

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Український державний морський технічний університет  
імені адмірала Макарова

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРИЧНИХ  
МАШИН**

Частина 2

**Електричні машини змінного струму**

Під редакцією А.А. Ставинського

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ

Миколаїв 2003

УДК 21.313.8: 621.313.33

**Кімстач О.Ю., Ставинський А.А., Чекунов В.К.** Методичні вказівки до лабораторних робіт з електричних машин: У 3 ч. – Ч. 2. Електричні машини змінного струму / Під ред. *А.А Ставинського*. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 36 с.

*Кафедра суднових електроенергетичних систем*

Здійснюється дослідження електричних машин змінного струму. Наведені основні аналітичні співвідношення та графіки, які допомагають вивчити електромагнітні процеси, що стосуються випробуваних машин. Подані методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з курсу "Електричні машини".

Призначено для студентів електротехнічного факультету УДМТУ.

*Рецензенти:*

д-р техн. наук, проф. Ю.Д. Жуков;

канд. техн. наук, доц. А.П. Гуров

© Український державний морський  
технічний університет, 2003

© Видавництво УДМТУ, 2003

## **ВСТУП**

До основних типів електричних машин змінного струму можна віднести синхронні та асинхронні машини.

Синхронні генератори широко застосовуються в електроенергетиці для вироблення електроенергії, асинхронні двигуни виконують роль приводних двигунів майже в усіх галузях промисловості та науки, тому вивчення цих машин є найважливішим етапом у процесі підготовки спеціалістів у сфері електричних систем та комплексів.

Правильне проектування електростанцій і систем електроприводу не можливе без розумних розробки та вибору основних і допоміжних електричних машин. Для цього потрібно повністю розуміти всі особливості електромагнітних процесів, які стосуються електричних машин змінного струму.

Методичні вказівки допомагають досконало вивчити зазначені типи електричних машин змінного струму.

## **ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ**

Для виконання лабораторних робіт студенти повинні пройти інструктаж із техніки безпеки.

Перед тим як приступити до складання схеми, студенти повинні ознайомитися з устаткуванням і записати паспортні дані електричних машин та апаратів. Перед складанням схеми необхідно переконатися, що всі автомати і рубильники на робочому місці вимкнені.

Студенти бригади повинні самостійно зібрати схему установки і подати її викладачу для перевірки. Вмикати установку можна тільки з дозволу викладача. Усі зміни в схемі, що пов'язані з приєднанням проводів, повинні робитися при відключеному живленні і нерухомих машинах. Робота під напругою допускається тільки з дозволу викладача із вжиттям відповідних заходів безпеки.

По закінченні роботи бригада подає викладачу для перевірки протокол дослідів. Схему можна розібрати з дозволу викладача. Якщо робота не буде виконана у встановлений розкладом термін, слід погодити з викладачем час додаткових занять. На чергове заняття кожний студент повинен подати звіт з попередньої роботи. Звіт оформляється студентом індивідуально. До одного зі звітів бригади додається протокол дослідів, підписаний викладачем.

Звіт слід оформляти окремо з кожної роботи або з усіх робіт в одному зошиті. Він повинен містити: паспортні дані електричних машин та апаратів; принципів схеми дослідів; дані дослідів і результати розрахунків у табличній формі з зазначенням одиниць вимірів; розрахункові формули і короткі пояснення отриманих результатів; висновки по роботі.

Звіт повинен бути оформлений акуратно. Усі схеми і криві слід будувати з застосуванням креслярських інструментів. Розрахункові й опорні точки на графіках треба чітко позначати. Криві проводити так, щоб розкид точок був рівномірним.

Координатні осі графіків слід градуювати від нульових значень. При побудові декількох графіків з одним аргументом для кожної величини проводиться своя вісь із відповідним градуюванням.

Елементи схем повинні зображуватися у відповідності до стандартів ЄСКД. Усі розрахунки виконуються в одиницях СІ. До кожної характеристики для однієї з точок повинен бути проведений

типовий розрахунок. При виконанні великого числа однотипних розрахунків рекомендується використовувати ЕОМ.

### Робота № 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

### 1. Обсяг роботи

1.1. Провести дослід холостого ходу двигуна.

1.2. Провести дослід короткого замикання.

1.3. Провести дослід навантаження двигуна.

1.4. За даними дослідження холостого ходу розрахувати і побудувати характеристики холостого ходу  $I_0 = f(U_0)$ ,  $P_0 = f(U_0)$  і  $\cos \varphi_0 = f(U_0)$ . Зробити поділ механічних утрат і втрат у сталі.

1.5. За даними дослідження короткого замикання розрахувати і побудувати характеристики короткого замикання  $I_k = f(U_k)$ ,  $P_k = f(U_k)$ ,  $\cos \varphi_{д0} = f(U_k)$ ,  $z_k = f(U_k)$ ,  $r_k = f(U_k)$ ,  $x_k = f(U_k)$ .

1.6. Визначити струм  $I_{к.н}$  і потужність  $P_{к.н}$  короткого замикання при номінальній напрузі.

1.7. За даними дослідження навантаження розрахувати і побудувати робочі характеристики двигуна  $n$  (або  $s$ ),  $P_1$ ,  $M_1$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta = f(P_2)$ .

1.8. За даними дослідження холостого ходу і короткого замикання побудувати кругову діаграму двигуна і визначити з неї номінальні величини:  $I_{ін}$ ,  $\cos \varphi_{ін}$ ,  $M_{\max} / M_{н}$ ,  $s_{н}$ ,  $\eta_{н}$ .

1.9. З кругової діаграми визначити робочі характеристики і порівняти їх з дослідними.

### 2. Вказівки до виконання роботи

Схема для випробувань асинхронного двигуна, виміри в якій робляться за допомогою вимірювального комплексу, наведена на рис. 1.1. Для плавної зміни напруги, що підводиться до двигуна, він підключається до мережі через автотрансформатор.

Навантаження двигуна здійснюється за допомогою зчленова-

ного з ним генератора постійного струму (ЕМП), що, у свою чергу, навантажується рідинним реостатом.

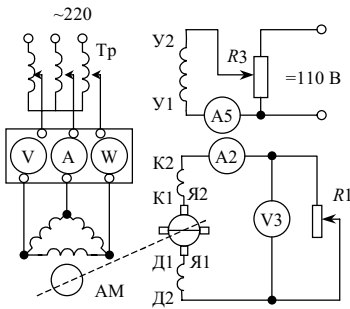


Рис. 1.1

Дані дослідів заносять у табл. 1.1, де  $U$  та  $I_1$  – середні за фазами напруга і струм двигуна;

Таблиця 1.1

$U$ , В	$I_1$ , А	$P$ , Вт	$n$ , об/хв	$U_{я}$ , В	$I_{я}$ , А	
					$i_2$	$i_3$

$n$  – частота обертання;  $P$  – потужність за всіма фазами.

2.2. Дослід короткого замикання. Режим короткого замикання асинхронного двигуна здійснюється при загальмованому роторі і підключеній до мережі обмотці статора.

При номінальній напрузі струм короткого замикання в чотири-вісім разів перевищує номінальний:  $I_k = (4...8)I_{н}$ . При цьому двигун перегрівається і може вийти з ладу. Тому в умовах навчальної лабораторії дослід короткого замикання проводиться при зниженій напрузі: загальмувавши механічним шляхом ротор двигуна, подають на його обмотки напругу, близьку до нуля, і підвищують до значень, при яких струм короткого замикання  $I_k < (1,5...2,5)I_{н}$ . При цьому напруга  $U_k < (0,3...0,4)U_{н}$ . Дані дослідів короткого замикання заносять у табл. 1.1.

2.3. Дослід навантаження двигуна. Дослід проводиться при номінальній напрузі на затискачах двигуна. Двигун запускають і навантажують за допомогою генератора постійного струму. Навантаження змінюють у межах від значень, що відповідають  $I_1 = (1,5...2,0)I_{н}$ , до холостого ходу. Дані заносять у табл. 1.1.

### 3. Обробка результатів дослідів

3.1. Характеристики холостого ходу двигуна. Потужність, що

споживається двигуном із мережі на холостому ходу  $P_{x.x}$ , витрачається на покриття електричних утрат в обмотках двигуна  $p_c = 3I_0^2 r_1$ , утрат у сталі  $p_{ст}$  і механічних утрат двигуна  $p_{мех}$  та генератора  $p_{мех.г}$ :

$$P_{x.x} = 3I_0^2 r_1 + p_{ст} + p_{мех} + p_{мех.г} = P_0 + p_{мех.г},$$

де  $P_0$  – потужність холостого ходу двигуна.

Для побудови характеристик холостого ходу двигуна і подальших розрахунків потрібно зробити поділ утрат, що виконується в такий спосіб: віднімаючи з потужності  $P_{x.x}$  величину електричних утрат  $3I_0^2 r_1$ , знаходять суму втрат  $\sum p_{ст.мех} = p_{ст} + p_{мех} + p_{мех.г}$  і будують графік її залежності від напруги  $U_0$ , а також від  $U_0^2$  (рис. 1.2). Оскільки  $p_{ст} \sim B^2 \sim U_0^2$ , то остання залежність являє собою практично пряму лінію. Екстраполюючи обидві криві до осі координат, знаходять суму механічних утрат  $p_{мех} + p_{мех.г}$ . Орієнтовно можна вважати, що втрати  $p_{мех.г}$  складають 60 % від загальних механічних утрат.

