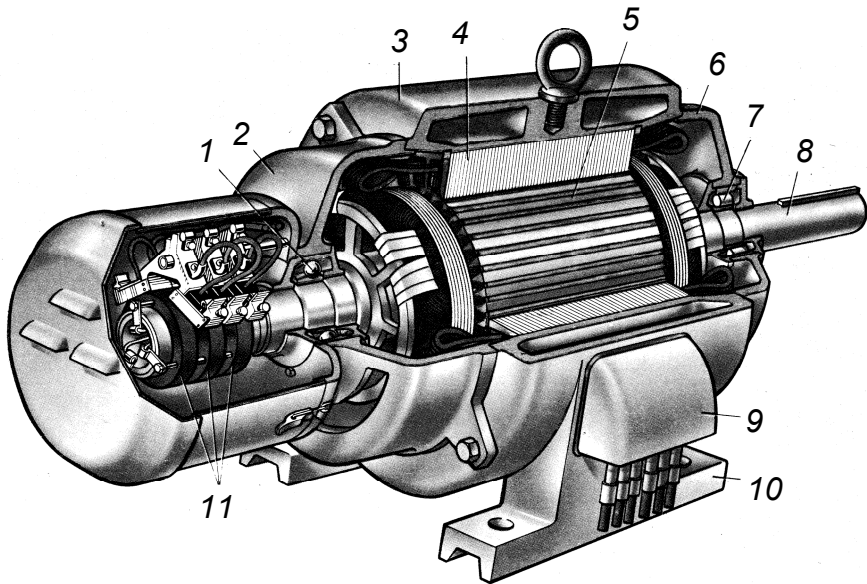
**Позначення виводів обмоток статора асинхронного двигуна**

Номер фази	Початок фази	Кінець фази
1	C <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>
2	C <sub>2</sub>	C <sub>5</sub>
3	C <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>

ньому випадку на підшипниковому щиті (звичайно, з боку виступаючого кінця вала) роблять фланець з отворами для кріплення двигуна на робочій машині. Для запобігання можливому враженню обслуговуючого персоналу електричним струмом двигуни обладнують болтами для підключення до заземлення (не менше двох). Умовне позначення асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором на електричних схемах приведено на мал. 5.5а.

Інший різновид трифазних асинхронних двигунів - *двигуни з фазним ротором* – конструктивно відрізняються від розглянутого двигуна, головним чином, будовою ротора (мал. 5.4). Статор цього двигуна також складається з корпусу 3 та осердя 4 із трифазною обмоткою. У нього є підшипникові щити 2 і 6 із підшипниками кочення 1 і 7. До корпусу 3 прикріплені лапи 10 і коробки виводів 9. Однак ротор має більш складну конструкцію. На валі 8 закріплене шихтоване осердя 5 із трифазною обмоткою, виконаною аналогічно обмотці статора. Цю обмотку з'єднують зіркою, а її кінці приєднують до трьох контактних кілець, розташованих на валі й ізольованих одне від одного і від вала. Для здійснення електричного контакту з обмоткою обертового ротора на кожне контактне кільце 1 накладають, звичайно, дві щітки 2, розташовані в щіткотримачах 3. Кожен щіткотримач обладнаний пружинами, що забезпечують притискання щіток до контактного кільця з визначеним зусиллям.

Асинхронні двигуни з фазним ротором мають більш складну конструкцію і менш надійні, але вони мають кращі регульовальні і пускові властивості, ніж двигуни з короткозамкнутим ротором. Умовне позначення асинхронного двигуна з фазним ротором на електричних схемах приведено на мал. 5.5б. Обмотка ротора цього двигуна з'єднана з пусковим реостатом ПР, що створює в колі ротора додатковий опір  $R_d$ .



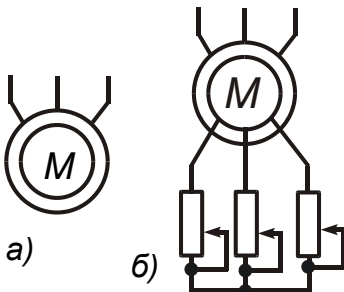
*Мал. 5.4 - Будова трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором: 1, 7 – підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – статор; 4 – осердя статора з обмоткою; 5 – осердя ротора; 8 – вал; 9 – коробка виводів; 10 – лапи; 11 – контактні кільця*

На корпусі асинхронного двигуна прикріплена табличка, на якій зазначені тип двигуна, назва заводу-виготовлювача, рік випуску і номінальні дані (корисна потужність, напруга, струм, коефіцієнт потужності, частота обертання, ККД та ін.).

Відповідно до принципу оборотності електричних машин, асинхронні машини можуть працювати як у рушійному, так і в генераторному режимах. Крім того, можливі ще й режими електромагнітного гальмування противмиканням, динамічного та ін.

Принцип роботи асинхронного двигуна заснований на використанні обертового магнітного поля статора. Для того, щоб у статорі двигуна утворилось обертове магнітне поле, необхідно дотримуватись трьох таких вимог:

- 1) середини обмоток статора двигуна повинні знаходитись під кутом  $120^\circ$  одна відносно одної (ця вимога забезпечується при виготовленні двигунів на заводах);
- 2) струми в обмотках статора двигуна повинні бути зсунутими один відносно одного на третину періоду або на  $120^\circ$ , якщо врахувати, що повний період, рівний  $360^\circ$  (таке співвідношення між струмами та



**Мал. 5.5 - Умовні позначення асинхронного двигуна на електричних схемах: а - з короткозамкнутим ротором; б - з фазним ротором**

напругами забезпечується при виробленні трифазного струму на електростанціях, що передається по трифазній мережі);

3) струми в усіх обмотках статора двигуна повинні протікати в однаковому напрямі: від “початків” до “кінців” або від “кінців” до “початків” - різниці немає, але якщо в одній обмотці струм протікає від “початку” до “кінця”, то й у двох інших обмотках він повинен протікати від “початків” до “кінців” і навпаки (ця вимога повинна забезпечуватися при підключенні двигунів до мережі).

Асинхронний двигун працює таким чином. При включенні обмотки статора в мережу трифазного струму виникає обертове магнітне поле статора, частота обертання якого називається синхронною  $n_c$  і визначається виразом:

$$n_c = \frac{60f}{p}, \tag{1}$$

де  $f$  - частота струму живлення;  $p$  - число пар полюсів.

Оскільки в Україні електростанції генерують змінний струм із частотою  $f = 50$  Гц, то залежно від числа пар полюсів -  $p$  синхронна частота обертання магнітного поля статора  $n_c$  може приймати значення, що вказані у табл. 5.2:

Таблиця 5.2

**Синхронні частоти обертання магнітного поля статора**

$p$		1	2	3	4	5	6
$n_c$	об./хв	3000	1500	1000	750	600	500

У сільському господарстві використовуються в основному асинхронні двигуни із синхронними частотами обертання магнітного поля статора рівними 3000, 1500 чи 1000 об./хв.

Обертове поле статора зчіплюється як з обмоткою статора, так і з обмоткою ротора і наводить у них ЕРС. Будучи ЕРС самоіндукції, вона діє зустрічно прикладеній до обмотки напрузі й обмежує значення струму в обмотці. Обмотка ротора замкнута, тому ЕРС ротора породжує в стержнях обмотки ротора струми. Взаємодія цих струмів із полем статора створює на роторі електромагнітні сили  $P_{EM}$ ,



напрямок яких визначають за правилом «лівої руки». Сукупність сил  $P_{EM}$  створює на роторі електромагнітний момент  $M$ , що приводить його в обертання з частотою  $n < n_C$  у сторону обертання поля статора. Величину електромагнітного моменту  $M$  можна визначити за залежністю:

$$M = k\Phi I_2 \cos\psi_2, \quad (2)$$

де  $k$  – постійний коефіцієнт;

$\Phi$  – магнітний потік обмоток двигуна;

$I_2$  – струм в обмотках ротора;

$\psi_2$  – кут зсуву фаз між струмом  $I_2$  та ЕРС ротора.

Обертання ротора за допомогою вала передається виконавчому механізмові. Таким чином, електрична енергія, що надходить із мережі в обмотку статора, перетворюється в механічну енергію обертання ротора двигуна.

Напрямок обертання магнітного поля статора, а отже, і напрямки обертання ротора залежать від порядку чергування фаз напруги, що підводиться до обмотки статора. Частота обертання ротора  $n$ , названа *асинхронною*, завжди менша частоти обертання поля  $n_C$ , тому що тільки в цьому випадку відбувається наведення ЕРС в обмотці ротора асинхронного двигуна. Величина, що характеризує різницю частот обертання ротора й обертового поля статора називається *ковзанням*. Ковзання є дуже важливим параметром асинхронної машини, його виражають у частках одиниці або у відсотках:

$$S = (\omega_C - \omega) / \omega_C = (n_C - n) / n_C, \quad (3)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість двигуна що рівна:

$$\omega = \pi n / 30;$$

$\omega_C$  – синхронна кутова швидкість асинхронного двигуна, що визначається за формулою:

$$\omega_C = 2\pi f / p.$$

Цілком очевидно, що зі збільшенням навантажувального моменту на валу асинхронного двигуна частота обертання ротора  $n$  зменшується. Отже, ковзання асинхронного двигуна залежить від механічного навантаження на валу двигуна і може змінюватися в діапазоні  $0 < S < 1$ .

При включенні асинхронного двигуна в мережу в початковий момент часу ротор під впливом сил інерції нерухомий ( $n = 0$ ). При цьому ковзання  $S$  дорівнює одиниці. У режимі роботи двигуна без навантаження на валу (режим холостого ходу) ротор обертається з частотою, не набагато меншою від синхронної частоти обертання  $n_C$ , і

ковзання дуже мало відрізняється від нуля ( $S \approx 0$ ). Ковзання, що відповідає номінальному навантаженню двигуна, називають *номінальним ковзанням*  $S_H$ . Для асинхронних двигунів загального призначення  $S_H = 1-8 \%$ , при цьому для двигунів великої потужності,  $S_H = 1\%$ , а для двигунів малої потужності  $S_H = 8 \%$ .

Залежність між обертовим моментом асинхронного двигуна та кутовою швидкістю його валу, що називається його *механічною характеристикою*, описується рівнянням, куди входять параметри двигуна. Це рівняння дещо громіздке й незручне у користуванні, тому при практичних розрахунках частіше користуються приблизною формулою Клосса, у яку входять каталожні дані двигуна:

$$M = \frac{M_K(2+q)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + q}, \quad (4)$$

де  $M$  - обертовий момент електродвигуна, Нм;

$M_K$  - критичний момент двигуна, Нм;

$S_K$  - критичне ковзання асинхронного двигуна, що рівне:

$$S_K = S_H (\mu_K + \sqrt{\mu_K^2 - 1});$$

$q$  - допоміжний коефіцієнт, який можна визначити зі співвідношення:

$$q = (1/S_K + S_K - 2\mu_1)/(\mu_1 - 1).$$

Для двигунів значної потужності  $q$  приймається рівним нулю.

- допоміжний каталожний коефіцієнт  $\mu_1$ , що рівний:

$$\mu_1 = \mu_K / \mu_{II},$$

де  $\mu_{II}$  - кратність пускового моменту двигуна;

$\mu_K$  - перевантажувальна здатність двигуна;

- номінальне ковзання двигуна  $S_H$ , що рівне:

$$S_H = (\omega_C - \omega_H) / \omega_C.$$

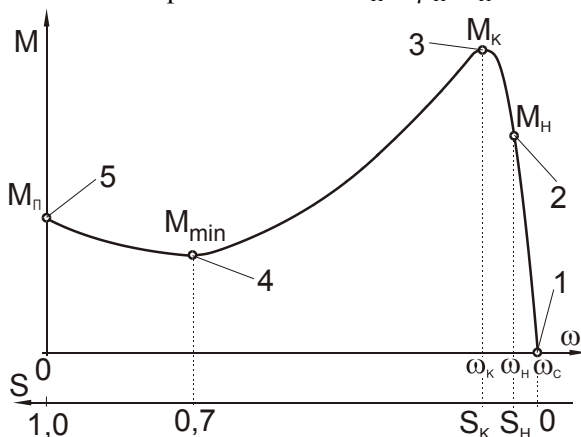
Механічна характеристика асинхронного двигуна, представлена на мал. 5.6, має п'ять характерних точок. Точка 1 - синхронна швидкість  $\omega = \omega_C$  при  $S = 0$  і  $M = 0$ . Точка 2 - номінальне навантаження, коли  $M = M_H$   $\omega = \omega_H$  та  $S = S_H$ . *Номінальний момент* двигуна  $M_H$ , [Нм] – це найбільший момент, розвиваючи який, двигун може працювати необмежено довго не перегріваючись: він вираховується за каталожними даними двигуна:

$$M_H = P_H / \omega_H \text{ або } M_H = 9550 P_H / n_H, \quad (5)$$

де  $P_H$  - номінальна потужність двигуна, кВт;

$\omega_H$  - номінальна кутова швидкість, рад/сек.

Точка 3 - критична, коли  $\omega = \omega_K$  при  $S = S_K$  та  $M = M_K = \mu_K M_H$ . У цій точці двигун розвиває максимальний (критичний) момент, який визначає переважувальну здатність двигуна  $\mu_K$ , що вибирається з довідників і для асинхронних двигунів знаходиться у межах  $\mu_K=1,7-2,2$ . Точка 4 - “провал моменту” - спостерігається при  $S \approx 0,7$ , коли двигун розвиває у процесі розгону найменший (мінімальний) момент  $M = M_{min} = \mu_{min} M_H$ . “Провал” кривої моменту  $M_{min}$  (ділянка при  $0,7 < S < 0,85$ ) утруднює процес розгону двигуна і може викликати “застрявання” ротора на малій частоті обертання. Точка 5 - пускова, коли  $\omega = 0$  при  $S = 1$  і  $M = M_{\Pi} = \mu_{\Pi} M_H$ .