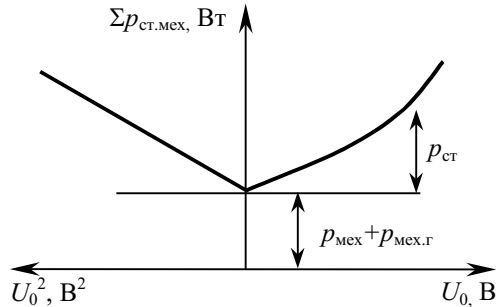


Рис. 1.2

Оскільки механічні втрати не залежать від напруги, то, використовуючи величину  $p_{мех.г}$ , розраховують значення  $P_0 = P_{x.x} - p_{мех.г}$  і будують характеристики холостого ходу двигуна  $I_0 = f(U_0)$ ,  $P_0 = f(U_0)$  і  $\cos \phi_0 = f(U_0)$ , де коефіцієнт потужності визначається за формулою

$$\cos \phi_0 = \frac{P_{x.x}}{\sqrt{3} \cdot U_0 I_0}.$$

3.2. Характеристика короткого замикання. За даними досліду короткого замикання будують залежності  $I_k = f(U_k)$ ,  $P_k = f(U_k)$ ,  $\cos \phi_k = f(U_k)$ , а також  $z_k = f(U_k)$ ,  $x_k = f(U_k)$ ,  $r_k = f(U_k)$ , де параметри короткого замикання розраховуються так само, як і для трансформаторів. Але для побудови кругової діаграми потрібні значення  $I_{к.н}$  і  $P_{к.н}$ , що відповідають номінальній напрузі. Їх визначають розрахунковим шляхом:

$$I_{к.н} = \frac{U_H - U'_к}{U_{к.м} - U'_к} I_{к.м}; \quad P_{к.н} = \left( \frac{U_H - U'_к}{U_{к.м} - U'_к} \right)^2 P_{к.м},$$

де  $U'_к$  – відрізок на осі абсцис, який відтинається дотичною до кривої  $I_к = f(U_к)$  у точці, що відповідає максимальному дослідному значенню  $U_{к.м}$ ;  $I_{к.м}$  і  $P_{к.м}$  – струм і потужність короткого замикання для цієї ж напруги (рис. 1.3).

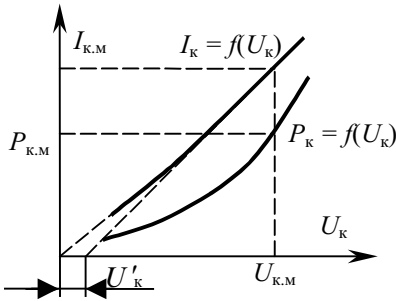


Рис. 1.3

3.3. Робочі характеристики двигуна. За даними досліду навантаження розраховують робочі характеристики двигуна  $s, P_1, M_2, I_1, \cos j, h = f(P_2)$ . Для цього визначають суму втрат у двигуні  $Sp = p_{e1} + p_{e2} + p_{ст} + p_{мех} + p_{дод}$  і корисної потужності на валу двигуна  $P_2 = P_1 - Sp$ , де  $P_1$  – потужність, споживана двигуном із мережі. Утрати  $p_{ст} + p_{мех}$  знаходять із побудови (див. рис.

1.2) для номінальної напруги. Електричні втрати в обмотках статора  $p_{e1} = 3I_{1ср}^2 r_1$ , а в обмотках ротора розраховуються за вимірною швидкістю або за ковзанням ( $s = (n_1 - n)/n_1$ ) та електромагнітною

потужністю  $p_{e2} = sP_{ем}$ , де  $P_{ем} = P_1 - (p_{ст} + p_{e1})$ .

Додаткові втрати  $p_{дод} = 0,005P_1$ .

ККД двигуна

$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_1}.$$

Момент на валу двигуна

$$M_2 = \frac{P_2}{2 \pi n},$$

де  $n$  – частота обертання, об/с.



Таблиця 1.2.

$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$\cos\varphi_1$	$p_{e1}$	$p_{e2}$	$p_{ст}$	$p_{мех}$	$p_{дод}$	$\Sigma p$	$P_2$	$\eta$ , %	$s$	$M$ , Н•м
			Вт									

Результати розрахунків заносять у табл. 1.2.

3.4. Кругова діаграма асинхронного двигуна будується для фазних напруг і струмів у такий спосіб (рис. 1.4):

проводяться координатні осі, вибирається масштаб струму  $m_i$  і визначається масштаб потужності

$$m_p = 3U_{ф.н} m_i,$$

де  $U_{ф.н}$  – номінальна фазна напруга;

у напрямку осі ординат відкладається відрізок, рівний  $P_0 - p_{мех}$  у масштабі потужності, і на цій відстані паралельно осі абсцис проводиться лінія  $OE$ . З початку координат  $O_1$  радіусом, рівним струму холостого ходу в масштабі струму (при  $U = U_{н}$ ), робиться зарубка на лінії  $OE$ . У такий спосіб утворюється точка  $O$  кругової діаграми, що відповідає  $s = 0$ ;

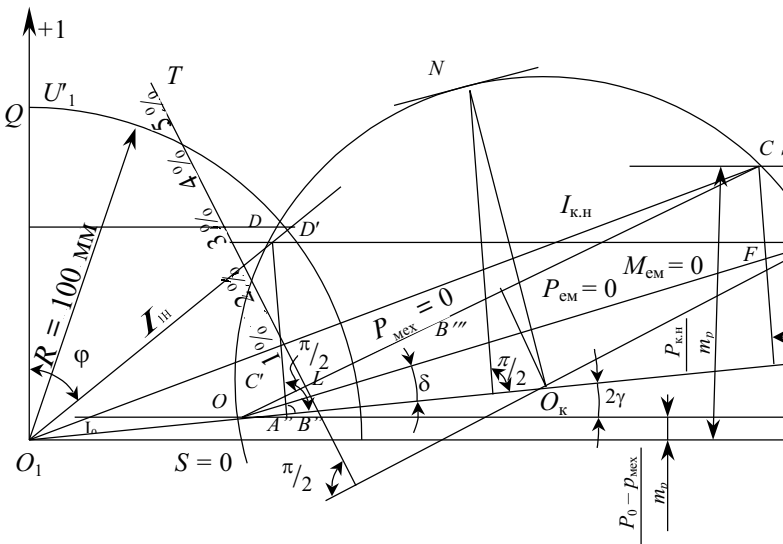


Рис. 1.4

під кутом  $2\gamma$  до лінії  $OE$  проводиться пряма  $OA$ , що визначає напрямок діаметра окружності струмів, причому  $\sin 2\gamma = 2I_0 r_1 / U_{\text{ф.н}}$ ;

паралельно осі абсцис на відстані, що дорівнює  $P_{\text{к.н}}$  у масштабі потужності, проводиться пряма і на ній робиться зарубка радіусом  $I_{\text{к.н}}$  у масштабі струму з точки  $O_1$ . У результаті цього визначається точка  $C$ , що відповідає  $s = 1$ , і лінія механічних потужностей  $OC$ ;

із середини  $OC$  проводиться перпендикуляр до перетину з прямою  $OA$  в точці  $O_{\text{к}}$ , що являє собою центр окружності струмів, і радіусом  $O_{\text{к}}O$  проводиться ця окружність, причому вона повинна пройти через точки  $O$  і  $C$ ;

будується лінія електромагнітних потужностей і моментів  $OB$ , яка повернена відносно прямої  $OA$  на кут

$$\delta = \arctg \frac{m_i D_{\text{к}} r_1}{U_{\text{ф.н}}},$$

де  $D_{\text{к}}$  – діаметр окружності струмів в одиницях довжини, визначений попередньою побудовою;

для визначення  $\cos \phi$  будується шкала, що являє собою відрізок  $O_1Q$  на осі ординат, рівний 1,00 умовних одиниць (100 мм), і проводиться дуга окружності радіусом  $O_1Q$  із центром на початку координат;

для побудови шкали ковзання з точки  $C$  опускається перпендикуляр на діаметр  $OA$ , що перетинає лінію  $OB$  у точці  $F$ . Уздовж прямої  $OB$  відкладається відрізок  $LB = CF/OF - 100$  см (або 50 см), і з точки  $L$  проводиться перпендикуляр  $LT$  до радіуса  $O_{\text{к}}B$  або його продовження. Лінія  $LT$  являє собою шкалу ковзання, точка  $L$  відповідає  $s = 0$ , а кожний 1 см (або 0,5 см) – 1 % ковзання.

3.5. Визначення характеристик двигуна з кругової діаграми. Насамперед із кругової діаграми визначаються номінальні дані двигуна. Для цього нагору від лінії механічної потужності перпендикулярно діаметру  $OA$  відкладається відрізок, рівний  $P_{2\text{н}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{дод}}$  у масштабі потужності, де  $P_{2\text{н}}$  – номінальна потужність двигуна на валу за паспортними даними;  $p_{\text{мех}}$  – механічні втрати, визначені з досліду холостого ходу побудовою на рис. 1.2;  $p_{\text{дод}}$  – додаткові втрати для номінального режиму, рівні  $0,01P_1 = 0,01P_{2\text{н}} / \eta_{\text{н}}$ , а  $\eta_{\text{н}}$  береться з паспортних даних.