**Мал. 5.6 – Механічна характеристика асинхронного двигуна**

Максимальний момент двигуна  $M_K$  називається критичним, тому що на механічній характеристиці він поділяє зони стійкої та нестійкої роботи двигуна. Дільницю механічної характеристики асинхронного двигуна при  $S_K < S < 1$  називають зоною стійкої роботи двигуна, коли при перевантаженнях двигун сповільнюється, але

автоматично розвиває, більший момент, який дозволяє долати це пікове навантаження. Дільницю механічної характеристики асинхронного двигуна в межах  $0 < S < S_K$  називають зоною нестійкої роботи двигуна, коли будь-яке перевантаження, що супроводжується сповільненням двигуна, призводить до зменшення обертового моменту двигуна та його зупинки.

Потужність, яку споживає електродвигун із мережі при номінальному навантаженні  $P_I$  (кВт):

$$P_I = P_H / \eta_H$$

де  $\eta_H$  - номінальний ККД двигуна.

Різниця між споживаною та номінальною потужностями складає втрати у двигуні  $\Delta P$  (кВт):

$$\Delta P = P_1 - P_H = P_H / \eta_H - P_H = P_H (1 / \eta_H - 1). \quad (6)$$

Номинальний струм трифазних асинхронних короткозамкнутих двигунів можна визначити з формули:

$$I_H = P_H / \sqrt{3} \eta_H U_H \cos \varphi_H; \quad (7)$$

де  $P_H$  - номінальна потужність електродвигуна, Вт;

$U_H$  - номінальна напруга, В;

$\cos \varphi_H$  - номінальний коефіцієнт потужності;

$\eta_H$  - номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна

Одним із найбільш шкідливих режимів роботи асинхронного двигуна є пусковий режим, при якому він споживає великий пусковий струм, що призводить до швидкого його перегрівання та значного падіння напруги у мережі, особливо у сільській місцевості, де використовуються малопотужні трансформаторні підстанції, а лінії електропередач виготовляються із проводу невеликого перетину та мають значну протяжність. Пусковий струм двигуна  $I_{II}$  (А):

$$I_{II} = k_I I_H,$$

де  $k_I$  - кратність пускового струму (знаходиться у межах  $k_I = 5-10$  і вибирається з довідників).

Значне зростання пускового струму даного двигуна пов'язане з тим, що при підключенні статора трифазного двигуна до мережі у ньому утворюється обертове магнітне поле, яке миттєво набирає своєї синхронної швидкості  $n_C = 1000-3000$  об/хв, а ротор унаслідок інертності в першу мить нерухомий, при цьому витки обмотки його ротора перетинають велику кількість силових ліній обертового магнітного поля статора й у них індукується великий пусковий струм  $I_{II}$ . Далі ротор зрушує з місця і починає наздоганяти обертове магнітне поле статора, при цьому витки його обмоток перетинають все менше силових ліній обертового магнітного поля й струм у них зменшується до величини, що відповідає навантаженню двигуна.

Зменшення шкідливих наслідків від пускових режимів двигуна можна досягнути або при зменшенні величини пускових струмів шляхом запуску двигунів при пониженої фазній напрузі чи використання двигунів із фазними роторами, або при зменшенні часу запуску двигуна шляхом запускання двигуна без навантаження в холосту чи використовуючи для з'єднання двигуна з робочими машинами відцентрові муфти. Зменшення пускового струму за рахунок зменшення фазної напруги досягається перемиканням обмоток статора на період пуску з "трикутника" на "зірку" або спеціальним трифазним трансформато-

ром. Запуск потужних двигунів із фазним ротором здійснюється за допомогою трисекційного трифазного реостата, який перед запуском виставляється на максимальний опір. Далі, у міру розгону двигуна цей опір зменшується і при досягненні двигуном номінальних обертів закорочується. При запуску двигуна з додатковим опором у колі фазного ротора не тільки зменшується кратність пускового струму до величини  $k_I = 2-3$ , але зростає і величина пускового моменту (див. мал. 5.7). І все ж, незважаючи на кращі експлуатаційні характеристики, ці двигуни порівняно з короткозамкненими складніші за будовою, на третину дорожчі і вимагають автоматичної апаратури керування, тому вони у сільському господарстві використовуються дуже рідко.

Для збільшення пускового моменту двигунів із короткозамкненими роторами використовують двигуни, що мають ротори з двома короткозамкнутими обмотками або ротори з глибоким пазом, що призводить до явища витіснення струму до периферії й зменшення індуктивного опору та покращення пускових характеристик.

Реверсування асинхронних двигунів, тобто зміна напрямку обертання їх ротора відбудеться тоді, коли поміняти місцями два лінійних провідники, що під'єднують двигун до мережі. У цьому випадку міняється черговість фазних напруг, а напрям обертання магнітного поля статора змінюється на протилежний, що і призводить до зміни напрямку обертання ротора.

#### Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Частоту обертання ротора асинхронного двигуна можна регулювати зміною якої-небудь із трьох величин: ковзання  $S$ , частоти струму в обмотці статора  $f$  або числа полюсів в обмотці статора  $p$ .

Регулювати частоту обертання *зміною ковзання  $S$*  можна трьома способами: зміною напруги, що підводиться до обмоток статора, порушенням симетрії цієї напруги та зміною активного опору обмотки ротора. Регулювання частоти обертання *зміною ковзання* відбувається тільки в навантаженому двигуні. У режимі холостого ходу ковзання, а отже, і частота обертання залишаються практично незмінними.

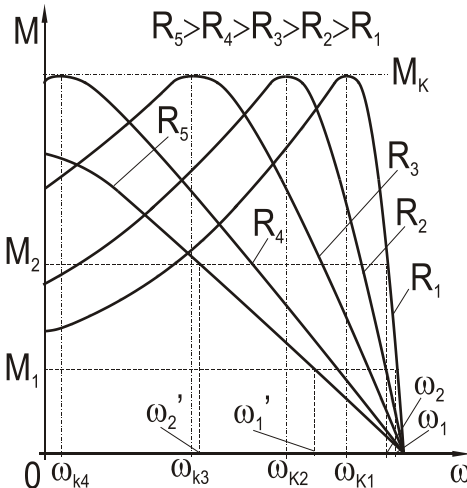
*Регулювання частоти обертання зміною активного опору в колі ротора.* Цей спосіб регулювання частоти обертання можливий лише у двигунах із фазним ротором. Механічні характеристики асинхронного двигуна, побудовані для різних значень активного опору кола ротора (див. мал. 5.7), показують, що зі збільшенням активного опору ротора зростає критичне ковзання, а критичний момент лишається незмінним. Практично зміна активного опору кола ротора досягається включенням у коло ротора регулювального реостата, подібного до пусково-

го реостата, але розрахованого на тривалий режим роботи. Електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню, тому зменшення частоти обертання (збільшення ковзання) супроводжується ростом електричних втрат у колі ротора й зниженням ККД двигуна. Це свідчить про неекономічність розглянутого способу регулювання. До того ж необхідно мати на увазі, що ріст втрат у роторі супроводжується погіршенням умов вентиляції через зниження частоти обертання, що призводить до перегрівання двигуна. Окрім того, при цьому, у самому реостаті втрачається велика кількість енергії (тому реостат має великі габарити та вартість), а зменшення кутової швидкості ротора супроводжується зменшенням потужності двигуна.

Розглянутий спосіб регулювання має ще і той недолік, що ділянка механічної характеристики, що відповідає усталеній роботі двигуна, при введенні в коло ротора додаткового опору стає більш пологою і коливання навантажувального моменту на валу двигуна супроводжуються значними змінами частоти обертання ротора. Це ілюструє мал. 5.7, на якому видно, що якщо навантажувальний момент двигуна зміниться з  $M_1$  на  $M_2$ , то зміна частоти обертання при виведеному регулювальному реостаті (коли  $R = R_1$ ) складе з  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , а при виведеному реостаті (коли  $R = R_5$ ) ця зміна складатиме з  $\omega_1'$  до  $\omega_2'$ . Як

видно з малюнку, в останньому випадку зміна частоти обертання значно більша, що призводить до різкого сповільнення двигуна.

Але, незважаючи на зазначені недоліки, розглянутий спосіб регулювання частоти обертання широко застосовується в асинхронних двигунах із фазним ротором (наприклад, у стендах для обкатування автотракторних двигунів та у деяких вантажопідіймальних механізмах). Залежно від конструкції регулювального реостата цей спосіб регулювання частоти обертання може бути плавним (при плавній зміні опору) чи ступінчатим (при ступінчатій зміні опору).



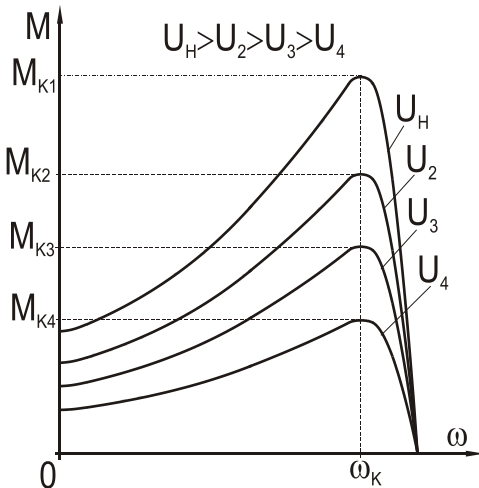
**Мал. 5.7 – Вплив величини додаткового опору на вигляд механічної характеристики асинхронного двигуна**

При малих навантаженнях такий спосіб забезпечує регулювання частоти обертання в дуже вузькому діапазоні, при великих – забезпечує регулювання частоти обертання в широкому діапазоні, але тільки вниз від синхронної частоти обертання. Разом із тим він забезпечує двигуну поліпшені пускові властивості.

*Регулювання частоти обертання зміною напруги живлення.*

Електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги мережі живлення. Це значною мірою відбивається на експлуатаційних властивостях двигуна: *навіть невелике зниження напруги мережі викликає помітне зменшення обертового моменту асинхронного двигуна.* Наприклад, при зменшенні напруги мережі на 10% відносно номінальної електромагнітний момент двигуна зменшується на 19%.

Можливість цього способу регулювання підтверджується графіками механічних характеристик двигуна, побудованими для різних значень напруги живлення  $U$  (див. мал. 5.8). При незмінному навантаженні на валі двигуна збільшення напруги, що підводиться до двигуна, викликає ріст частоти обертання. Однак діапазон регулювання частоти обертання виходить невеликим (у межах 1,3:1), що пояснюється вузькою зоною усталеної роботи двигуна, обмеженим значенням критичного ковзання й неприпустимістю значного пере-



**Мал. 5.8 – Вплив величини напруги живлення на вигляд механічної характеристики асинхронного двигуна**

вищення номінального значення напруги. Останнє пояснюється тим, що з перевищенням номінальної напруги виникає небезпека надмірного перегрівання двигуна, викликаного різким збільшенням електричних і магнітних утрат. У той же час із зменшенням напруги  $U$  двигун утрачає переважувальну здатність, що, як відомо, пропорційна квадрату напруги мережі живлення, а також зменшуються його коефіцієнти корисної дії та потужності. Підведену до двигуна напругу змінюють або регулювальним автотрансформатором, або реакторами, що включаються в розрив лінійних проводів.

Вузький діапазон регулю-

вання і неекономічність (необхідність у додаткових пристроях) обмежують область застосування цього способу регулювання частоти обертання. Даний метод регулювання кутової швидкості застосовується у системах вентиляції тваринницьких ферм типу “Клімат”, “Кліматика”, у яких для розширення діапазону регулювання використовуються спеціальні двигуни з підвищеним критичним ковзанням.

*Регулювання частоти обертання зміною числа полюсів обмотки статора.* Цей спосіб регулювання заснований на зміні синхронної частоти обертання  $n_c = 60f/p$  і дає ступінчасте регулювання. Так, при  $f = 50$  Гц і  $p = 1 \div 5$  пар полюсів можна одержати такі синхронні частоти обертання: 3000, 1500, 1000, 750, 600 об./хв.

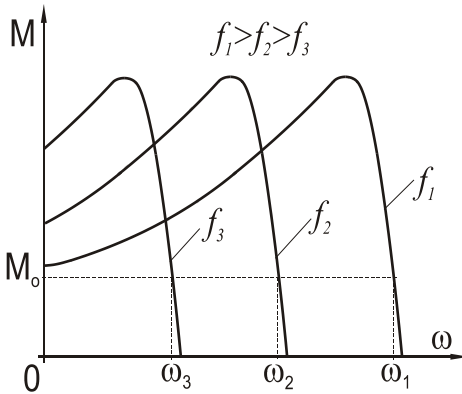
Змінювати число полюсів в обмотці статора можна або укладанням на статорі двох обмоток із різним числом полюсів, або укладанням на статорі однієї обмотки, конструкція якої дозволяє шляхом переключення котушкових груп одержувати різне число полюсів. Останній спосіб набув найбільшого застосування, а двигуни, у яких передбачена така можливість, називаються *багатошвидкісними*.

Регулювання частоти обертання зміною числа полюсів на статорі застосовують винятково в асинхронних двигунах із короткозамкнутим ротором, тому що число полюсів в обмотці цього ротора завжди дорівнює числу полюсів статора і для зміни частоти обертання досить змінити число полюсів в обмотці статора. У випадку ж фазного ротора довелося б і на роторі застосувати полюсну обмотку, яка переключачється, що привело б до неприпустимого ускладнення двигуна.

*Регулювання частоти обертання зміною частоти струму в статорі.* Цей спосіб регулювання (частотне регулювання) також заснований на зміні синхронної частоти обертання  $n_c = 60f/p$ .

Для здійснення цього способу регулювання необхідне джерело живлення двигуна змінним струмом із регульованою частотою. Для цього можуть застосовуватися електромашинні, іонні чи напівпровідникові перетворювачі частоти (ПЧ). Щоб регулювати частоту обертання, досить змінити частоту струму  $f$ . Але зі зміною частоти буде змінюватися і максимальний момент. Тому для збереження незмінними перевантажувальної здатності, коефіцієнта потужності і ККД двигуна на потрібному рівні необхідно одночасно зі зміною частоти  $f$  змінювати і напругу живлення  $U$ . Якщо частота обертання двигуна регулюється за умови *сталості моменту навантаження* ( $M = const$  див. мал. 5.9), то підведену до двигуна напругу необхідно змінювати пропорційно зміні частоти струму, так щоб  $U/f = const$ . При цьому потужність





**Мал. 5.9 – Вплив частоти струму живлення на вигляд механічної характеристики асинхронного двигуна**

двигуна збільшується пропорційно наростанню частоти обертання. Частотне регулювання двигунів дозволяє плавно змінювати частоту обертання в широкому діапазоні (до 12:1). Однак джерела живлення з регульованою частотою струму здорожують установку. Тому частотне регулювання до останнього часу застосовувалося в основному для одночасного регулювання групи двигунів, що працюють в однакових умовах (наприклад, рольгангових двигунів). Але завдяки розвитку силової напівпровідникової техніки в останні роки створені пристрої частотного регулювання асинхронними двигунами типів ТПЧ-15, ТПЧ-30, ТПЧ-60, ТПЧ-100, що розраховані для підключення асинхронних приводів потужністю 15-100 кВт. Вони мають кращі техніко-економічні показники порівняно з електромеханічними перетворювачами і застосовуються для індивідуального регулювання асинхронними двигунами. Використання асинхронних двигунів, укомплектованих такими пристроями для частотного регулювання, найбільше доцільне в пожежо- і вибухонебезпечних середовищах (хімічна й нафтопереробна промисловість), де застосування колекторних двигунів неприпустиме.

Режими роботи асинхронних двигунів.

Приведеним вище режимом не вичерпуються всі можливості даного двигуна, значний інтерес становлять можливості переведення асинхронного двигуна на роботу у гальмівних режимах, що дозволяють швидко загальмовувати робочу машину. З великого числа можливих способів гальмування електродвигунів розглянемо три, що становлять найбільший інтерес для сільського господарства.

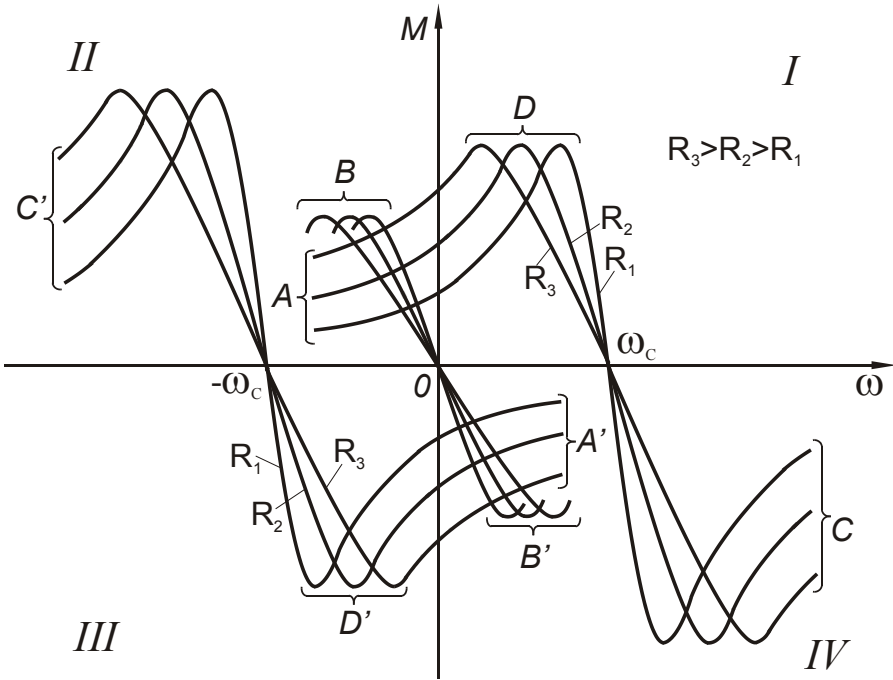
*Гальмування з рекуперацією енергії* полягає у тому, що двигун у період гальмування переводиться у режим асинхронного генератора, який виробляє активну електричну енергію і подає її у мережу, а реактивну енергію, що необхідна для створення магнітних полів, споживає з мережі. Це такий режим, при якому двигун під дією зовнішніх сил чи запасу кінетичної енергії обертається у попередньому напрямі зі

швидкістю більшою за синхронну, розвиваючи при цьому гальмівний момент. Механічні характеристики цього режиму знаходяться у IV квадранті (див. мал. 5.10), будучи природнім продовженням характеристик рушійного режиму для прямого (умовно) попереднього обертання ( $\omega_{\Pi} > 0$ ), що розміщені у I квадранті. Механічні характеристики гальмівного режиму з рекуперацією енергії при зворотному (умовно) обертанні ( $\omega_{\Pi} < 0$ ) розміщуються у II квадранті, будучи природнім продовженням характеристик рушійного режиму, які знаходяться у III квадранті.

Рекуперативне гальмування використовують при гарячому обкатуванні автотракторних двигунів після ремонту. Асинхронний двигун із фазним ротором, що раніше приводив у рух відремонтований автотракторний двигун, при наданні йому зі сторони останнього кутової швидкості, більшої від синхронної, починає працювати у рекуперативному гальмівному режимі і завантажуватиме відремонтований автотракторний двигун. Рекуперативне гальмування в електроприводах металообробних станків у підймальних механізмах та екскаваторах часто застосовується при використанні двигунів із зміною числа пар полюсів. При перемиканні з меншого числа пар полюсів на більше гальмування проходить до тих пір, поки кутова швидкість не знизиться до кутової швидкості, що відповідає найбільшому можливому числу пар полюсів. Подальше гальмування проходить за рахунок механічного гальма.

*Гальмування противмиканням.* Це такий режим, при якому ротор двигуна під дією зовнішніх сил чи за інерцією обертається у напрямі, протилежному обертанню магнітного поля статора. Гальмування противмиканням можна здійснити двома шляхами. У режимі гальмівного спуску асинхронний двигун працює тоді, коли він включений для обертання в одному напрямку, але під дією навантаження (наприклад, великої ваги вантажу) обертається у іншому. Механічні характеристики, що відповідають даному режиму, розміщені у II квадранті при прямому попередньому обертанні ( $\omega_{\Pi} > 0$ ) і в IV квадранті при зворотному попередньому обертанні ( $\omega_{\Pi} < 0$ ). При цьому струми в обмотках двигуна можуть перевищувати номінальні значення у 7-8 разів, тому в коло ротора вмикають відповідний додатковий опір.

*Гальмування противмиканням при перемиканні фаз обмоток на зворотне обертання на ходу двигуна* засноване на тому, що в результаті перемикання фаз змінюється напрям обертання магнітного поля



**Мал. 5.10 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних режимах роботи: А – гальмівний спуск при прямому попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} > 0$  (збігаються із гальмуванням противмиканням при зворотному попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} < 0$ ); А' – гальмівний спуск при зворотному попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} < 0$  (збігаються із гальмуванням противмиканням при прямому попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} > 0$ ); В – динамічне гальмування при зворотному попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} < 0$ ; В' – динамічне гальмування при прямому попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} > 0$ ; С – гальмування з рекуперацією енергії при прямому попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} > 0$ ; С' – гальмування з рекуперацією енергії при зворотному попередньому обертанні  $\omega_{\text{п}} < 0$ ; D – рушійний режим при  $\omega_{\text{п}} > 0$ ; D' – рушійний режим при  $\omega_{\text{п}} < 0$**

статора, створюється гальмівний момент, обертання ротора при цьому сповільнюється. Коли кутова швидкість ротора наблизиться до нуля, його необхідно відключити від мережі, а то він почне обертатись у зворотному напрямі. Механічні характеристики даного режиму розміщені у IV та II квадрантах. Оскільки перемикання обмоток статора на ходу двигуна супроводжується різким зростанням струмів в обмотках

статора та ротора, то у коло ротора необхідно обов'язково попередньо включити додатковий опір.

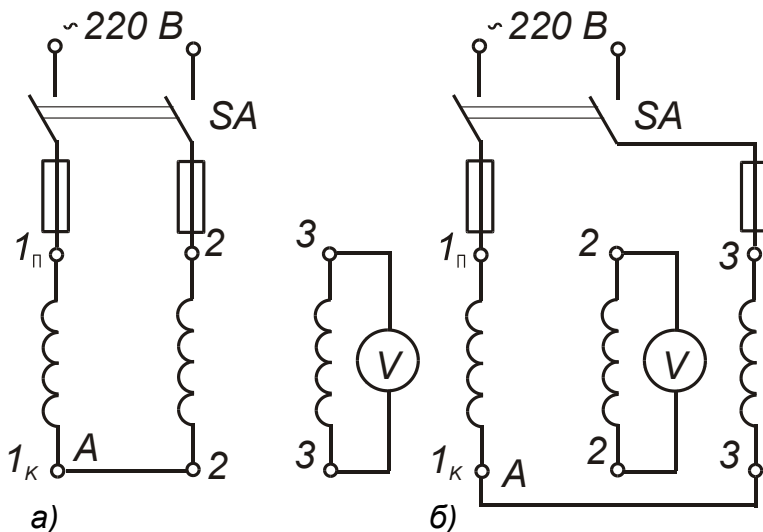
*Динамічне гальмування.* Це такий режим, при якому фазні обмотки статора двигуна відключаються від мережі змінного струму і хоча б на одну з них подається понижена постійна напруга. Постійний струм, що протікає по обмотці, створює нерухоме магнітне поле. Під його дією, в обмотках ротора, що обертається за інерцією, індукуються струм. Взаємодія цього струму з магнітним потоком зумовлює виникнення гальмівного моменту. Механічні характеристики режиму динамічного гальмування знаходяться у IV та II квадрантах. Вони проходять через початок координат, оскільки при кутовій швидкості, рівній нулю, гальмівний момент у цьому режимі також рівний нулю. Величина максимального гальмівного моменту пропорційна квадрату прикладеної до статора напруги.

Характерною несправністю асинхронного двигуна чи лінії його живлення є “обрив фази”, коли одна або дві фазні обмотки двигуна виявляються відключеними. При цьому зменшується сумарний магнітний потік двигуна  $\Phi$ , але, оскільки при цьому навантаження двигуна  $i$ , відповідно, електромагнітний момент, який він розвиває, лишаються незмінними, то відповідно до формули (2) повинен зрости струм у роторі двигуна  $I_2$ . Це зростання відбувається за рахунок деякого сповільнення ротора двигуна й зростання величини ковзання  $S$ , внаслідок чого двигун починає посилено гудіти. У цьому випадку, за рахунок магнітного зв'язку між обмотками ротора й статора, як у трансформатора, зростає і струм в обмотках статора двигуна, що працюють. Тому, коли при “обриві фази” навантаження двигуна перевищує  $0,5P_n$ , його необхідно відключити від мережі. Коли ж “обрив фази” двигуна відбудеться перед запуском – двигун не запуститься. Для захисту двигунів від роботи при “обриві фази” (їх відключення) у колах їх живлення використовують спеціальні апарати – теплові реле або автоматичні вимикачі.

## **ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ, АНАЛІЗ І ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ**

1. Вивчити конструкцію асинхронних трифазних електродвигунів із короткозамкнутим та фазним ротором, що представлені на стендах.
2. Визначити “початки” і “кінці” фазних обмоток статора двигуна.