Проводячи через кінець цього відрізка лінію, паралельну  $OC$ ,

до перетину з окружністю струмів, одержують точку  $D$ , що відповідає номінальному режиму.

Тоді вектор  $O_1D$  у масштабі струму даватиме номінальний струм  $I_{1н}$ .

Проекція відрізка, отриманого перетинанням цього вектора або його продовження з окружністю  $\cos\varphi_n$ , на вісь координат покаже величину  $\cos\varphi_n$  у відносних одиницях за шкалою  $O_1Q$ .

Для визначення максимального моменту з центра  $O_k$  проводиться перпендикуляр до хорди  $OB$  до перетину з окружністю в точці  $N$ , з якої опускається перпендикуляр на діаметр  $OA$ . Точкою перетину його з лінією моментів  $OB$  визначиться відрізок  $NB'''$ , що являє собою максимальний момент  $M_{max}$  у масштабі моментів

$$m_M = \frac{m_p}{2 n_1},$$

де  $n_1$  – синхронна частота обертання двигуна. Аналогічно відрізок  $DB''$  (перпендикулярний  $OA$ ) у тому ж масштабі даватиме номінальний момент  $M_n$ , а переважувальна здатність (або кратність максимального моменту)

$$k_{max} = \frac{M_{max}}{M_n} = \frac{NB'''}{DB''}.$$

Величина номінального ковзання визначиться відрізком  $LT$  шкали ковзання, що відтинається прямою, яка з'єднає точки  $D$  і  $B$ , або її продовженням.

ККД двигуна розраховується методом окремих утрат так само, як і за дослідними даними:

$$\eta_n = 1 - \frac{\sum p}{p_{2н} + \sum p},$$

де

$$\sum p = p_{c1} + p_{c2} + p_{mex} + p_{дод}.$$

При цьому використовується значення втрат  $p_{ct} + p_{mex}$ , що визначені з досліду холостого ходу, а  $p_{c1} = 3I_{1н}^2 r_1$  і  $p_{c2} = sP_{cm}$  розра-

ховуються за значенням струму, ковзання й електромагнітної потужності, що отримані з кругової діаграми, причому  $P_{\text{см}}$  виражається відрізком  $DB''$  у масштабі потужності.

Додаткові втрати  $p_{\text{дод}} = 0,01P_{\text{ін}}$ , де споживана потужність  $P_{\text{ін}}$  визначається в масштабі потужності відрізком  $D_e$  перпендикуляра, опущеного на вісь абсцис.

Визначення робочих характеристик для навантаження, відмінного від номінального, робиться аналогічно. Задаючись низкою значень  $P_2$  від  $0,25P_{2н}$  до  $1,25P_{2н}$  будують ці характеристики на тому ж графіку, що і дослідні.

### **Запитання для самоконтролю**

1. Чому при холостому ході двигуна можна нехтувати втратами в міді, а при короткому замиканні двигуна – втратами в сталі?
2. Які вихідні дані потрібні для побудови кругової діаграми?
3. Для чого будується кругова діаграма?

### *Робота № 2*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З ФАЗНИМ РОТОРОМ**

### **1. Обсяг роботи**

1.1. Провести випробування трифазного індукційного регулятора в режимі холостого ходу і побудувати векторну діаграму його роботи.

1.2. Провести дослід холостого ходу асинхронної машини (АМ) при нерухомому роторі.

1.3. Провести дослід холостого ходу АМ при обертанні ротора.

1.4. Провести дослід короткого замикання АМ.

1.5. Провести дослід навантаження АМ у режимі двигуна при зниженій напрузі у випадках: при замкнутій накоротко обмотці ротора; при введенні додаткових опорів в обмотку ротора.

1.6. Провести дослід навантаження АМ у генераторному режимі.

1.7. За даними дослідів холостого ходу зробити поділ утрат.

1.8. За даними дослідів п. 1.5 розрахувати і побудувати залежності обертового моменту і струму статора АМ від частоти обертання при зниженій напрузі, перерахувати їх до номінальної напруги і побудувати в тих же координатних осях.

1.9. Розрахувати і побудувати ті ж залежності за даними дослідів п. 1.6.

1.10. За даними дослідів холостого ходу і короткого замикання побудувати кругову діаграму АД, визначити з неї максимальний і пусковий моменти та порівняти їх з дослідними.

## 2. Вказівки до виконання роботи

Схема для дослідів АМ із фазним ротором та індукційним регулятором (ІР) наведена на рис. 2.1. Обмотка статора АМ живиться від мережі через ІР, вихідну напругу котрого можна плавно регулювати. У режимі двигуна навантаження здійснюється за допомогою генератора постійного струму, зчленованого з двигуном і працюючого на реостат (перемикач  $Q2$  у лівому положенні). У режимі генератора машина постійного струму використовується як привідний двигун ( $Q2$  у правому положенні).

2.1. Випробування індукційного регулятора проводиться в режимі холостого ходу, для чого кінці схеми, що йдуть до асинхронної машини, відключаються від затискачів  $C4, C5, C6$  індукційного регулятора і замість них на ці затискачі підключається вольтметр.

Вольтметр також включається на затискачі однієї з фазних обмоток статора індукційного регулятора, наприклад  $C1-C4$ .

Ротор індукційного регулятора встановлюється в положення, при якому на вихідних затискачах буде наймен-

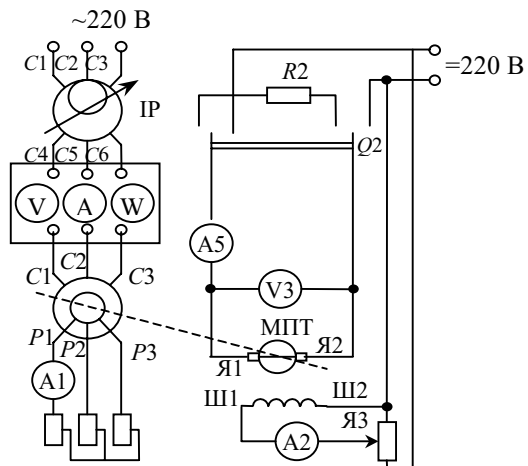


Рис. 2.1

ша напруга; це положення береться за нульове. Повертаючи ротор на визначений кут, записують значення кута  $\beta$  за лімбом і вихідної напруги  $U_2$ . Характеристику  $U_2 = f(\beta)$  знімають до максимально можливої напруги  $U_{2\max}$ . У ході проведення досліду необхідно переконатися, що величина фазної напруги статора, яка вимірюється вольтметром на затискачах С1–С4, не змінюється.

2.2. Дослід холостого ходу асинхронної машини при нерухомому роторі. До проведення досліду обмотку ротора розмикають і на її затискачі підключають вольтметр. На обмотку статора подають живлення від індукційного регулятора. При декількох значеннях напруги живлення, у тому числі і при номінальній напрузі, вимірюють напруги на статорній і роторній обмотках, струм  $I_0'$  та потужність  $P_0'$ , що споживається з мережі.

2.3. У досліді холостого ходу при обертовому роторі асинхронна машина запускається в режимі двигуна вхолосту при розімкненому колі якоря і відсутності збудження машини постійного струму. Знімають залежності струму холостого ходу  $I_0$  і потужності  $P_{x,x}$ , що споживаються двигуном із мережі, при зміні напруги від  $U_0 = 1,3U_n$  до мінімально можливої (порядку  $0,5U_n$ ), при якій двигун ще може стійко працювати.

Дані досліду  $I_0$ ,  $P_{x,x}$ ,  $U_0$  і частоту обертання (або ковзання) двигуна записують у таблицю, аналогічну табл. 1.1.

2.4. У досліді короткого замикання ротор асинхронної машини утримується від обертання механічним шляхом. До обмотки статора підводиться напруга  $U_k$ , і знімаються залежності струму  $I_k$  та потужності  $P_k$  від напруги  $U_k$  (п'ять-сім точок). Максимальне  $U_k$  установлюється таким, щоб струм короткого замикання  $I_k$  не перевищував  $(1,5...2,0)I_n$ .

Дані досліду записують у таблицю, аналогічну табл. 1.1. Відлік кожної точки слід робити швидко (протягом 10 с), щоб уникнути надмірного нагрівання обмотки. На час досліду пусковий реостат у колі ротора повинен бути вимкнений.

2.5. Досліди навантаження. Двигун запускають, як у п. 2.3, з замкнутою накоротко обмоткою ротора. Потім за допомогою індукційного регулятора напругу, що підводиться до його обмоток, знижують до значення  $0,5...0,6$  від номінальної і надалі підтримують незмінною.

Двигун навантажують за допомогою генератора постійного струму, збільшуючи навантаження останнього до максимально

можливої величини аж до короткого замикання на затискачах якоря. При цьому в силу вентиляторного характеру гальмівного моменту, створюваного генератором на валу двигуна, виявляється можливим одержати стійкі режими роботи на всій механічній характеристиці двигуна, включаючи її хиткий (розгінний) відрізок. Слід зняти сім-вісім точок характеристики, у тому числі поблизу критичного ковзання, записуючи показання приладів у таблиці вигляду табл. 1.1.