Якщо відсутні бірки з позначенням “початків” та “кінців” обмоток статора асинхронного двигуна, то перед підключенням цього



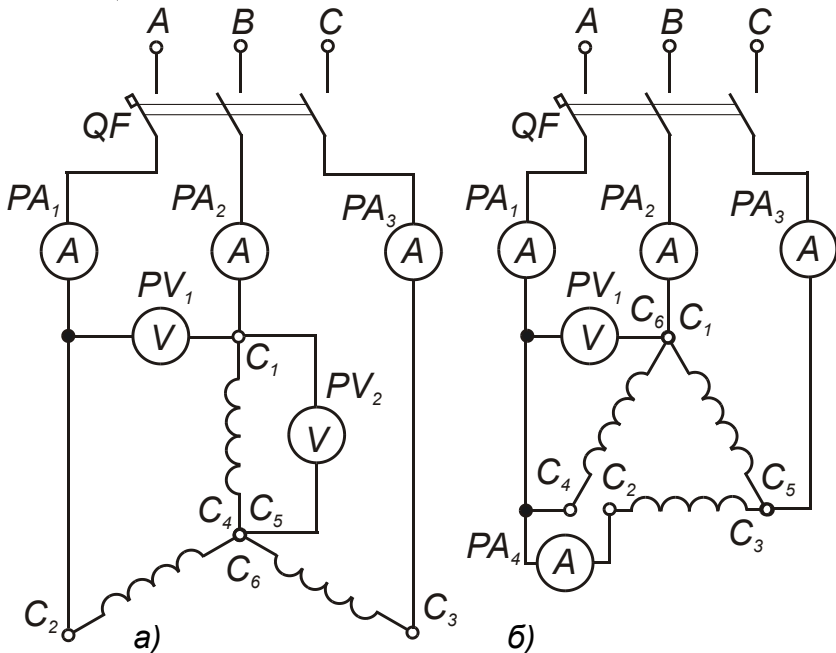
**Мал. 5.11 – Схеми з'єднань обмоток статора при визначенні “початків” та “кінців” фаз методом трансформації**

двигуна до мережі їх необхідно визначити. Це найзручніше зробити методом трансформації у такій послідовності. Одним із методів проходження струму визначають виводи, що належать до кожної з фаз. Для цього можна використати джерело живлення та контрольну лампочку чи вольтметр і, з'єднавши їх послідовно, по чергово підключати до виводів двигуна. Коли проходитиме струм, це означатиме, що виводи належать до однієї фази. Нумерувати фази можна довільно. Далі, також довільно, можна вибрати початок першої фази і вже відносно нього визначати “початки” і “кінці” решти фаз. Потім з'єднуємо “кінець” першої фази з одним із виводів другої фази у вузол А (див. мал. 5.11а), вільні кінці цього єднання під'єднують до мережі змінного струму 220 В. До затискачів третьої фази під'єднують контрольну лампочку або вольтметр із шкалою до 30-60 В, і за допомогою вимикача SA подають напругу, при цьому може бути два випадки:

- 1) вольтметр показує деяку напругу (контрольна лампочка горить) – значить у вузол А з'єднано різнойменні виводи (“кінець” першої фази з “початком” другої);
- 2) вольтметр показує “нуль” (контрольна лампочка не горить) – значить у вузол А з'єднано однойменні виводи (“кінець” першої фази з “кінцем” другої);

“Початки” і “кінці” третьої фази визначають аналогічно (див. мал. 5.11б).

3. Зібрати електричне коло (мал. 5.12а) для включення електричного двигуна в трифазну мережу при з’єднанні обмоток статора “зіркою” і дослідити його роботу при обриві однієї з фаз перед запуском і під час роботи. Здійснити реверс двигуна. Результати записати у таблицю 5.3.



Мал. 5.12 – Схеми з’єднань обмоток статора при дослідженні параметрів двигуна: а) - з’єднання “зіркою”, б) - з’єднання “трикутником”

Таблиця 5.3

Схема з’єднань обмоток статора двигуна	Напруга, В		Струм, А							
			запуск		номінальна робота		обрив фази			
	$U_L$	$U_\Phi$	$I_{ЛЛ}$	$I_{ЛФ}$	$I_{НЛ}$	$I_{НФ}$	при роботі		перед пуском	
						$I_L$	$I_\Phi$	$I_L$	$I_\Phi$	
Y										
Δ										

4. Зібрати електричне коло (мал. 5.12б) для включення двигуна в трифазну мережу при з'єднанні обмоток статора “трикутником” і дослідити його роботу аналогічно до п. 3.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке механічна характеристика двигуна?
2. Що таке перевантажувальна здатність та жорсткість механічної характеристики електродвигуна?
3. Як побудовані та працюють асинхронні двигуни з короткозамкнутим і фазним ротором?
4. Чи може ротор асинхронного двигуна обертатися синхронно з обертовим полем статора і чому?
5. Що таке ковзання асинхронної машини і який діапазон зміни ковзання асинхронної машини в різних режимах її роботи?
6. Яким чином асинхронний двигун можна перевести в режим гальмування з рекуперацією енергії і де цей режим використовується?
7. Яким чином асинхронний двигун можна перевести в режим гальмування противмиканням і де цей режим використовується?
8. Яким чином асинхронний двигун можна перевести в режим динамічного гальмування і де цей режим використовується?
9. Якими показниками характеризуються пускові властивості асинхронних двигунів?
10. Які переваги й недоліки пускових властивостей асинхронних двигунів?
11. Які існують способи пуску асинхронних двигунів при зниженій напрузі?
12. Які існують способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів і які у них переваги та недоліки?
13. Чому при частотному регулюванні частоти обертання одночасно з частотою струму необхідно змінювати напругу?
14. Чому при “обриві фази” зростає струм в обмотках двигуна, що працюють?
15. Як можна визначити “початки” та “кінці” обмоток статора трифазної машини?

## ПРОГРАМА ПОЗААУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ:

№ з/п	Вид підготовки	Час, год
1	За рекомендованою літературою вивчити будову та принципи роботи асинхронних двигунів	2
2	Вивчити можливі методи регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів, їх переваги та недоліки, а також можливі гальмівні режими цих двигунів	2
3	Підготувати робочий зошит для виконання лабораторної роботи, у який записати: <ul style="list-style-type: none"> <li>- назву та мету роботи;</li> <li>- короткі теоретичні пояснення (конспективно) із необхідними для розрахунків формулами;</li> <li>- порядок проведення експерименту;</li> <li>- таблицю 5.3;</li> <li>- електричні схеми експериментів (мал. 5.11, 5.12)</li> </ul>	1

### ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Практикум з електропривода / В. С. Олійник, О. С. Марченко, Е. Л. Жулай та ін. - К.: Урожай, 1995. - 192 с. (С. 34 - 40);
2. Електропривод / О. С. Марченко, Ю. М. Лавриненко, П. І. Савченко, Е. Л. Жулай. - К.: Урожай, 1995. – 208 с. (С. 37 – 50, 85 - 112);
3. Цейтлин Л. С. Электропривод, электрооборудование и основы управления. - М.: Высшая школа, 1985. – 192 с. (С. 102-122);
5. Мякишев Н. Ф. Электропривод, электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных и установок. - М.: Агропромиздат, 1986. – 176 с. (С. 27 – 36, 44 - 58).
6. Электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных агрегатов и установок/Под ред. И. Ф. Кудрявцева. – М.: Агропромиздат, 1988. – 480 с. (С. 40 - 52).



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

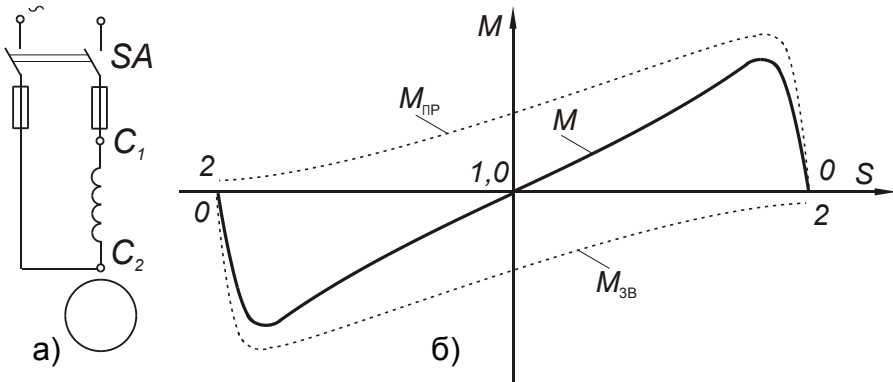
### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В ОДНОФАЗНОМУ РЕЖИМІ

*Мета роботи:* вивчити конструкцію та принцип дії однофазного асинхронного двигуна, ознайомитися з деякими схемами підключення трифазного асинхронного двигуна в однофазну мережу і дослідити його роботу при пускових та номінальних режимах.

#### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЯСНЕННЯ

У багатьох випадках електропривод робочих машин технічно чи економічно доцільніше здійснювати від мережі однофазного змінного струму, ніж від трифазного. Привід від однофазної мережі змінного струму знаходить застосування у сільськогосподарському виробництві, фермерських господарствах, пристроях автоматики, у побуті та ін. Промисловість випускає однофазні електродвигуни порівняно невеликої потужності (до 0,8-1,5 кВт), тому виникає необхідність використання трифазних асинхронних двигунів в однофазній мережі. Принцип роботи трифазних двигунів в однофазній мережі подібний до принципу роботи однофазних двигунів, тому доцільніше почати вивчення з останнього.

За своєю будовою однофазний асинхронний двигун аналогічний трифазному і складається зі статора, у пазах якого розміщена однофазна обмотка, і короткозамкнутого ротора (див. мал. 6.1а). Особливість роботи однофазного асинхронного двигуна полягає в тому, що при включенні однофазної обмотки статора у мережу створюється не обертовий, а *пульсуючий* магнітний потік з амплітудою  $\Phi_{\max}$ , що змінюється від  $+\Phi_{\max}$  до  $-\Phi_{\max}$ . При цьому вісь магнітного потоку залишається нерухомою в просторі. Для пояснення принципу дії однофазного двигуна пульсуючий потік  $\Phi_{\max}$  розкладемо на два обертових у протилежні сторони потоки  $\Phi_{\text{пр}}$  і  $\Phi_{\text{зв}}$ , кожен із яких дорівнює  $0,5\Phi_{\max}$ . Умовимося вважати потік  $\Phi_{\text{пр}}$ , що обертається в напрямку обертання ротора, *прямим*, а потік  $\Phi_{\text{зв}}$  - *зворотним*. Ці два обертових потоки перетинають витки короткозамкнутої обмотки ротора і створюють на роторі два обертових моменти  $M_{\text{пр}}$  та  $M_{\text{зв}}$ , що діють у протилежних напрямках. Результуючий момент  $M$  однофазного двигуна дорівнює сумі цих моментів (див. мал. 6.1б).



**Мал. 6.1 – Електрична схема (а) та механічна характеристика (б) однофазного асинхронного двигуна**

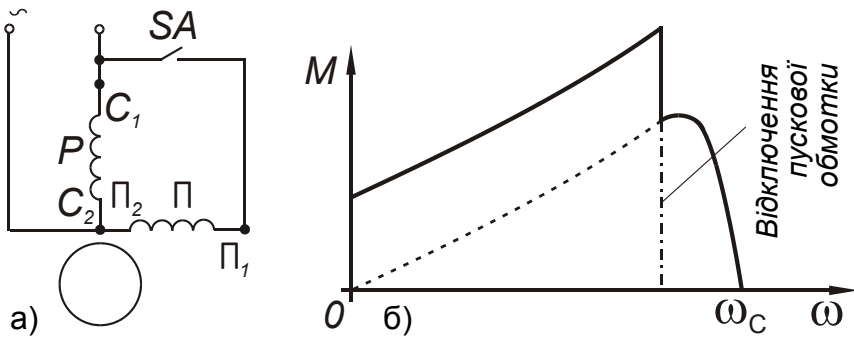
При  $\omega = 0$  ( $S = 1$ ) моменти  $M_{пр}$  та  $M_{зв}$  рівні, а тому пусковий момент однофазного двигуна дорівнює нулю. Отже, однофазний асинхронний двигун не може самостійно зрушити з місця при підключенні його до мережі, а має потребу в первісному поштовху, тому, що лише при  $S \neq 1$  на ротор двигуна діє обертовий момент  $M = M_{пр} - M_{зв}$ .

Приведені на мал. 6.1 залежності моментів показують, що однофазний асинхронний двигун не створює пускового моменту. Щоб цей момент з'явився, необхідно під час пуску двигуна створити в ньому обертове магнітне поле. З цією метою на статорі двигуна крім робочої обмотки  $P$  застосовують ще одну - пускову  $\Pi$ . Ці обмотки розташовують на статорі, так, щоб їх осі були зміщені одна відносно одної на  $90$  електричних градусів. Крім того, струми в обмотках статора  $I_P$  і  $I_{\Pi}$  повинні бути зсунуті по фазі один відносно одного. Для цього в коло пускової обмотки включають фазозсуваючий елемент ( $\Phi E$ ), у якості якого можуть бути застосовані активний опір, індуктивність чи ємність (мал. 6.2а). При досягненні частоти обертання, близької до номінальної, пускову обмотку  $\Pi$  відключають за допомогою реле. Таким чином, під час пуску двигун є двохфазним і має пусковий момент (мал. 6.2б), а під час роботи - однофазним.

Для одержання обертового магнітного поля за допомогою двох обмоток на статорі, що зміщені одна відносно одної на  $90$  електричних градусів, необхідно дотримуватись таких умов:

а) магнітні потоки робочої й пускової обмоток повинні бути рівні і зсунуті в просторі один відносно одного на  $90$  ел. град;

б) струми в обмотках статора  $I_P$  і  $I_{\Pi}$  повинні бути зсунуті по фазі один відносно одного на  $90^\circ$ .



Мал. 6.2 – Електрична схема (а) та механічна характеристика (б) однофазного асинхронного двигуна з пусковою обмоткою

При строгому дотриманні зазначених умов обертове поле статора є круговим, що відповідає найбільшому обертовому моменту. При частковому порушенні якої-небудь з умов поле статора стає еліптичним, і містить зворотну складову. Зворотна складова поля створює гальмівний момент і погіршує пускові властивості двигуна.

Активний опір та індуктивність у якості  $\Phi E$  не забезпечують одержання фазового зсуву між струмами в  $90^\circ$ . Лише тільки ємність  $C$  в якості  $\Phi E$  забезпечує необхідний фазовий зсув. Значення цієї ємності вибирають таким, щоб струм пускової обмотки  $I_{\Pi}$  у момент пуску ( $S = 1$ ) випереджав по фазі напругу на кут до  $90^\circ$ :

Якщо при цьому обидві обмотки створюють однакові за значенням магнітні потоки, то в початковий період пуску обертове поле виявиться круговим і двигун буде розвивати значний початковий пусковий момент. Однак застосування ємності в якості  $\Phi E$  часто обмежується значними габаритами конденсаторів, тим більше, що для одержання кругового поля потрібні конденсатори значної ємності. Наприклад, для однофазного двигуна потужністю 200 Вт необхідна ємність 30 мкф при робочій напрузі 300-500 В.

Набули поширення однофазні двигуни з активним опором у якості  $\Phi E$ . При цьому підвищений активний опір пускової обмотки досягається тим, що вона виконується проводом зменшеного перетину (порівняно з проводом робочої обмотки). Оскільки ця обмотка включена на нетривалий час (звичайно, кілька секунд), то така її конструкція цілком припустима. Пусковий момент таких двигунів, звичайно, не перевищує номінального, але це цілком прийнятно при пуску двигунів із невеликим навантаженням на валі. Застосування ємності в якості  $\Phi E$  дозволяє одержати пусковий момент  $M_{\Pi} = (1,6 - 2,0) M_{\text{н}}$ .

### Асинхронні конденсаторні двигуни

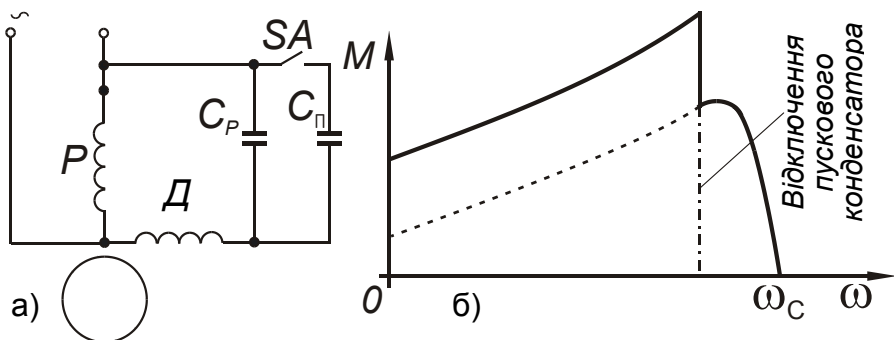
Асинхронний конденсаторний двигун має на статорі дві обмотки, що займають однакове число пазів і зсунуті в просторі одна відносно одної на 90 ел. град. Одну з обмоток - головну - включають безпосередньо в однофазну мережу, а іншу - допоміжну - включають у цю ж мережу, але через робочий конденсатор  $C_P$  (мал. 6.3а). На відміну від розглянутого раніше однофазного асинхронного двигуна, в конденсаторному двигуні допоміжна обмотка після пуску не відключається й залишається включеною протягом усього періоду роботи, при цьому ємність  $C_P$  створює фазовий зсув між струмами  $I_P$  і  $I_D$ .

Таким чином, якщо однофазний асинхронний двигун після закінчення процесу пуску працює з пульсуючим магнітним потоком статора, то конденсаторний двигун - з обертовим. Тому конденсаторні двигуни за своїми властивостями наближаються до трифазних двигунів. Однак, ємність  $C_P$  забезпечує одержання кругового обертового поля лише при одному, цілком визначеному режимі роботи двигуна. Якщо ж зміниться режим (навантаження), то зміняться і струм  $I_D$ , і фазовий кут, а отже, і величина  $C_P$ , що відповідає круговому полю. Таким чином, якщо навантаження двигуна відрізняється від розрахункового, то обертове поле двигуна стає еліптичним і робочі властивості двигуна погіршуються. Звичайно, розрахунок  $C_P$  ведуть для номінального навантаження чи близького до нього.

Володіючи порівняно високими ККД і коефіцієнтом потужності ( $\cos\varphi = 0,80 \div 0,95$ ), конденсаторні двигуни мають незадовільні пускові властивості, тому що ємність  $C_P$  забезпечує кругове поле лише при розрахунковому навантаженні, а при пуску двигуна поле статора еліптичне. При цьому пусковий момент, звичайно, не перевищує  $0,5M_H$ .

Для підвищення пускового моменту паралельно до ємності  $C_P$  включають ємність  $C_L$ , названу *пусковою* (мал. 6.3а). Величину  $C_L$  вибирають, виходячи з умови одержання кругового поля статора при пуску двигуна, тобто одержання найбільшого пускового моменту. Після закінчення пуску ємність  $C_L$  варто відключити, тому що при невеликих ковзаннях у колі обмотки статора, що містить ємність  $C$  та індуктивність  $L$ , можливий резонанс напруг, через що напруга на обмотці і на конденсаторі може у два-три рази перевищити напругу мережі. На мал. 6.3, б приведена механічна характеристика однофазного асинхронного двигуна із пусковою ємністю  $C_L$ .

При виборі типу конденсатора варто пам'ятати, що його робоча напруга визначається амплітудним значенням синусоїдальної напруги,



**Мал. 6.3 – Електрична схема (а) та механічна характеристика (б) однофазного конденсаторного асинхронного двигуна**

прикладеної до конденсатора. При круговому обертовому полі ця напруга перевищує напругу мережі.

Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі

Трифазний асинхронний двигун може бути використаний для роботи від однофазної мережі. У цьому випадку такий двигун включають як конденсаторний за однією зі схем, приведених на мал. 6.4.

Значення робочої ємності  $C_P$  (мкф) при частоті змінного струму 50 Гц можна орієнтовно визначити за однією з формул: для схеми, зображеної на мал. 6.4 а,

$$C_P \approx 2700I/U_M ;$$

на мал. 6.4 б

$$C_P \approx 2800I/U_M ;$$

на мал. 6.4 в

$$C_P \approx 4800I/U_M .$$

Тут  $I$  - номінальний (фазний) струм в обмотці статора, А;

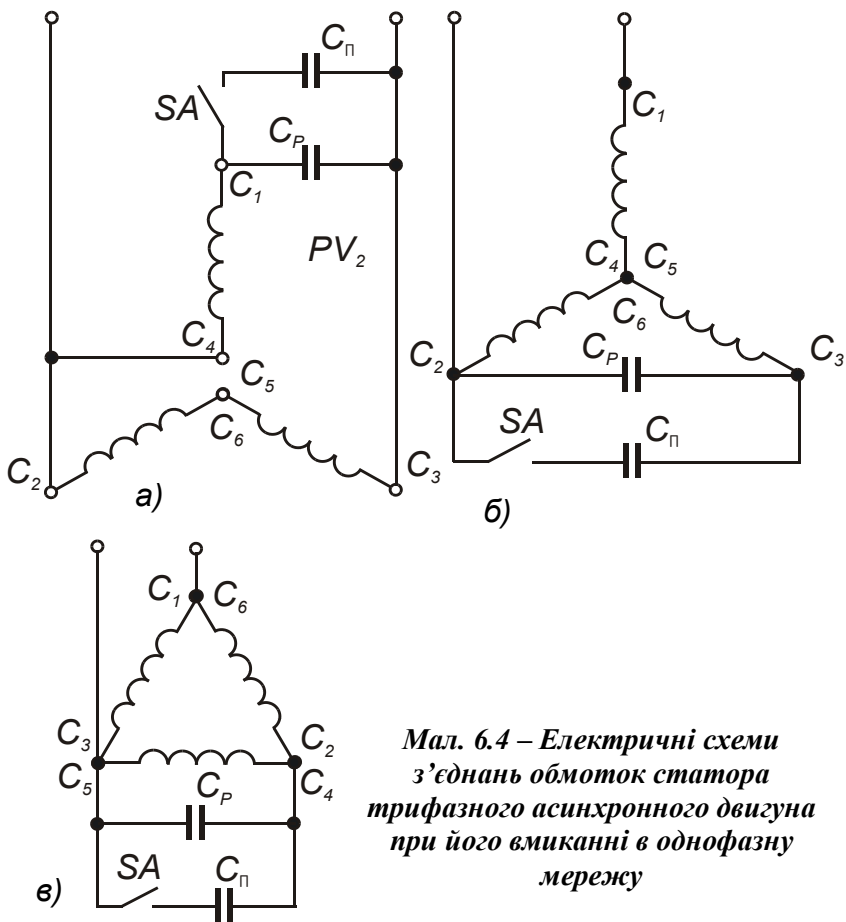
$U_M$  - напруга однофазної мережі, В.

При підборі робочої ємності необхідно стежити за тим, щоб струм у фазних обмотках статора при сталому режимі роботи не перевищував номінального значення.

Якщо пуск двигуна відбувається при значному навантаженні на валу, то паралельно до робочої ємності  $C_P$  варто включити пускову ємність:

$$C_{II} = (2,5 \div 3,0)C_P .$$

У цьому випадку пусковий момент стає рівним номінальному. При необхідності подальшого збільшення пускового моменту варто прийняти ще більше значення пускової ємності.



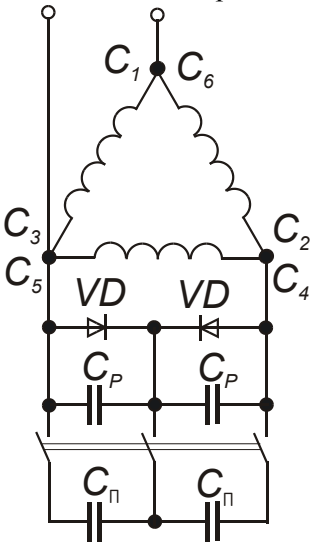
*Мал. 6.4 – Електричні схеми з'єднань обмоток статора трифазного асинхронного двигуна при його вмиканні в однофазну мережу*

Велике значення для надійної роботи асинхронного двигуна в якості конденсаторного має правильний вибір конденсатора за напругою. Варто мати на увазі, що габарити й вартість конденсаторів визначаються не тільки їхньою ємністю, але і робочою напругою. Тому вибір конденсатора з великим «запасом» за напругою веде до невиправданого збільшення габаритів і вартості установки, а включення конденсаторів на напругу, що перевищує допустиму робочу напругу, призводить до передчасного виходу з ладу конденсаторів, а отже, і всієї установки.

Визначаючи напругу на конденсаторі при включенні двигуна за однією з розглянутих схем, необхідно мати на увазі: при включенні двигуна за схемою мал. 6.4а напруга на конденсаторі дорівнює

$U_K \approx 1,3U_M$ , а при включенні двигуна за схемами мал. 6.4б, в ця напруга дорівнює  $U_K \approx 1,15U_M$ .

У схемах конденсаторних двигунів, звичайно, застосовують паперові конденсатори в металевому герметичному корпусі прямокутної форми типів КБГ-МН чи БГТ (термостійкі). На корпусі конденсатора зазначені ємність і робоча напруга, яка повинна бути не меншою 1,3 номінальної напруги мережі. Як пускові конденсатори можна використовувати менші за габаритами та дешевші електролітичні типу ЭП, що спеціально призначені для цієї мети (робоча напруга не менше 450 В). Слід мати на увазі, що електролітичні конденсатори, розраховані на роботу у колах постійного струму, тому у колах змінного струму вони можуть працювати лиш декілька секунд і після запуску двигуна їх необхідно обов'язково виключати. Електролітичні конденсатори, можна використовувати і як робочі, але при спеціальній схемі вмикання (див. мал. 6.5). У табл. 6.1 приведені величини ємностей та типи конденсаторів і діодів для двох найчастіше використовуваних схем (мал. 6.4в та мал. 6.5).



**Мал. 6.5 – Електрична схема з'єднань обмоток статора трифазного асинхронного двигуна при його вмиканні в однофазну мережу за допомогою електролітичних конденсаторів**

При використанні трифазного двигуна в однофазному конденсаторному режимі його корисна потужність, звичайно, не перевищує 70-80 % номінальної потужності, а при однофазному режимі без робочої ємності корисна потужність двигуна не перевищує 60 % його номінальної потужності.

Для керування електродвигуном, що вмикається за схемою з робочою та пусковою ємностями, доцільно використовувати пускач натискний вібростійкий, типу ПНВС, що має спеціальні пускові контакти, які розмикають коло пускової ємності при відпусканні кнопки "пуск". Можна також використовувати магнітні пускачі та кнопкові пости, що вмикаються за спеціальними схемами. Для зміни напрямку обертання двигуна достатньо поміняти місцями виводи робочої чи пускової обмоток.