*Примітка:* при зниженні частоти обертання зняття даних потрібно робити швидко, тому що зростають струми в обмотках двигуна і викликають його перегрів.

Двигун запускають і при номінальній напрузі навантажують номінальною потужністю (тобто встановлюють  $I = I_n$ ). Потім вводять у коло ротора асинхронного двигуна такий додатковий опір, щоб частота обертання АД знизилася приблизно до значення 0,6...0,7 від номінальної. Після цього так само, як і в попередньому досліді, знижують напругу, що підводиться до двигуна, і змінюють його навантаження від мінімального до максимально можливого, записуючи дані в таблицю.

2.6. Для здійснення генераторного режиму асинхронної машини потрібно, щоб ротор машини обертася з більшою частотою, ніж частота обертання поля статора (синхронна частота обертання), що досягається шляхом підведення до вала машини механічної енергії з боку двигуна постійного струму. Потужність  $U_{\text{я}} I_{\text{я}}$ , яку споживає машина постійного струму, повинна бути більшою від потужності, що віддається в мережу змінного струму на величину втрат в обох машинах.

Дослід проводиться в такий спосіб: асинхронну машину запускають у режимі двигуна при відключеному вимикачі  $Q2$ . Коли агрегат досягне повної швидкості, перевіряють умови вмикання в мережу генератора постійного струму (умови паралельної роботи), тобто рівність напруг і відповідність полярностей: якщо на затискачі 1 плюс (+), то на 1' також повинен бути плюс (+); якщо на затискачі 2 мінус (-), то на 2' також має бути мінус (-). При їхньому виконанні вимикач  $Q2$  замикають у праве положення. Збільшення частоти обертання агрегату і навантаження асинхронної машини в режимі генератора роблять шляхом зменшення струму збудження машини постійного струму. Дослід проводять до

навантаження машини постійного струму, рівного приблизно половині номінального ( $U_{я} I_{я} \leq 0,5 U_{я.н} I_{я.н}$ ).

Дані дослідів заносять у таблицю, аналогічну табл. 1.1. Напряга на затискачах асинхронної машини повинна бути номінальною.

### 3. Обробка результатів дослідів

3.1. Для побудови векторної діаграми ІР відкладають по одній осі зі спільного початку відрізки  $OA = U_{2\min}$  і  $OB = U_{2\max}$  (в обраному масштабі напруг) і знаходять точку  $C$ , при цьому  $OC = (U_{2\min} + U_{2\max})/2$ . З точки  $C$  радіусом  $CB$  проводять окружність, що буде геометричним місцем кінця вектора напруги ІР, проведеного з точки  $O$ , який змінюється при зміні кута  $\beta_{ел}$ , що відраховується від лінії  $CO$  навколо точки  $C$ . Кут  $\beta_{ел}$  в електричних градусах пов'язаний із геометричним кутом, що визначається по лімбу ІР, співвідношенням

$$\beta_{ел} = p\beta,$$

де  $p$  – число пар полюсів ІР.

Задавшись будь-якими двома значеннями кута  $\beta$ , зафіксованими в протоколі дослідів, будують відповідні вектори  $U_2$  і порівнюють їх із дослідними значеннями (рис. 2.2).

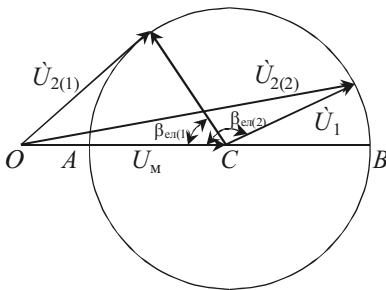


Рис. 2.2

3.2. За даними дослідів визначається коефіцієнт трансформації:

$$k_U = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}},$$

де  $U_{1\phi}$  і  $U_{2\phi}$  – фазні напруги первинної і вторинної обмоток.

Потужність, яку споживає асинхронний двигун із мережі в режимі холостого ходу при нерухомому роторі,

$$P'_{x.x} = p_{ел} + p_{ст} + p'_{ст},$$

де  $p_{ел} = 3I_0'^2 r_1$  – електричні втрати в обмотці статора;  $p_{ст}$  – втрати в сталі статора;  $p'_{ст}$  – втрати в сталі ротора.



Звідси

$$p'_{ст} = P'_{x,x} - 3I_0'^2 r_1 - p_{ст},$$

де  $p_{ст}$  визначають за даними досліду холостого ходу при обертовому роторі для відповідної напруги.

3.3. За даними досліду холостого ходу при обертовому роторі і короткому замиканні так само, як і в роботі № 1, роблять поділ механічних утрат і втрат у сталі та визначають струм і потужність короткого замикання при номінальній напрузі.

3.4. Обертальний момент двигуна визначають за потужністю на його валу, що віддається генератору:

$$M = \frac{P_2}{2 \pi n},$$

де  $n$  – частота обертання, об/с,

$$P_2 = U_{я} I_{я} + \Sigma p,$$

де  $U_{я} I_{я}$  – потужність, що віддається генератором у навантаження;  $\Sigma p$  – втрати в генераторі;

$$\Sigma p = p_e + p_0 + p_{дод},$$

де  $p_e = I_{я}^2 R_{я} + \Delta U_{ш} I_{я}$  – електричні втрати в колі якоря ( $\Delta U_{ш} \approx 2$  В);  $p_{дод} = 0,01 P_{г.н} (I_{я} / I_{я.н})^2$  – додаткові втрати;  $p_0$  – втрати холостого ходу, що задаються в залежності від частоти обертання.

Результати розрахунку зводять у табл. 2.1. За її даними будуть залежність  $I_1 = f(n)$  і механічну характеристику  $M_u = f(n)$ , що відповідають зниженій напрузі. Пусковий момент двигуна знаходять, екстраполюючи криву  $M_u = f(n)$  до осі моментів.

**Таблиця 2.1.**

$U_1$	$I_1$	$n$	$U_{я} I_{я}$	$p_e$	$p_0$	$p_{дод}$	$\Sigma p$	$P_2$	$M_u$
В	А	об/хв	Вт						Н

Після цього роблять перерахування значень моментів до номінальної напруги:

$$M = M_u \left( \frac{U_{1н}}{U_1} \right),$$

заносять їх у табл. 2.1 і будують природну механічну характеристику двигуна в тих же координатних осях.

3.5. Розрахунок і побудову механічних характеристик при зниженій та номінальній напрузі за наявності в колі ротора додаткового опору роблять у такому ж порядку, як і в попередньому пункті.

3.6. У генераторному режимі асинхронної машини момент на її валу створюється машиною постійного струму, що працює в режимі двигуна. Тому

$$M = \frac{P_1}{2\pi n},$$

де  $P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} - \Sigma p$  – потужність, що підводиться до вала двигуна; втрати в машині постійного струму визначаються так, як у п. 3.4.

Результати дослідів і розрахунків зводять у таблицю, аналогічну табл. 2.1, і будують залежності  $I_1 = f(n)$  і  $M = f(n)$  у тих же координатних осях, що і для режиму двигуна.

3.7. Кругову діаграму двигуна будують для номінальної напруги так само, як у роботі № 1. З діаграми знаходять максимальний  $M_{\text{max}}$  і пусковий  $M_{\text{п}}$  (при  $s = 1$ ) моменти та порівнюють їх із дослідними значеннями.

### **Запитання для самоконтролю**

1. Які переваги і недоліки асинхронної машини з фазним ротором у порівнянні з асинхронною машиною з к.з. ротором?
2. Як виглядає енергетична діаграма асинхронного двигуна?
3. Як визначити з кругової діаграми максимальну корисну потужність і максимальний момент?

### *Робота № 3*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

### **1. Обсяг роботи**

1.1. Увімкнути генератор на паралельну роботу з мережею. При номінальних потужності, напрузі, струмі якоря та cosφ визначити номінальний струм збудження.

1.2. Зняти і побудувати наступні характеристики: зовнішню; регульовальну; навантажувальну індуктивну; холостого ходу; сталого трифазного короткого замикання.

1.3. За зовнішньою характеристикою визначити номінальну зміну напруги генератора у відсотках при переході від номінального навантаження до холостого ходу і при  $i_3 = \text{const}$ :

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100 \%$$

1.4. За характеристиками холостого ходу, трифазного короткого замикання і навантажувальною індуктивною характеристикою, використовуючи діаграму ЕРС (Потьє), визначити номінальний струм збудження і номінальну зміну напруги генератора. Отримані величини порівняти з дослідними даними.

## 2. Вказівки до виконання роботи

Принципова схема установки наведена на рис. 3.1.

2.1. Вмикання генератора в мережу здійснюється методом точної синхронізації, що описаний в п. 2.1 лабораторної роботи № 4.

2.2. Навантаження генератора реактивним та активним струмом здійснюється в такий спосіб: генератор буде віддавати в мережу реактивну потужність, якщо збільшити його струм збудження при незмінній напрузі автотрансформатора або якщо зменшити напругу автотрансформатора при незмінному струмі збудження.