Таблиця 6.1

Дані для вмикання трифазного асинхронного електродвигуна напругою 220/380 В  
в однофазну мережу напругою 220 В з використанням ємності

Потужність, кВт	Частота обертів, хв <sup>-1</sup>	Номинальний струм, А	Величина робочої ємності, мкф		Величина пускової ємності, мкф		Тип робочої ємності		Тип пускової ємності		Діоди
			Схема								
			6.4в	6.5	6.4в	6.5	6.4в	6.5	6.4в	6.5	
1,1	2790	6	131	262	328...393	656...786	МБГП	КЕ	МБГП	КЕ	КД222М
1,1	1395	4,8	104	208	260...312	520...624	КБГ-МН	К50-3	КБГ-МН	К50-3	КД202Р
1,5	2850	5,7	124	248	310...372	620...744					БГТ
1,5	1395	6,2	135	270	338...405	676...810	МБГЧ	К50-7	МБГЧ	К50-7	КД206А
2,2	2850	8,0	175	350	438...525	876...1050	МБГО	К50-12	МБГО	К50-12	КД206А
2,2	1410	8,7	190	380	475...570	958...1140	МБГТ	К50-17	МБГТ	К50-17	2Д206Б
3,0	2820	10,6	231	462	578...693	1156...1386					К50-19
3,0	1410	11,6	253	506	633...759	1266...1518	К50-20	К50-32	К50-20	К50-20	Д246
4,0	2880	13,7	299	598	747...897	1494...1794					К50-32
4,0	1410	14,9	325	658	813...975	1626...1950					Д247Б
5,5	2880	18,2	397	794	993...1197	1986...2394					Д248Б
5,5	1435	19,9	434	868	1085...1302	2170...2604					Д247 КД206Б



## ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ, АНАЛІЗ І ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ

- 1) Записати паспортні дані електродвигуна і вирахувати величини фазосувних елементів, які необхідні для під'єднання двигуна у однофазну мережу при різних її напругах. Результати записати у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

### Паспортні дані досліджуваного двигуна

Тип електро- двигуна	$P_H$	$U_H$	$I_H$	$\cos\varphi_H$	ККД	U	$R_{II}$	$C_P$	$C_{II}$
	кВт	В	А		%	В	Ом	Мкф	Мкф
						220			
						127			

- 2) Зібрати вказані викладачем електричні схеми під'єднання трифазних двигунів в однофазну мережу (мал. 6.6 а, б, в), та дослідити їх роботу при запуску і навантаженні, і здійснити реверс двигуна. Результати записати у табл. 6.3.

Таблиця 6.3

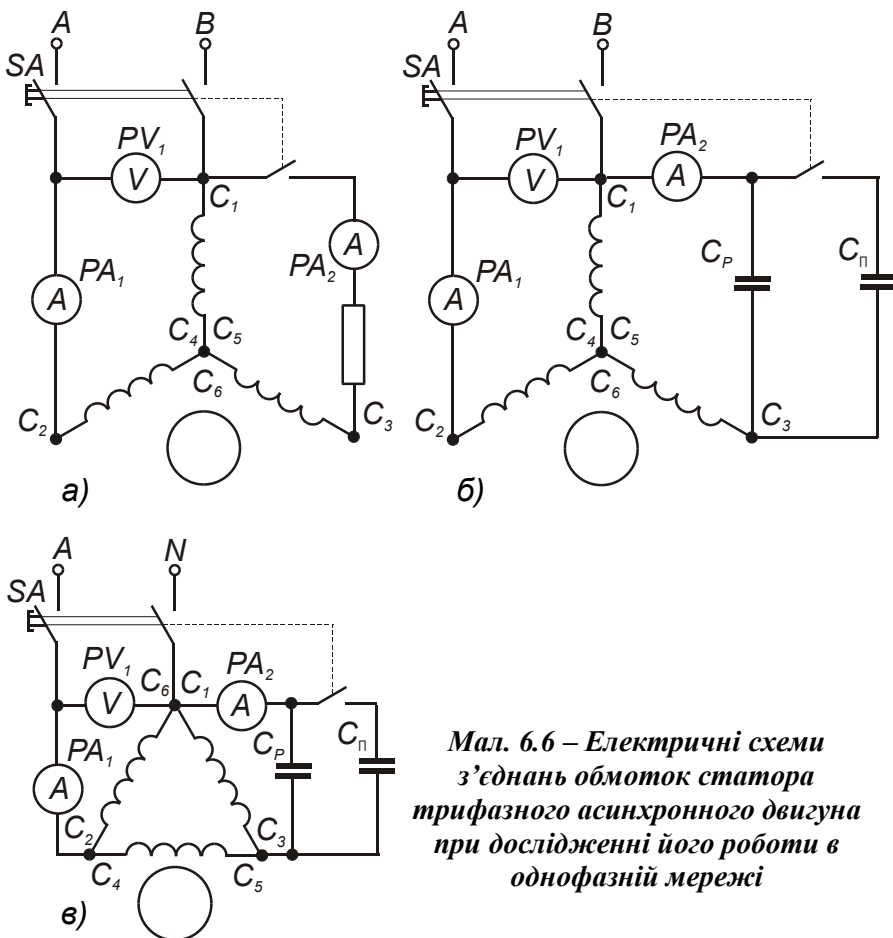
### Протокол дослідження роботи трифазного двигуна в однофазній мережі

Схема з'єднань обмоток статора	Напруга мережі, В	Величина ємності (мкф), або опору (Ом)			Струм, А			
					робоча обмотка		допоміжна обмотка	
		$C_P$	$C_{II}$	$R_{II}$	$I_{II}$	$I_H$	$I_{II}$	$I_H$
а								
б								
в								

Схеми дослідження роботи трифазного двигуна в однофазній мережі приведені на мал. 6.6. Величина пускового активного опору  $R_{II}$  (для схеми мал. 6.6а) повинна бути близькою до опору фазної обмотки змінному струму і розрахованою на пусковий струм (у 5-7 разів більший від номінального). Приблизний розрахунок значення  $R_{II}$  можна здійснити за такою емпіричною формулою, [Ом]:

$$R_{II} = \frac{\alpha \eta_H \cos \varphi_H}{K_I P_H},$$

- де  $\alpha$  – конструктивний коефіцієнт ( $\alpha = 0,3 \div 1,3$ );  
 $\eta_H$  – номінальний коефіцієнт корисної дії в %;  
 $\cos \varphi_H$  – номінальний коефіцієнт потужності;  
 $K_I$  – кратність пускового струму ( $K_I = 5 \div 7$ );



*Мал. 6.6 – Електричні схеми з'єднань обмоток статора трифазного асинхронного двигуна при дослідженні його роботи в однофазній мережі*

$P_H$  – номінальна потужність двигуна, кВт.

Величина ємності робочого конденсатора  $C_P$  [мкф], для схем мал. 6.6 б, в, визначається за емпіричною формулою:

$$C_P = \frac{1950 I_H}{U_H \cos \varphi_H},$$

де  $U_H$  та  $I_H$  – номінальні напруга та сила струму двигуна.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чому однофазний двигун не створює пускового моменту?
2. З якою метою в коло пускової обмотки однофазного двигуна включають фазозсуваючий елемент?

3. Чим відрізняється однофазний двигун від конденсаторного?
4. Як можна підвищити пусковий момент у конденсаторному двигуні?
5. Як забезпечується створення обертового магнітного поля у статорі трифазного асинхронного двигуна при його роботі в однофазній мережі?
6. Від чого залежить вибір схеми вмикання трифазного асинхронного двигуна в однофазну мережу?
7. Як розраховують величину фазозсуваючих елементів?
8. Як змінити напрям обертання трифазного асинхронного двигуна при його роботі в однофазній мережі?
9. При яких схемах вмикання трифазного асинхронного двигуна в однофазну мережу він має кращі експлуатаційні характеристики і чому?

### ПРОГРАМА ПОЗААУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ

№ з/п	Вид підготовки	Час, год
1	За рекомендованою літературою вивчити будову та принцип роботи однофазних асинхронних двигунів	1
2	Вивчити можливі методи вмикання трифазних асинхронних двигунів в однофазну мережу, їх переваги та недоліки	1
3	Підготувати робочий зошит для виконання лабораторної роботи, у який записати: <ul style="list-style-type: none"> <li>- назву та мету роботи;</li> <li>- короткі теоретичні пояснення (конспективно) із необхідними для розрахунків формулами;</li> <li>- порядок проведення експерименту;</li> <li>- таблиці 6.2, 6.3;</li> <li>- електричні схеми експериментів (мал. 6.6)</li> </ul>	1

### ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електропривод: Ч.1./О. С. Марченко, Ю. М. Лавриненко, П. І. Савченко, Е. Л. Жулай. - К.: Урожай, 1995. – 208 с. (С. 49 – 50).
2. Мякишев Н. Ф. Электропривод, электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных и установок. - М.: Агропромиздат, 1986. – 176 с. (С. 37 – 40).
3. Кацман М. Н. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 463 с.: ил. (С. 208 - 217).

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### ДОСЛІДЖЕННЯ НАГРІВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

**Мета роботи:** дослідити нагрівання електродвигуна під час роботи, визначити усталене перевищення температури двигуна, постійну часу нагрівання та номінальну потужність електродвигуна за його нагріванням.

### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЯСНЕННЯ

Потужність, яку може розвивати електродвигун, в основному визначається його нагріванням внаслідок втрат енергії  $\Delta P$  при роботі, величина яких залежить від коефіцієнта корисної дії двигуна  $\eta_H$ :

$$\Delta P = P_1 - P_H = \frac{P_H}{\eta_H} - P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H},$$

де  $P_1$  – потужність, що підводиться до двигуна із мережі;

$P_H$  – номінальна потужність двигуна.

Утрати енергії поділяються на *змінні* (що залежать від навантаження) та *постійні*, які при будь-якому навантаженні на електродвигун практично однакові і в основному залежать від величини напруги мережі живлення електродвигуна. До *змінних втрат*  $\Delta P_v$  належать втрати від проходження струму навантаження по обмотках електродвигуна (вони пропорційні квадрату сили струму навантаження), до *постійних втрат*  $\Delta P_K$  - втрати на перемагнічування осердя (гістерезис), втрати від протікання в осерді вихрових струмів Фуко, втрати на тертя та ін.. Унаслідок безперервного виділення постійної кількості теплоти при роботі двигуна із постійним навантаженням його температура поступово підвищується і перевищує температуру навколишнього середовища. При цьому зростає тепловіддача від двигуна в навколишнє середовище. Через деякий час настає теплова рівновага, коли кількість тепла, що утворюється у двигуні за одиницю часу, дорівнює кількості тепла, що віддається двигуном у навколишнє середовище. Температура двигуна при цьому лишається незмінною і називається *усталеюю*. Підвищення температури обмоток двигуна понад допустимому значно скорочує термін служби ізоляції. Допустима температура електродвигуна залежить від термостійкості ізоляційних матеріалів, що використані при його виготовленні. Стандарт ГОСТ 8865-87

поділяє всі ізоляційні матеріали, що використовуються в електричних машинах, за теплостійкістю (гранично допустимою температурою нагрівання  $\theta_{доп}$ ) на сім класів (див. табл. 7.1):

Таблиця 7.1

**Термостійкість ізоляційних матеріалів**

У	А	Е	В	Ф	Н	С
90 <sup>0</sup> С	105 <sup>0</sup> С	120 <sup>0</sup> С	130 <sup>0</sup> С	155 <sup>0</sup> С	180 <sup>0</sup> С	>180 <sup>0</sup> С

При аналізі нагрівання електродвигуна оцінюється перевищення його температури над температурою навколишнього середовища. У стандартах за нормальну температуру навколишнього газоподібного середовища (охолоджувального) прийнята температура + 40 °С при висоті над рівнем моря 1000 м.

Допустима температура підшипників електричних машин не повинна перевищувати + 100 °С для підшипників кочення і + 80 °С для підшипників ковзання.

Залежність перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища від часу має вигляд експоненціальної функції:

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{II} e^{-\frac{t}{T_H}},$$

де  $\tau$  - перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$\tau_y, \tau_{II}$  - відповідно, усталене та початкове перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища, °С;

$t$  - час, с;

$T_H$  - постійна часу нагрівання, с.

Охолодження двигуна при вимиканні його з мережі описується залежністю:

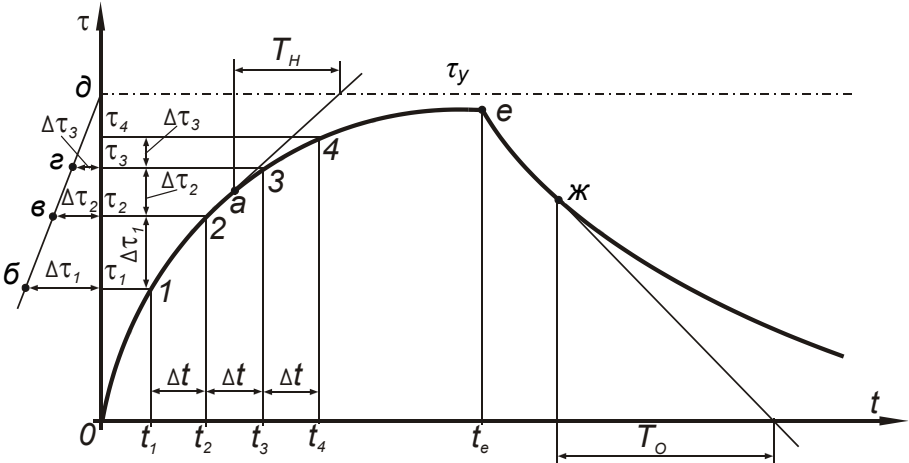
$$\tau = \tau_{II} e^{-\frac{t}{T_O}},$$

де  $T_O$  - постійна часу охолодження, с.

У двигунів із самовентиляцією (без вентиляції від окремих вентиляторів)  $T_O > T_H$ , оскільки тепловіддача при нерухомому вентиляторі двигуна менша ніж при рухомому.