Щоб увімкнений у мережу генератор віддавав активну потужність, потрібно збільшити рушійний момент на його валу. Це можна зробити, зменшуючи струм збудження двигуна постійного струму. При цьому двигун буде працювати на механічній характеристиці з меншим магнітним потоком, а оскільки частота обертання агрегату визначається частотою мережі і не змінюється, то обертальний момент двигуна зросте (рис. 3.2).

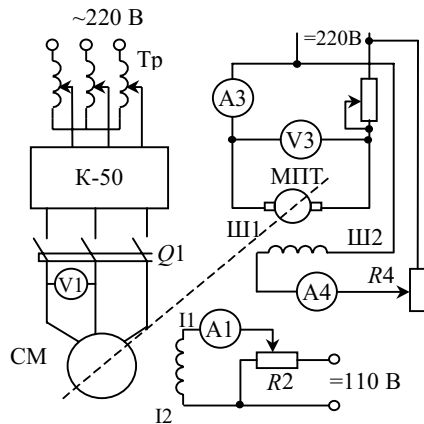


Рис. 3.1

2.3. Зовнішня характеристика  $U = f(I)$  при  $i_3 = i_{3,н} = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \cos \varphi_n = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ . Спочатку встановлюється точка номінального навантаження. Зменшуючи струм збудження двигуна постійного струму, змінюють струм збудження генератора і напругу автотрансформатора таким чином, щоб установився номінальний режим із параметрами  $P_{2н}$ ,  $U_n$ ,  $I_n$  і  $\cos \varphi_n$ . Струм збудження генератора в цьому режимі є номінальним  $i_{3,н}$ .

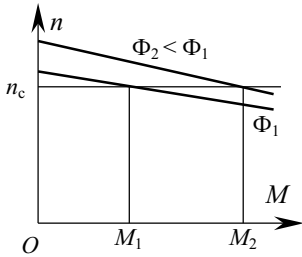


Рис. 3.2

Навантажують генератор активним і реактивним струмом так, щоб  $\cos \varphi = \cos \varphi_n = \text{const}$ , а струм статора змінювався в межах від  $I \approx 1,2I_n$  до  $I \approx 0$ .

Записуються струм  $I$  і напруга  $U$  генератора.

2.4. Регульовальна характеристика  $i_{3,н} = f(I)$  при  $U = U_n = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = \cos \varphi_n = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ . Точки характеристики встановлюються шляхом зміни струму збудження двигуна і генератора та напруги автотрансформатора. Струм статора змінюється в межах від  $I \approx 1,2I_n$  до  $I \approx 0$ . Записується струм статора  $I$  і струм збудження генератора  $i_3$ .

2.5. Навантажувальна характеристика  $U = f(i_3)$  при  $I = I_n = \text{const}$ ,  $\cos \varphi = 0$ ,  $f = \text{const}$ . Змінюючи струм збудження двигуна і напругу на його якорі за допомогою пускового реостата (при малих навантаженнях це припустимо), добиваються, щоб активна потужність, яка віддається генератором у мережу (показання ватметрів), була близька до нуля. Утрати енергії в агрегаті будуть покриватися потужністю, яка підводиться з боку двигуна постійного струму.

Змінюючи струм збудження, для кожного його значення знаходять напругу автотрансформатора, при якій струм статора дорівнює  $I_n$ . Дослід проводять при зміні напруги від  $U = 1,2U_n$  до мінімально можливої на генераторі. Записують струм збудження і відповідні значення напруги.

2.6. Характеристики холостого ходу  $U_0 = f(i_3)$  при  $I = 0$ ,  $n = n_n = \text{const}$ . Генератор відключають від мережі. Установлюють номінальну частоту обертання пн двигуна і під час проведення досліду підтримують її постійною. Струм збудження генератора

змінюється від значення, при котрому  $U_0 = 1,3U_n$  до  $i_3 = 0$ . Записують струм збудження і напругу генератора.

2.7. Характеристики сталого трифазного короткого замикання  $I_{к.з} = f(i_3)$  при  $U = 0, n = n_n = \text{const}$ . Автотрансформатор відключають від генератора, затискачі генератора замикаються накоротко. Струм збудження генератора дорівнює нулю. Запускається привідний двигун, і встановлюється номінальна частота обертання. На обмотку збудження генератора подається напруга, і встановлюється струм  $i_3 = i_{з\max}$ , що відповідає струму в трифазній обмотці  $1,2I_n$ . Потім струм збудження зменшують до  $i_3 = 0$ . Записують струми статора і збудження.

2.8. Визначення номінального струму збудження і номінальної зміни напруги генератора за допомогою діаграми ЕРС (Потьє). У спільних координатних осях будуються характеристики холостого ходу  $U_0 = f(i_3)$ , навантажувальна індуктивна (при  $\cos \varphi \approx 0$ )  $U = f(i_3)$  і характеристика трифазного сталого короткого замикання  $I_{к.з} = f(i_3)$  ( $U_0$  і  $U$  - фазні напруги). Від точки  $C$  (рис. 3.3), яка знаходиться на перетині характеристики  $U = f(i_3)$  і прямої  $U_n$ , уздовж прямої відкладається

відрізок  $AC = OG$ , рівний струму збудження, що відповідає номінальному струму якоря за характеристикою  $I_{к.з} = f(i_3)$ . Через точку  $A$  проводиться пряма  $AB$ , паралельна початковій прямолінійній частині характеристики холостого ходу, до перетину з характеристикою  $U_0 = f(i_3)$ . З точки  $B$  на відрізок  $AC$  опускається перпендикуляр

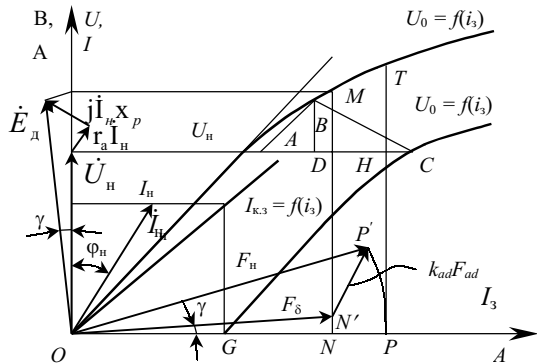


Рис. 3.3

$BD = I_n x_p$ ,

де  $x_p$  – індуктивний опір Потьє.

По осі ординат відкладається вектор фазної напруги  $U_n$ , під кутом  $\varphi_n$  до нього – вектор струму  $I_n$ . Вектор результуючої ЕРС

$$\dot{E} = \dot{U}_n + r_a \dot{I}_n + j \dot{I}_n x_p,$$

де  $r_a \dot{I}_H$  та  $j\dot{I}_H x_p$  – вектори активного й індуктивного спаду напруги в обмотці якоря, які побудовані в тому ж масштабі, що і вектор  $U_H$ .

За характеристикою  $U_0 = f(i_3)$  для  $E_\delta$  знаходимо н.с.  $F_\delta$  у масштабі струму збудження, що рівна відрізку  $ON$ . Пряму  $F_\delta$  повертаємо відносно осі абсцис на кут  $\gamma$ . Кут між вектором  $E_\delta$  і прямою  $ON'$  повинен бути  $90^\circ$ . З точки  $N'$  паралельно вектору струму  $\dot{I}_H$  відкладається відрізок  $N'P' = DC$ , який у масштабі струму збудження дорівнює н.с. подовжньої реакції якоря  $k_{ad} F_{ad}$ . Відрізок  $OP_1 = OP$  є н.с. збудження в номінальному режимі  $F_H$ , яка виражена в масштабі струму збудження. Таким чином, номінальний струм збудження  $i_{3.H} = OP$ . Для  $i_{3.H}$  за кривою  $U_0 = f(i_3)$  знаходиться  $U_0 = PT$ . Тоді номінальна зміна напруги генератора при зміні навантаження від номінальної до холостого ходу

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100 \% = \frac{PT - PH}{PH} \cdot 100 \%$$

### Запитання для самоконтролю

1. Як навантажити синхронний генератор, увімкнений в потужну мережу?
2. Які вихідні дані потрібні для побудови діаграми Потьє і для чого вона будується?

### Робота № 4

## ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З МЕРЕЖЕЮ

### 1. Обсяг роботи

1.1. Увімкнути генератор на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації.

1.2. Зняти і побудувати  $V$ -подібні характеристики генератора на холостому ходу і при половинному навантаженні:  $I = f(i_3)$  при  $U = \text{const}$  і  $P_2 = \text{const}$ .

1.3. Провести дослід навантаження синхронної машини: при

номінальному збудженні в режимах двигуна і генератора; при половинному збудженні в генераторному режимі до межі статичної стійкості; при відсутності збудження до межі статичної стійкості.

Побудувати залежності  $I = f(P_2)$  і  $\cos \varphi = f(P_2)$  при  $i_3 = \text{const}$ ,  $n = n_n = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ .

1.4. За даними досліду визначити синхронний індуктивний опір машини по подовжній осі  $x_d$  і синхронний індуктивний опір по поперечній осі  $x_q$ .

1.5. За даними досліду навантаження побудувати векторну діаграму для номінального режиму і визначити з неї ЕРС  $E$  та кут навантаження  $\delta$ .

1.6. Розрахувати і побудувати кутові характеристики генератора при номінальному та половинному збудженні; визначити статичну перевантаженість в обох випадках; порівняти розрахункову і дослідну величини максимальної потужності генератора, що відповідає межі статичної стійкості при половинному збудженні.

## 2. Вказівки до виконання роботи

Схема установки наведена на рис. 4.1.

2.1. Синхронізацію синхронного генератора і вмикання його на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації необхідно виконувати з дотриманням наступних умов: чергування фаз генератора і мережі повинно бути однаковим; частоти генератора і мережі повинні бути однакові; напруга генератора повинна дорівнювати напрузі мережі; напруга генератора і напруга мережі відносно точок підключення повинні збігатися за фазою. При виконанні цих умов

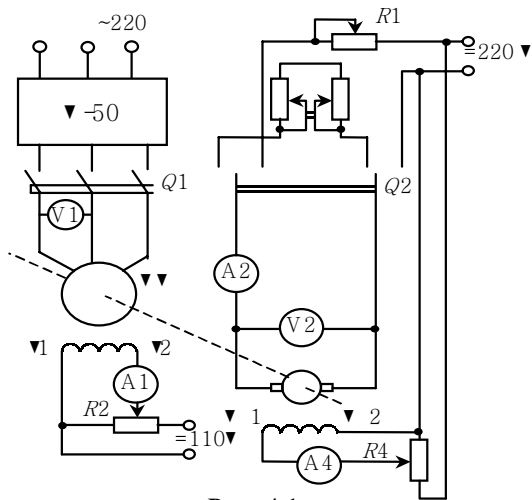


Рис. 4.1

підключення відбудеться без стрибка струму і механічного поштовху на валу.

Однаковість чергування фаз забезпечується правильним складанням схеми і контролюється за допомогою фазопоказчика або синхроскопа.

Частоти генератора і мережі контролюються частотомірами. Якщо частота генератора менша від частоти мережі, то після підключення до мережі синхронна машина буде працювати в режимі двигуна зі споживанням активної потужності з трифазної мережі.

Якщо частота генератора перед підключенням до мережі була більша від частоти мережі, то після підключення до мережі встановиться генераторний режим із віддачею активної потужності в мережу.

Якщо напруга генератора до підключення до мережі менша від напруги мережі, то після підключення він буде споживати з мережі реактивну потужність, якщо більша – віддавати її.

Момент підключення генератора до мережі, коли фази напруги генератора і мережі збігаються, вибирається за допомогою синхроскопа.

Навантаження генератора активним струмом здійснюється впливом на привідний двигун постійного струму, реактивним – зміною струму збудження генератора.

2.2.  $V$ -подібні характеристики генератора:  $I = f(i_3)$  при  $U = \text{const}$  і  $P_2 = \text{const}$ . При точному виконанні умов синхронізації після підключення генератора до мережі струм статора генератора залишається рівним нулю. Струм збудження при цьому позначимо  $i_3$ . При відхиленні струму збудження від значення  $i_{30}$  з'явиться реактивний струм. При зміні струму збудження від  $i_3 = 0$  до  $i_3 = i_{3\text{max}}$ , при якому струм статора  $I$  не перевищує  $(1,2\dots 1,5)I_{\text{н}}$ , знімаються обидві гілки (при  $i_3 < i_{30}$  та  $i_3 > i_{30}$ )  $V$ -подібної характеристики й обов'язково точка, у котрій  $I \approx 0$ .

Для зняття  $V$ -подібної характеристики при половинній потужності необхідно навантажити генератор активною потужністю  $P_2 = 0,5P_{2\text{н}}$ . Це досягається збільшенням обертового моменту на валу, для чого зменшують струм збудження генератора постійного струму. Потім, змінюючи струм збудження генератора і підтримуючи постійність потужності  $P_2$ , знімають  $V$ -подібну характеристику при половинній потужності. При цьому струм якоря не повинен



перевищувати  $(1,2\dots1,4)I$ . Потрібно зняти обидві гілки характеристики й обов'язково точку, у котрої  $I = I_{\min}$  (при цьому  $\cos \varphi = 1$ ).

2.3. Дослід навантаження синхронної машини. Установлюють номінальний режим генератора, при котрому  $U = U_n$ ,  $P_2 = P_{2n}$ ,  $I = I_n$  і  $\cos \varphi = \cos \varphi_n$ . Струм збудження, що відповідає цьому режиму, також буде номінальним  $i_{3n}$ . Потім при постійному струмі збудження змінюють навантаження генератора в межах від  $P_2 \approx 0$  до  $P_2 = (1,2\dots1,3)P_{2n}$ . Знімають декілька точок, записуючи величини  $P_2$  та  $I$ , причому обов'язково фіксуються точки при  $I = I_n$  і для режиму, що відповідає межі статичної стійкості. Якщо струм статора перевищує  $(1,5\dots1,8)I_n$ , дослід треба провести при меншому струмі збудження генератора.

**При випаданні генератора із синхронізму його потрібно негайно відключити від мережі!**

Для переведення генератора в режим двигуна його спочатку слід розвантажити до холостого ходу ( $I \approx 0$ ). Потім перемикачем  $Q_2$  якор машини постійного струму відключається від мережі постійного струму і замикається на навантажувальний опір  $R_n$ . Опір повинен бути максимальним (у рідинного реостата ножі цілком підняті з води).

Далі, зменшуючи  $R_n$  і збільшуючи струм збудження машини постійного струму, навантажують синхронну машину доти, поки струм статора не досягне  $(1,1\dots1,2)I_n$ . Струм збудження синхронної машини не змінюється. Записуються показання ватметра й амперметра в статорному колі.

При половинному струмі збудження дослід проводять тільки в генераторному режимі.

Явнополюсний синхронний генератор може працювати без збудження, тобто  $i_3 = 0$ , за рахунок реактивного моменту. Дослід проводиться в наступному порядку. Генератор розвантажують до режиму холостого ходу  $P_2 = 0$ . Потім зменшують струм збудження до нуля і навантажують генератор активною потужністю за допомогою плавного зменшення струму збудження двигуна. При підвищенні межі статичної стійкості генератор випадає із синхронізму і його слід швидко відключити. Слід зафіксувати потужність  $P_2 = P_{2m0}$ , що відповідає межі статичної стійкості.

Якщо струм якоря в досліді перевищує  $(1,5\dots1,8)I_n$ , необхідно провести дослід при зниженій напрузі  $U = (0,8\dots0,9)U_n$ , для чого

генератор потрібно підключити до мережі через індукційний регулятор напруги.

2.4. Визначення синхронних індуктивних опорів можна здійснити наступним шляхом. На холостому ходу генератора при  $n = n_n$  устанавлюється струм збудження, при якому ЕРС генератора дещо менша від напруги мережі (на 10...15 В),  $E < U_m$ . Виконуючи інші умови точної синхронізації, генератор вмикають у мережу. При цьому встановлюється режим роботи генератора з власне реактивним (що відстає від напруги) струмом статора. Рівняння ЕРС генератора в цьому режимі має вигляд

$$\dot{U}_m = \dot{E} + j\dot{I}x_d.$$

Вимірявши сталий струм  $I$  і знаючи різницю напруг генератора та мережі  $\Delta U = |E - U_m|$ , знайдемо синхронний індуктивний опір по подовжній осі

$$x_d = \frac{\Delta U}{I}.$$

Слід обчислити декілька значень  $x_d$ , що відповідають різним струмам збудження, у тому числі для  $E < U_m$  і  $E > U_m$ , а потім знайти середнє.

*Визначення синхронного опору* генератора по поперечній осі  $x_q$ . Максимальна потужність не збудженого явнополюсного синхронного генератора, що відповідає межі статичної стійкості, визначається за формулою

$$P_{2m0} = \frac{mU_m^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = \frac{3U_m^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right),$$

оскільки при  $P_2 = P_{2m0}$  кут  $\theta = 45^\circ$  і  $\sin 2\theta = 1$ ;  $m$  – число фаз генератора,  $m = 3$ .

Тоді індуктивний опір по поперечній осі

$$x_q = \frac{1}{1 + \frac{2P_{2m0}x_d}{3U_m^2}}.$$

2.5. Векторна діаграма ЕРС генератора будується в такий спосіб. Від початку координат (точка  $O$ ) у визначеному масштабі відкладається вектор напруги  $\dot{U}$  і під кутом  $\varphi$  до нього вектор струму  $\dot{I}$ . До кінця вектора  $\dot{U}$  паралельно вектору струму прибудовується вектор спаду напруги  $\dot{I}r_a$ , де  $r_a$  – активний опір фази обмотки статора (дається в паспортних даних або визначається дослідним шляхом). Утворюється точка  $A$  (рис. 4.2). Від кінця вектора  $\dot{I}r_a$  перпендикулярно йому відкладається вектор  $j\dot{I}x_q$ , кінець якого визначає положення точки  $Q$ . Через точки  $O$  і  $Q$  проходить напрямок вектора ЕРС генератора  $\dot{E}$ , тому кут між лінією  $OQ$  і вектором струму  $\dot{I}$  є кут  $\psi = \varphi + \theta$ , а кут між лінією  $OQ$  та вектором напруги  $\dot{U}$  – це кут навантаження  $\theta$ . Проекція вектора струму  $\dot{I}$  на лінію  $OQ$  являє собою поперечну складову струму  $\dot{I}_q$ , а перпендикулярна їй – подовжню складову струму  $\dot{I}_d$  ( $I_d = I \sin \psi$ ;  $I_q = I \cos \psi$ ). Проводячи з точки  $A$  перпендикуляр  $AB$  на лінію  $OQ$ , одержуємо вектор  $j\dot{I}_q x_q$ . Тепер від точки  $B$  уздовж лінії  $OQ$  відкладається вектор  $j\dot{I}_d x_d$ , кінець якого в точці  $D$  визначає вектор ЕРС генератора  $\dot{E} = OD$ . За побудованою векторною діаграмою для номінального режиму слід установити числові значення ЕРС  $E$  і кута навантаження  $\theta$ .