Оскільки усталеного значення перевищення температури електродвигун теоретично набуває за нескінченний проміжок часу  $t \rightarrow \infty$ , а дослід, як правило, обмежений у часі, то  $\tau_y$  визначають графічним

способом (мал. 7.1). Для цього знаходять приріст температури:  $\Delta\tau_1$ ,  $\Delta\tau_2$ ,  $\Delta\tau_3$  і т. д. за рівні проміжки часу  $\Delta t$ . Через точки кривої нагрівання 1, 2, 3, 4 проводять горизонтальні лінії і на них ліворуч від осі ординат відкладають величини  $\Delta\tau_1$ ,  $\Delta\tau_2$ ,  $\Delta\tau_3$ . Отримують точки б, в, з, через які проводять пряму до перетину з віссю ординат ( $\tau$ ) у точці д. Відрізок  $Od$  у вибраному масштабі дорівнює ustalеному перевищенню температури двигуна  $\tau_y$ . Горизонтальна лінія, проведена через точку д, буде асимптотою для кривої нагрівання.



Мал. 7.1 – Криві нагрівання та охолодження двигуна

Постійну часу нагрівання  $T_H$  можна визначити за кривою нагрівання, для цього необхідно через точку на осі ординат, що відповідає  $0,632\tau_y$  провести горизонтальну лінію до перетину з кривою нагрівання і спроекувати точку перетину на вісь часу, відрізок від початку координат до проекції даної точки на вісь часу у масштабі часу буде рівним  $T_H$ . При наявності кривої нагрівання, постійну часу можна визначити методом дотичної, проведеної у довільній точці кривої (бажано до другої її половини), наприклад у точці а. Відрізок від проекції точки а на лінію  $\tau_y$  до точки перетину дотичної і лінії  $\tau_y$  у масштабі часу буде рівним  $T_H$ . Методом дотичної визначають і постійну часу охолодження двигуна  $T_O$ .

Якщо  $\tau_y$  не визначене, то постійну часу нагрівання можна визначити за трьома точками за формулою:

$$T_H = \Delta t / \ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}.$$

Величини  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  беруть з графіка, через рівні проміжки часу  $\Delta t$ . Усталене значення перевищення температури двигуна можна визначити за формулою:

$$\tau_y = \tau_i / \left( 1 - e^{-\frac{t_i}{T_H}} \right),$$

де  $\tau_i, t_i$  – змінні значення дозвільної точки кривої нагрівання електро-двигуна.

## ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ, АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Ознайомитись з обладнанням стенда і записати у табл. 7.2 паспортні дані досліджуваного двигуна.

Таблиця 7.2

*Паспортні дані електродвигуна*

Тип двигуна	$P_H$	$U_H$	$I_H$	ККД	$\cos\varphi$	Режим роботи	Клас ізоляції	Вага кг
	Вт	В	А	%				

2. Зібрати електричну схему стенду (мал. 7.2). При проведенні дослідів температуру обмоток досліджуваного двигуна вимірюють за допомогою термометра опору  $R_0$  (типу ТСМ), який закладений в осердя статора двигуна. Навантаженням на двигун є механічно з'єднаний з ним двигун постійного струму змішаного збудження П22, що працює в режимі генератора і навантажений електролампочками  $H$ .
3. Ввімкнути двигун і завантажити його шляхом включення певної кількості лампочок  $H$ . При проведенні експерименту необхідно контролювати (за допомогою амперметра) і підтримувати навантаження досліджуваного двигуна постійним, шляхом включення певної кількості лампочок  $H$ . Щоб потужність холостого ходу навантажувального двигуна була незмінною, необхідно підтримувати за допомогою реостата  $R$  постійний струм його збудження. Потужність на валу досліджуваного двигуна визначається за формулою:

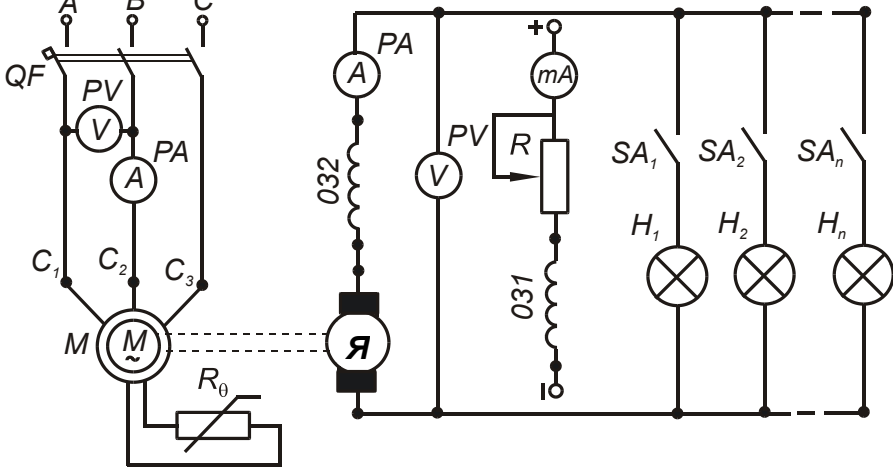
$$P_d = U_G I_G + P_0 + I_G^2 R_{\gamma} + 0,01 U_G I_G,$$

де  $U_G$  – напруга генератора, В;

$I_G$  – струм генератора, А;

$P_0$  - втрати холостого ходу генератора, Вт;

$I_{Г}^2$ ,  $R_{Я}$  – втрати потужності на нагрівання обмоток якоря генератора;  
 $0,01U_{Г}I_{Г}$  – додаткові втрати в генераторі.



**Мал. 7.1 – Електрична схема з'єднань стенду дослідження нагрівання електродвигуна**

Величини параметрів, що контролюються під час роботи навантажувального двигуна (генератора) і підтримуються незмінними, записати до табл. 7.2.

Таблиця 7.2

$U_{Г}$	$I_{Г}$	$I_{ГЗ}$	$P_{O}$	$R_{Я}$
В	А	А	Вт	Ом

4. Під час роботи двигуна, через кожні 3 хвилини записувати у табл. 7.3 температуру двигуна  $\theta_{д}$ , температуру навколишнього середовища  $\theta_{НС}$  (покази ртутного термометра, що знаходиться біля двигуна), струм, який споживає ( $I_{д}$ ) електродвигун (покази амперметра А).

За результатами досліджень побудувати криву нагрівання двигуна  $\tau = f(t)$ , де  $\tau = \theta_{д} - \theta_{НС}$ . Графічно визначити усталене перевищення температури двигуна  $\tau_{у}$ , провести на графіку відповідну йому горизонтальну лінію і продовжити відповідно до неї криву нагрівання двигуна. Визначити аналітично (за допомогою формули)  $\tau_{у}$  і знайти середнє значення.



Таблиця 7.3

$t$	хв	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	
$\theta_{д}$	$^{\circ}\text{C}$																						
$\theta_{НС}$	$^{\circ}\text{C}$																						
$\tau$	$^{\circ}\text{C}$																						
$I_{д}$	А																						

- Визначити постійну часу нагрівання двигуна  $T_H$  за трьома вищевказаними способами і знайти середнє значення.
- Визначити номінальну потужність двигуна за його нагріванням за формулою:

$$P_H = P_D \sqrt{\tau_{\max} / \tau_y},$$

де  $\tau_{\max}$  – допустиме перевищення температури обмоток двигуна, для даного класу ізоляції  $\tau_{\max} = \theta_{\text{доп}} - 40^{\circ}\text{C}$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- Які втрати енергії мають місце під час роботи електродвигуна, як вони поділяються і від чого залежать?
- Чому збільшення температури двигуна спостерігається до певного значення і в подальшому при тому ж постійному навантаженні припиняється?
- Що називається усталеною температурою?
- Як графічно за кривою нагрівання знайти усталене значення перевищення температури двигуна та постійну часу його нагрівання?
- Як впливає температура навколишнього середовища на допустиму потужність електродвигуна?
- Чому постійна часу охолодження звичайних електродвигунів більша за постійну часу їх нагрівання?
- Від чого залежить величина допустимої температури електродвигуна?
- Як поділяються ізоляційні матеріали за термостійкістю?

## ПРОГРАМА ПОЗААУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Вид підготовки	Час, год
1	За рекомендованою літературою вивчити закони нагрівання й охолодження електродвигунів та методи визначення допустимого навантаження електродвигуна за нагріванням	2
2	Вивчити графічні та аналітичні методи визначення усталеного перевищення температури електродвигуна та постійних часу його нагрівання й охолодження	2
3	Підготувати робочий зошит для виконання лабораторної роботи, у який записати: - назву та мету роботи; - короткі теоретичні пояснення (конспективно) із необхідними для розрахунків формулами; - порядок проведення експерименту; - таблиці 7.2, 7.3; - електричні схеми експериментів (мал. 7.2)	1

### ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електропривод: Ч.1 О. С. Марченко, Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, Э. Л. Жулай / За ред. О. С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. - 208 с. – (С. 165-170).
2. Олійник В.С., Марченко О.С., Жулай Є.Л., Лавріненко Ю.М. Практикум з електроприводу . – К.: Урожай, 1995. - 192 с. – (С. 58-65).
3. Мякишев Н. Ф. Электропривод и электрооборудование автоматизированных сельскохозяйственных установок – М.: Агропромиздат, 1986. – 176 с.- (С. 92-110).
4. Электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных агрегатов и установок (И. Ф. Кудрявцев, Л. А. Калинин, В. А. Карасенко и др./Под ред. Кудрявцева И. Ф. – М.: Агропромиздат, 1988. - с. 480.- (С. 62-65).
5. Цейтлин Л. С. Электропривод, электрооборудование и основы управления. – М.: Высшая школа, 1985. – 192 с. - (С. 131-136).

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

*Мета роботи:* вивчення методів підвищення коефіцієнта потужності споживачів електричної енергії в однофазних або трифазних мережах при навантаженні активно-індуктивного характеру, з'ясування залежності коефіцієнта потужності асинхронних електродвигунів від навантаження на їх валу.

### КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЯСНЕННЯ

Енергію електричного струму можна розглядати як складену з двох частин: однієї, що витрачається на виконання корисної роботи, для якої призначені електроприймачі, і другої, яка коливається в електричному колі і не виконує корисної роботи. Першу з них називають *активною*, а другу - *реактивною*.

Відповідно до повної, активної і реактивної енергії розрізняють повну, активну і реактивну потужність. Активна потужність  $P$  характеризує швидкість перетворення електричної енергії в корисну роботу (механічну, теплову та ін.), а також теплові втрати на нагрівання провідників у струмоприймачах і електромережах. Активна енергія весь час надходить від генератора до споживача і повернення цієї енергії назад не відбувається.

Друга складова повної потужності  $S$ , так звана реактивна потужність  $Q$ , корисної роботи не виконує і призначена тільки для створення магнітних полів у електродвигунах, трансформаторах, котушках індуктивності та ін., без яких вони не можуть працювати. Реактивна енергія весь час коливається між генератором та споживачем із частотою вдвічі більшою частоти коливань змінного електричного струму. При збільшенні струму споживача, реактивна енергія підходить до нього, а при зменшенні струму повертається до генератора.

Число, що показує, яку частину від повної потужності, спожитої споживачем, становить активна потужність - називають коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi$  цього споживача:

$$\cos \varphi = P/S.$$

Значення  $\cos \varphi$  можна виміряти за допомогою фазометра або визначити за відомими  $P$  і  $S$  за наведеною вище формулою.

Переважає більшість споживачів електричної енергії буває двох видів:

1) споживачі активної енергії (освітлювальні лампи, побутові нагрівні прилади, електричні печі та ін.), коефіцієнт потужності яких  $\cos \varphi = 1$ , вони споживають тільки активну потужність  $P$ ;

2) споживачі активної та індуктивної енергій (електричні двигуни, трансформатори, різного типу реле, котушки індуктивності та ін.) для яких  $\cos \varphi < 1$ .

Повна і реактивна потужності для однофазних споживачів:

$$\begin{aligned} S &= UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, & [BA]; \\ P &= UI \cos \varphi, & [Bm]; \\ Q &= UI \sin \varphi, & [BAp], \end{aligned}$$

- для трифазних споживачів:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}; \\ P &= \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi; \\ Q &= \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi, \end{aligned}$$

- струм в однофазній лінії:

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi},$$

- лінійний струм трифазних споживачів:

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi}.$$

Величина коефіцієнта потужності характеризує економічність роботи електропристроїв. Зниження  $\cos \varphi$  призводить до непродуктивного завантаження генераторів, трансформаторів та ліній електропередач реактивним струмом. При цьому корисне (активне) навантаження їх зменшується, недовантажуються первинні двигуни електростанцій, знижується їх ККД, зростають витрати палива на одну кВт/год виробленої електроенергії, збільшується втрата електроенергії у лініях електропередач. Усе це показує, що підвищення коефіцієнта потужності електропристроїв є важливим народногосподарським завданням.

Причинами низького коефіцієнту потужності електроспоживачів можуть бути:

- використання великої кількості асинхронних двигунів із низьким номінальним  $\cos \varphi_H$  ;
- неповне завантаження електродвигунів і трансформаторів;
- використання електродвигунів, ремонт яких виконаний неправильно (обточений ротор);
- коливання напруги і частоти струму мережі живлення;
- нерівномірне навантаження електродвигунів.

Коефіцієнт потужності електропристроїв можна поліпшити в результаті зменшення споживання ними реактивної енергії та шляхом компенсації за допомогою спеціальних компенсуючих пристроїв.