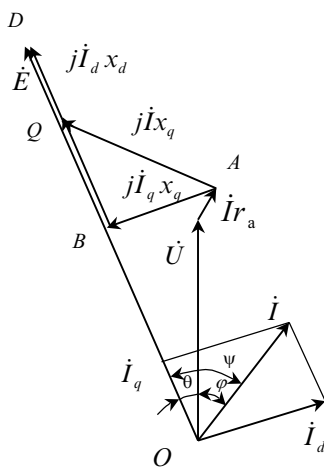


Рис. 4.2

2.6. Кутіві характеристики синхронного генератора являють собою залежності  $P_2 = f(\theta)$  при  $U = \text{const}$  та  $i_3 = \text{const}$ . Вигляд характеристики визначається формулою

$$P_2 = \frac{3EU}{x_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Підставляючи у формулу відомі значення  $U$ ,  $E$ ,  $x_d$  і  $x_q$ , розраховують кутіві характеристики для номінальної ЕРС (номінальне збудження) і для половинної ЕРС (половинне збудження). Результати розрахунку подаються у вигляді таблиць і графіків. За графіками визначають кути навантаження  $\theta_n$  при номінальній по-

тужності  $P_{2н}$  та  $i_3 = i_{3.н}$  і  $\theta_{0,5}$  при  $P_{2н}$  та  $i_3 = 0,5i_{3.н}$ , а також максимальні потужності при цих струмах збудження  $P_{2н}$  і  $P_{2,0,5}$ .

Значення  $P_{2,0,5}$  порівняти з дослідним.

Статична перевантаженість синхронного генератора визначається відношенням максимальної потужності при заданому струмі збудження до номінальної потужності:

$$k_n = \frac{P_2}{P_{2н}}.$$

### **Запитання для самоконтролю**

1. Які є умови вмикання генератора на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації?
2. Як переміститься  $V$ -подібна характеристика, знята при зниженій напрузі мережі?
3. Який приблизно повинен бути кут навантаження  $\theta$  у номінальному режимі, якщо статична перевантаженість дорівнює двом?

### *Робота № 5*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА**

### **1. Обсяг роботи**

1.1. Зробити асинхронний пуск двигуна. Замірити пусковий струм. Вивчити явище "одноосьового вмикання".

1.2. Зняти  $V$ -подібні характеристики двигуна на холостому ходу і при половинному навантаженні.

1.3. Зняти робочі характеристики двигуна при номінальному струмі збудження.

1.4. Провести дослід холостого ходу навантажувального генератора постійного струму в режимі двигуна.

1.5. Виконати розрахунки і побудувати характеристики.

### **2. Вказівки до виконання роботи**

Схема дослідів наведена на рис. 5.1.

2.1. Асинхронний пуск синхронного двигуна – основний метод пуску. Він робиться аналогічно пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Двигун запускається від повної напруги мережі на холостому ходу, тобто при розімкненому колі якоря машини постійного струму. На час пуску амперметр, призначений для виміру робочих струмів, і вторинні обмотки трансформаторів струму повинні бути зашунтовані.

Для можливості пуску в полюсних наконечниках індуктора синхронного двигуна встановлюється пускова обмотка, що виконується по типу короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна. Під час пуску обмотка збудження не має живлення постійним струмом, і, щоб уникнути значних напруг, які в ній можуть індукуватися і викликати пробій ізоляції, вона замикається коротко або на розрядний опір.

Основний асинхронний момент утворюється внаслідок взаємодії обертового поля якоря і струмів у пусковій обмотці, які індукуються цим полем. Крім того, створюється момент за рахунок взаємодії поля якоря зі струмом в обмотці збудження. У промислових типах синхронних двигунів цей момент невеликий у порівнянні з першим моментом.

У лабораторній установці використовується синхронна машина, призначена для роботи в режимі генератора, і тому вона не має пускової обмотки. Однак її асинхронний пуск без навантаження можливий за рахунок асинхронного моменту, створюваного взаємодією поля статора зі струмом в обмотці збудження, який індукуються цим полем. При такому пуску різко виражене явище так званого одноосевого вмикання, яке виявляється в тому, що крива моменту в залежності від ковзання має різкий провал при частоті обертання ротора, рівній половині синхронної (рис. 5.2).

Під час пуску по обмотці збудження протікає струм частоти  $f_2 = sf_1$ , який створює пульсуюче магнітне поле по осі обмотки збудження. Останнє можна розкласти на дві складові з однакови-

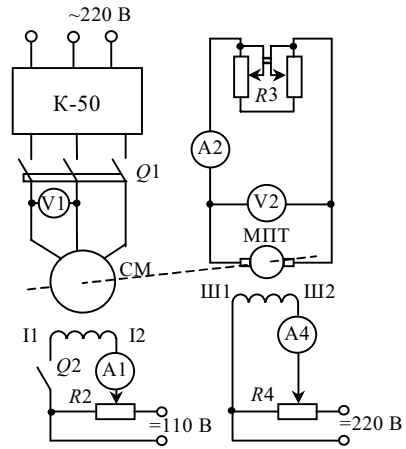


Рис. 5.1

ми амплітудами н.с., які дорівнюють половині н.с. пульсуючого поля. Ці складові обертаються відносно ротора з рівними швидкостями, але в протилежні сторони. Пряма складова утворить асинхронний момент, що змінюється по кривій *I*, зворотна – по кривій *II*.

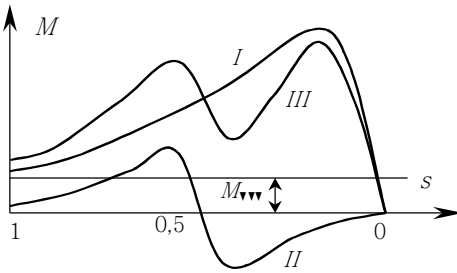


Рис. 5.2

Результуючий момент є їхньою сумою – крива *III*. Співвідношення між моментами  $M_I$  і  $M_{II}$  та результуючий момент  $M_{III}$  залежать від опору кола ротора  $R_3$ , що в нашому випадку повинен бути 140...120 Ом. При меншому опорі момент  $M_{II}$  різко виражений, крива результуючого моменту має глибокий провал і машина застряє на половині синхронної частоти обертання.

Коли ротор розганяється до підсинхронної частоти обертання ( $n = 0,95n_c$ ), в обмотку збудження подається постійний струм і двигун втягується до синхронізму. Момент подачі збудження звичайно визначається за допомогою реле ковзання. У даному випадку для цієї цілі використовується реле часу, котушка якого одержує живлення одночасно із вмиканням якорної обмотки в мережу. Реле часу спрацьовує з витримкою часу дещо більшою, ніж час, необхідний для розгону двигуна до підсинхронної частоти обертання. При цьому контакти реле часу в колі котушки контактора замикаються, контактор спрацьовує і подає напругу на обмотку збудження.

Для виявлення одноосового вмикання в коло збудження двигуна включається резистор  $R_3 = 50...70$  Ом і двигун пускається повторно; швидко замірюється стає значення частоти обертання, що повинно бути  $0,5 n_c$ , після чого двигун відразу відключається від мережі. Щоб постійний струм у цьому досліді не був поданий в обмотку збудження, коло котушки реле часу повинно бути розімкненим.

2.2. *V*-подібні характеристики  $I = f(i_3)$  при  $U_m = \text{const}$ ,  $P_2 = \text{const}$ ,  $f = \text{const}$ . При незмінній напрузі мережі струм у трифазній обмотці (якорі)  $I$  залежить від навантаження на валу  $P_2$  і від струму збудження  $i_3$ . Активна складова струму якоря залежить від навантаження, реактивна – від струму збудження.

При деякому струмі збудження  $i_{30}$  реактивна складова струму якоря дорівнює нулю. Двигун працює з  $\cos\phi = 1$ . Якщо  $i_3 < i_{30}$ , то магнітне поле збудження мале (недозбудження) і для підтримки результуючого магнітного потоку, що відповідає даній напрузі мережі, двигун споживає реактивну потужність із мережі, працюючи з відстаючим  $\cos\phi$ . Якщо  $i_3 > i_{30}$  (перезбудження), двигун віддає реактивну потужність у мережу, працюючи з  $\cos\phi$ , що випереджає.

Можливість регулювання  $\cos\phi$  є серйозною перевагою синхронного двигуна перед асинхронним.

Для зняття характеристики  $I = f(i_3)$  у режимі холостого ходу коло якоря навантажувального генератора розмикається і його струм збудження зменшується до нуля. У цьому випадку навантаження на валу синхронного двигуна  $P_2 = P_{\text{мех.г}}$ , тобто дорівнює механічним утратам генератора постійного струму. Змінюючи струм збудження від  $i_3 \approx 0$  до  $i_3 = i_{3\text{max}}$ , при яких струм якоря  $I \leq 1,2I_{\text{н}}$ , знімають обидві гілки характеристики й обов'язково точку, у котрій  $I = I_{\text{min}}$ .

Для зняття характеристики  $I = f(i_3)$  при навантаженні генератор постійного струму включається на реостат і збуджується. Установлюється навантаження  $P_1 = 0,5P_{1\text{н}}$ , де  $P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}} / \eta_{\text{н}}$ ;  $P_{2\text{н}}$  і  $\eta_{\text{н}}$  – номінальні потужності на валу і ККД двигуна за паспортними даними. Струми якоря  $I_{\text{г}}$  і збудження  $i_{3\text{г}}$  генератора постійного струму під час досліду не повинні змінюватися. Цим забезпечується постійність електромагнітного моменту генератора ( $M = C_M I_{\text{г}} \Phi$ ), а оскільки частота обертання агрегату постійна, то і потужність на валу постійна. Струм збудження змінюється від  $i_3 = i_{3\text{max}}$  до  $i_3 = i_{3\text{min}}$ , при яких струм якоря  $I$  не повинен перевищувати  $(1,2 \dots 1,3)I_{\text{н}}$ . Знімаються обидві гілки характеристики й обов'язково точка, у котрій  $I = I_{\text{min}}$ .

2.3. Робочі характеристики  $P_1, I, M, \eta, \cos\phi = f(P_2)$  при  $U_{\text{м}} = \text{sconst}$  та  $i_3 = \text{const}$ .

Величини  $P_1$  та  $I$  визначаються за показаннями приладів безпосередньо, а  $\cos\phi, P_2, M$  і  $\eta$  розраховуються.

Двигун навантажується так, щоб при напрузі мережі  $U_{\text{н}}$  споживана потужність  $P_1 = P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}} / \eta_{\text{н}}$ . Змінюючи струм збудження двигуна  $i_3$ , установлюють номінальний струм якоря  $I_{\text{н}}$ . Отримане при цьому значення  $i_{3\text{н}}$  є номінальним і в процесі виконання досліду не змінюється. Характеристики знімаються при зміні наванта-

ження на двигун від  $P_1 = (1,2\dots1,3)P_{1н}$  до холостого ходу. Дані досліду і результати розрахунку заносяться в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Виміряні								Розраховані			
Синхронний двигун				Генератор							
$U_m,$ В	$I,$ А	$P_1,$ Вт	$i_s,$ А	$U_r,$ В	$I_r,$ А	$i_{3,r},$ А	$\cos\phi$	$P_2,$ Вт	$M,$ Н·м	$\eta$	

2.4. Дослід холостого ходу навантажувальної машини проводиться для визначення втрат у сталі і механічних утрат з тим, щоб можна було розрахувати корисну потужність  $P_2$  на валу синхронної машини. Схему для синхронного двигуна слід розібрати. Машину постійного струму підключити за схемою, показаною на рис. 5.3.

У коло якоря включається додатковий опір (у даному випадку використаний рідинний реостат). Цей опір дозволяє зменшувати напругу на якорі. Для одержання максимальної напруги додатковий опір шунтується вимикачем. Оскільки струм холостого ходу невеликий, то амперметр у колі якоря повинен бути розрахований на струм 30...40 % від номінального струму машини. При пуску машини і зміні частоти обертання потрібно стежити, щоб стрілка амперметра не виходила за межі шкали. Для цього пуск слід здійснити при максимальному додатковому опорі, а регулювання здійснювати плавно.

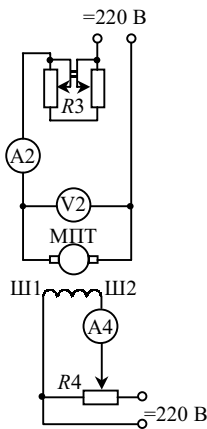


Рис. 5.3

Напруга на якорі і струм збудження змінюються так, щоб у всіх точках  $n = n_c$ . Знімаються п'ять-сім точок при зміні напруги від номінальної  $U_{rн}$  до  $U_r = 0,5U_{rн}$ . Записуються напруги  $U_r$ , струм якоря  $I_r$  і струм збудження  $i_{3,r}$  машини постійного струму.

2.5. Побудова характеристик передбачає наступні розрахунково-графічні роботи:

побудову в спільних координатних осях  $V$ -подібних характеристик двигуна, що зняті на холостому ходу і при половинному навантаженні;

розрахунок і побудову робочих характеристик синхронного



двигуна, тобто залежностей  $P_1, I, M, \eta, \cos \phi_2 = f(P_2)$ . У ході розрахунків побудувати характеристику залежності втрат холостого ходу від напруги на якорі для машини постійного струму;

коротке пояснення всіх характеристик.

За даними дослідів холостого ходу потрібно побудувати залежність  $P = f(U_0)$ , де  $P = U_0 I_{r0}$  – потужність, споживана машиною постійного струму на холостому ходу. Ця потужність іде на покриття втрат у сталі і механічних утрат в обох машинах:

$$U_0 I_{r0} = P_{\text{ст. г}} + P_{\text{мех. г}} + P_{\text{мех.}}$$

Оскільки механічні втрати не залежать від напруги, а в сталі залежать, їх можна розділити. Для цього зручно побудувати залежність  $U_0 I_{r0} = f(U_0^2)$ , що практично є прямою лінією, і продовжити її до перетину з віссю координат. При цьому відрізок осі ординат від початку координат до точки перетину визначить суму механічних утрат у машинах агрегату.

Механічні втрати машини постійного струму можна вважати рівними половині загальних механічних утрат.

Потужність на валу синхронного двигуна

$$P_2 = U_{\Gamma} I_{\Gamma} + I_{\Gamma}^2 R_{\Gamma} + 2I_{\Gamma} + P_{\text{ст.г}} + P_{\text{мех.г}} + P_{\text{дод.г}},$$

де  $U_{\Gamma} I_{\Gamma}$  – потужність на затискачах генератора постійного струму, що визначена з дослідів за показаннями вольтметра й амперметра;  $I_{\Gamma}^2 R_{\Gamma}$  – втрати в колі якоря машини постійного струму;  $R_{\Gamma}$  – загальний опір кола якоря;  $2I_{\Gamma}$  – втрати в щітковому контакті машини постійного струму (спад напруги в контакті беруть рівним 2 В);  $P_{\text{ст.г}}$  і  $P_{\text{мех.г}}$  – втрати в сталі і механічні, які отримуються з дослідів холостого ходу машини постійного струму;  $P_{\text{дод.г}} = 0,01 U_{\Gamma} I_{\Gamma}$  – додаткові втрати в машині постійного струму.

Утрати в сталі залежать від ЕРС генератора. При струмі навантаження  $I_{\Gamma}$  ЕРС  $E_{\Gamma} = (U_{\Gamma} + I_{\Gamma} R_{\Gamma} + 2)$  В. Знаючи струм  $I_{\Gamma}$  і напругу  $U_{\Gamma}$ , знаходимо ЕРС  $E_{\Gamma}$  і по кривій  $U_0 I_{r0} = f(U_0)$  визначаємо для  $U_0 = E_{\Gamma}$  відповідні втрати в сталі.

Момент на валу синхронного двигуна

$$M = \frac{P_2}{2\pi n},$$

де  $n$  – синхронна частота обертання, об/с.

ККД синхронного двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Коефіцієнт потужності синхронного двигуна

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{m_1 U_M I_1}.$$

### Запитання для самоконтролю

1. Як відбувається асинхронний пуск синхронного двигуна?
2. Що відбудеться в разі передчасної подачі збудження при асинхронному пуску?
3. Як за  $V$ -подібною характеристикою побудувати залежність коефіцієнта потужності від струму збудження?

### РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. *Жерве Г.К.* Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергия, 1984. – 248 с.
3. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
4. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
5. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. – Л.: Энергия, 1972. – Ч. 2. – 544 с.
6. *Яцун М.А.* Електричні машини: Навч. посібник. – Л.: Вид-во Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 427 с.

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
Вимоги до виконання лабораторних робіт та оформлення звітів .....	4
<i>Робота № 1</i> Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором .....	5
<i>Робота № 2</i> Дослідження трифазної асинхронної машини з фазним ротором .....	12
<i>Робота № 3</i> Характеристики трифазного синхронного генератора .....	18
<i>Робота № 4</i> Паралельна робота синхронного генератора з мережею .....	22
<i>Робота № 5</i> Характеристики трифазного синхронного двигуна .....	28
Рекомендована література .....	34

Олег Юрійович КІМСТАЧ  
Андрій Андрійович СТАВИНСЬКИЙ  
Володимир Костянтинівич ЧЕКУНОВ

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

Частина 2

**Електричні машини змінного струму**

Під редакцією А.А. Ставинського

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор М.Д. Белікчі  
Комп'ютерна правка Ю.В. Зайцева  
Комп'ютерна верстка Н. В. Чудновцева  
Коректор Н.О. Шайкіна

---

Підписано до друку 27.04.01. Формат 60×84/16. Папір офсетний.

Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 2,5. Тираж 200 прим.

Вид. № 15. Зам. № 376. Ціна договірна.