Щоб забезпечити мінімальне споживання реактивної потужності, необхідно:

- забезпечити нормальне рівномірне навантаження електродвигунів та силових трансформаторів. Асинхронні двигуни, що завантажені менш як на 60% їх номінальної потужності, необхідно замінити двигунами меншої потужності. Обмотки статорів асинхронних двигунів, які завантажені не більш як на 40% від номінального навантаження, необхідно перемкнути (якщо це можливо) із з'єднання "трикутником" на з'єднання "зіркою";
- усунути холості ходи електродвигунів і зварювальних трансформаторів, застосовуючи для цього автоматичні обмежувачі холостого ходу;
- замінити асинхронні електродвигуни синхронними, якщо це допускається умовами роботи електроприводів та є економічно поцілним, або використовувати асинхронні двигуни із високим номінальним  $\cos \varphi_H$  .

Зменшуючи споживання реактивної потужності електроприймачами в реальних сільськогосподарських пристроях, можна підвищити значення  $\cos \varphi$  до 0.7-0,8, але довести його до одиниці неможливо, тому для подальшого підвищення  $\cos \varphi$  застосовують спеціальні компенсуючі пристрої: конденсаторні батареї, синхронні компенсатори тощо.

В умовах сільськогосподарського виробництва найефективнішими компенсуючими пристроями є конденсаторні батареї, які комплектуються із конденсаторів змінного струму серії КМ (масляні) або КС (солоні). У сільських електропристроях найефективнішою є групова компенсація реактивної потужності, коли конденсаторна батарея під'єднується до розподільчого щитка й обслуговує всі електродвигу-

ни, що підключаються до нього, розвантажуючи при цьому від реактивної потужності лінії електропередач, що подають електроенергію до цього щитка.

При використанні конденсаторних пристроїв слід мати на увазі:

- сумарна потужність батареї не повинна перевищувати величину найменшої реактивної потужності електроспоживачів, що під'єднані до неї;

- індивідуальна компенсація доцільна лише для електроспоживачів потужністю 20 кВт і більше, з великою кількістю годин роботи на рік;

- на силових пристроях, що працюють не повну добу, батареї конденсаторів повинні бути обладнані автоматичними пристроями, які забезпечують їх вмикання та вимикання залежно від величини струму, що споживається.

Відповідно до нових правил користування електричною та тепловою енергією запропоновано систему стимулювання і покарання за ступінь компенсації реактивної потужності. За цією системою знижки і надбавки до тарифу на електроенергію визначають окремо для двох груп споживачів:

- споживачів із приєднаною потужністю трансформаторів і високовольтних двигунів 750 кВА і більше;

- споживачів із приєднаною потужністю менше 750 кВА.

Сільськогосподарські електроспоживачі здебільшого належать до другої групи. Для них величину знижок і надбавок  $H[\%]$  рекомендується визначати за відношенням фактичної реактивної потужності  $Q_{K\Phi}$  компенсуючого пристрою, що встановлений біля споживача, до економічної реактивної потужності  $Q_{KE}$ , яка задається споживачу енергопостачальною організацією, тобто:

$$K = \frac{Q_{K\Phi}}{Q_{KE}} 100\%,$$

користуючись шкалою:

K	%	0...30	30...50	50...70	70...90	90...110	110...130	> 130
H	%	+50	+30	+10	0	-5	+10	+50

Крім того, енергопостачальна організація задає режим роботи компенсуючого пристрою у вигляді графіка його вмикання і вимикання. Якщо цей графік не виконується, то встановлюється максимальна надбавка до тарифу в розмірі 50% за квартал, в якому було порушення заданого режиму. При цьому знижки або надбавки за шкалою не

застосовуються. Економічну реактивну потужність  $Q_{KE}$  компенсуючого пристрою визначають за його розрахунковою реактивною потужністю  $Q_{KP}$ , користуючись шкалою:

$Q_{KP}$	кВАр	<50	50..120	120..190	190..260	260..380	>380
$Q_{KC}$	кВАр	0	75	150	225	300	450

Розрахункову реактивну потужність компенсуючого пристрою визначають за формулою:

$$Q = (0,2 + 0,5d)S,$$

де  $S$  - приєднана потужність споживача, кВА;

$d$  - частка встановленої потужності асинхронних двигунів і зварювальних трансформаторів у складі низьковольтних електроспоживачів.

При покращенні коефіцієнта потужності трифазних споживачів конденсатори з'єднуються або "трикутником", або "зіркою" (залежно від ємності конденсаторів і їх робочої напруги).

У загальному випадку, коли необхідно підвищити коефіцієнт потужності від  $\cos \varphi_1$  до  $\cos \varphi_2$  (для сільських електропристроїв  $\cos \varphi$  необхідно підвищувати до 0,92...0,95) потужність батареї статичних конденсаторів підраховують за формулою:

$$Q_{KP} = P(tg \varphi_1 - tg \varphi_2),$$

де  $P$  - активна потужність двигунів, кВт.

Ємність трифазної батареї статичних конденсаторів:

$$3C = Q_{KP} 10^9 / \omega U^2,$$

де  $C$  - ємність однієї фази конденсаторної батареї, мкф;

$U$  - напруга на фазі конденсатора, В;

$$\omega = 2\pi f - \text{кутова швидкість (при } f=50 \text{ Гц, } \omega=314 \text{ рад/с)}.$$

Із виразу випливає, що при одній і тій же ємності конденсаторної батареї реактивна потужність пропорційна квадрату прикладеної напруги, тому конденсатори рекомендується підключати на стороні високої напруги трансформаторної підстанції, але у цьому разі трансформатор буде завантажений реактивною потужністю. З цієї ж причини конденсатори з'єднують у "трикутник", а не у "зірку", оскільки  $U_{\phi\Delta} = \sqrt{3}U_{\phi Y}$  і потужність конденсаторної батареї зростає у тричі.

Щоб не допускати вмикання заряджених конденсаторів, та забезпечити безпечне обслуговування конденсаторних батарей, застосовують розрядні резистори, які підключаються паралельно до конденсаторних батарей. Після від'єднання конденсаторного пристрою від мережі, резистори повинні знижувати амплітудне значення напруги до

50 В, за час, не більший 1 хвилини. При напрузі до 1000 В замість резисторів використовують звичайні лампи розжарювання.

Для покращення коефіцієнта потужності застосовують також синхронні компенсатори, що являють собою синхронні двигуни, які працюють у режимі неробочого ходу при перезбудженні. Вони генерують реактивну енергію в мережу. Так само, як і для конденсаторів, у синхронних компенсаторів  $Q_K < 0$ .

## ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Записати технічні дані двигуна у табл. 8.1.

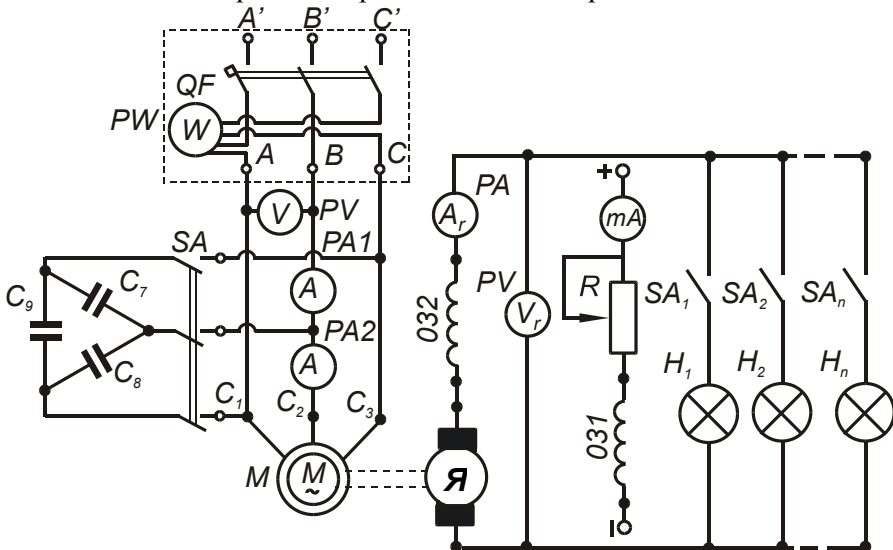
Таблиця 8.2

*Паспортні дані електродвигуна*

Тип двигуна	$P_H$	$U_H$	$I_H$	к.к.д.	$\cos\varphi$	Режим роботи	Клас ізоляції	Вага
	Вт	В	А	%				кг

2. Зібрати схему (мал. 8.1).

3. Зняти покази приладів при включених і при виключених конден-



*Мал. 8.1 – Електрична схема лабораторного стенду для дослідження коефіцієнта потужності асинхронного двигуна (обведене пунктирною лінією – зібране на стенді)*



саторах для холостого ходу двигуна.

4. Здійснити навантаження електродвигуна і повторити експеримент. Для навантаження електродвигуна використовується електричний двигун постійного струму змішаного збудження, який працює в режимі генератора. Для навантаження генератора, у свою чергу, використовується набір ламп розжарювання. Перед під'єднанням навантаження до генератора, його збуджують при холостому ході до номінальної напруги. Для цього, при відключеному навантаженні генератора поступово зменшують опір резистора R (який перед включенням схеми встановлюється на максимальний опір) збуджуючи генератор до номінальної напруги. Якщо генератор не збуджується, необхідно змінити напрям струму в паралельній обмотці збудження (поміняти місцями її виводи Ш<sub>1</sub> та Ш<sub>2</sub>). Після чого можна навантажувати генератор, який, у свою чергу, навантажуватиме асинхронний електродвигун.

Результати дослідів і розрахунків записати в таблицю 8.2.

Таблиця 8.2

Робота споживача	Виміри				Розрахунки			Зауваження
	U <sub>л</sub>	I <sub>л</sub>	I <sub>д</sub>	P	S	cos φ	Q	
	B	A	A	Bт	ВА		ВАр	
при холостому ході								з конденсатором
								без конденсатора
при навантаженні								з конденсатором
								без конденсатора

7. При виключених конденсаторах зняти залежність  $\cos \varphi$  від навантаження. Результати дослідів записати в таблицю 8.3.

Таблиця 8.3.

№ з/п	В И М І Р И				Р О З Р А Х У Н К И		
	U <sub>л</sub>	I <sub>л</sub>	P	cos φ	S	Q	
	B	A	Bт		ВА	ВАр	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

6. Побудувати на одному малюнку графіки залежностей:  $\cos \varphi = f_1(P)$ ;  $Q = f_2(P)$ ;  $S = f_3(P)$ .

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. На що витрачається активна і реактивна енергії (потужності) електричного струму в електроспоживачах?
2. Що таке коефіцієнт потужності, чим і як він вимірюється?
3. Як можна поділити електроспоживачі залежно від  $\cos \varphi$  ?
4. До чого призводить зниження  $\cos \varphi$  електроспоживачів?
5. Що може бути причиною низького  $\cos \varphi$  електроспоживачів?
6. З якою метою підвищують коефіцієнт потужності електропристроїв?
7. Які існують методи підвищення  $\cos \varphi$  електроспоживачів?
8. Які існують методи компенсації реактивної енергії та які із них частіше застосовуються у сільському господарстві?
9. Які вигоди і які затрати несе господарство при підвищенні коефіцієнта потужності електропристроїв статичними конденсаторами?

### ПРОГРАМА ПОЗААУДИТОРНОЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Вид підготовки	Час, год
1	За рекомендованою літературою вивчити, що таке коефіцієнт потужності електроспоживачів і як він впливає на економічність їх роботи та роботу електрогосподарства в цілому?	2
2	Вивчити методи підвищення коефіцієнта потужності та компенсації реактивної потужності, які застосовуються у сільському господарстві та правила підбору компенсуючих пристроїв окремих електроспоживачів та електрогосподарства в цілому	2
3	Підготувати робочий зошит для виконання лабораторної роботи, у який записати: <ul style="list-style-type: none"> <li>- назву та мету роботи;</li> <li>- короткі теоретичні пояснення (конспективно) із необхідними для розрахунків формулами;</li> <li>- порядок проведення експерименту;</li> <li>- таблиці 8.1, 8.2, 8.3;</li> <li>- електричні схеми експериментів (мал. 8.1)</li> </ul>	1

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончар В. Ф., Тищенко Л. П. Електрообладнання тваринницьких підприємств і автоматизація виробничих процесів у тваринництві. - К.: Вища школа, 1986. – 352 с. - (С. 134 - 139).
2. Электрооборудование и автоматизация сельскохозяйственных агрегатов и установок/Под ред. И. Ф. Кудрявцева. – М.: Агропромиздат, 1988. – 480 с. (С. 81 - 83).
3. Назаров Г. И. и др. Электропривод и применение электрической энергии в сельском хозяйстве. - М.: Колос, 1972.
4. Трегуб А. П. Электротехника. - К.: Вища школа, 1987. – 600 с.
5. Мурзін В. К. Загальна електротехніка. – Полтава: “Кременчук”, 2001. – 323 с. – (С. 98 - 99).

Навчальне видання

Ярошенко Леонід Вікторович

Електрообладнання та засоби автоматизації сільськогосподарських машин. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів сільськогосподарських вищих навчальних закладів спеціальності: 6.091902 – “Механізація сільського господарства”: В 5 ч. – Вінниця: ОЦ ВДАУ, 2003. - Ч. 3.: Асинхронні двигуни. – 52 с.

Коректор Дунаєва І. В.

Підписано до друку \_\_\_\_\_

Умовн. друк. арк. \_\_\_\_\_ Формат А5 (148,5 x 210 мм).

Наклад 200 прим.

Зам. № \_\_\_\_\_

Обчислювальний центр  
Вінницького державного аграрного університету  
21008, Вінницький р-н, с. Агрономічне, вул. Сонячна, 3