

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
ЗМІННОГО СТРУМУ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з електричних машин**

У трьох частинах

Частина 2

Рекомендовано Методичною радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2020

УДК 21.313.8: 621.313.33

Е45

Автори:

О. А. Авдєєва, кандидат технічних наук, доцент кафедри СЕЕС;
С. Ю. Александровський, старший викладач кафедри СЕЕС;
С. І. Бандура, старший викладач кафедри СЕЕС;
С. М. Новогрецький, кандидат технічних наук, доцент кафедри СЕЕС;
В. І. Костюченко, кандидат технічних наук

Рецензент

Д. О. Жук, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електричні машини змінного струму : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з електричних машин : у 3 ч. Ч. 2 / О. А. Авдєєва, С. Ю. Александровський, І. С. Бандура, С. М. Новогрецький, В. І. Костюченко. – Миколаїв : НУК, 2020. – 54 с.

Досліджуються режими роботи синхронних генераторів, асинхронних та синхронних двигунів. Наведені основні аналітичні співвідношення та надані методичні вказівки щодо побудови характеристик і визначення параметрів електричних машин змінного струму, які пояснюють та характеризують їх основні властивості.

Призначено для студентів Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки НУК при вивченні дисципліни "Електричні машини".

УДК 21.313.8: 621.313.33

© Авдєєва О. А., Александровський С. Ю.,
Бандура І. С., Новогрецький С. М.,
Костюченко В. І., 2020

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2020

ВСТУП

Змінний струм є найбільш поширеним джерелом живлення електромеханічних пристроїв, тому вивчення машин змінного струму є найважливішим етапом у процесі підготовки бакалаврів за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

До основних типів електричних машин змінного струму, які користуються найбільшою популярністю в промисловості, можна віднести синхронні та асинхронні машини. Синхронні генератори широко застосовуються в електроенергетиці для виробництва електроенергії, а асинхронні двигуни виконують роль приводних двигунів у різноманітних автоматизованих механізмах і переважають над двигунами постійного струму за техніко-економічними, енергетичними та масогабаритними показниками.

Методичні вказівки дають можливість вивчити роботу синхронних генераторів та асинхронних двигунів у різних режимах, а також отримати досконалі знання про електромагнітні процеси, які протікають у зазначених вище перетворювачах енергії.

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

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 відключені.

Студенти бригади повинні самостійно зібрати схему установки і пред'явити її викладачу для перевірки. Включати установку можна тільки з дозволу викладача. Всі зміни в схемі, що зв'язані з приєднанням проводів, повинні робитися при відключеному живленні і нерухомих машинах. Робота під напругою допускається тільки з дозволу викладача з застосуванням відповідних заходів безпеки.

Після закінчення роботи бригада пред'являє викладачу для перевірки протокол дослідів. Схему можна розібрати після дозволу викладача. Якщо робота не буде виконана у встановлений розкладом термін, слід погодити з викладачем час додаткових занять. На чергове заняття кожний студент повинен надати звіт по попередній роботі. Звіт оформляється кожним студентом індивідуально. До одного зі звітів бригади прикладається протокол дослідів, підписаний викладачем.

Звіт слід оформляти окремо по кожній роботі. Він має містити: обсяг роботи; паспортні дані електричних машин; принципи електричних схем з'єднань лабораторного устаткування для проведення досліджень; експериментальні дані, отримані в ході лабораторних експериментів, і результати розрахунків у табличній формі із зазначенням одиниць вимірювання; графіки розрахункових та експериментальних

залежностей; розрахункові формули і короткі пояснення отриманих результатів; висновки по роботі.

Звіт має бути оформлений акуратно. Принципові електричні схеми у звіті повинні відповідати вимогам МЕК щодо їх графічного виконання. Розрахункові й опорні точки на графіках експериментальних та теоретичних залежностей слід чітко позначати. Криві проводити поміж розрахунковими точками так, щоб відстань до них була мінімальна, а характер кривих відповідав теорії електричних машин. При побудові декількох графіків з одним аргументом для кожного проводиться своя вісь ординат з відповідним градуюванням.

Всі розрахунки повинні виконуватися в одиницях виміру СІ. По кожній характеристиці для однієї з точок має бути наведений типовий розрахунок. При виконанні великого числа однотипних розрахунків рекомендується використовувати ЕОМ.

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 дослідів холостого ходу розрахувати і побудувати характеристики холостого ходу $I_0, P_{1.0}, \cos\varphi_0 = f(U_0)$. Визначити розрахункові значення $I_{0н}, P_{1.0н}, \cos\varphi_{0н}$, а також параметри z_0, x_0, r_0 для номінальної напруги $U_0 = U_n$. Зробити поділ механічних втрат і втрат у сталі.

1.5. За даними дослідів короткого замикання розрахувати і побудувати характеристики короткого замикання $I_k, P_{1к}, \cos\varphi_k = f(U_k)$. Визначити розрахункові значення $U_{к.н}, P_{1к.н}, \cos\varphi_{к.н}$, а також параметри z_k, x_k, r_k для номінального навантаження $I_k = I_{1н}$.

Розрахувати струм $I_{к.н}$ і потужність $P_{к.н}$ короткого замикання при номінальній напрузі $U_k = U_n$.

1.6. За даними дослідів навантаження розрахувати і побудувати робочі характеристики двигуна n (або s), $I_1, P_1, M_2, \cos\varphi, \eta = f(P_2)$.

1.7. Визначити параметри схеми заміщення двигуна. Розрахувати і побудувати робочі характеристики двигуна за схемою заміщення. Порівняти їх з робочими характеристиками, отриманими в п. 1.6.

1.8. Оформити звіт по роботі.

2. Вказівки до виконання роботи

Схема для випробувань асинхронного двигуна MA , вимірювання в якій здійснюються за допомогою вимірюваль-

ного комплексу ВК, наведена на рис. 1.1. Для плавної зміни напруги, що підводиться до двигуна, він підключається до мережі через автотрансформатор *TV1*.

Гальмівний момент на валу двигуна створюється жорстко з'єднаним з ним генератором постійного струму *MDC*, який, у свою чергу, навантажується рідинним реостатом *R1*.

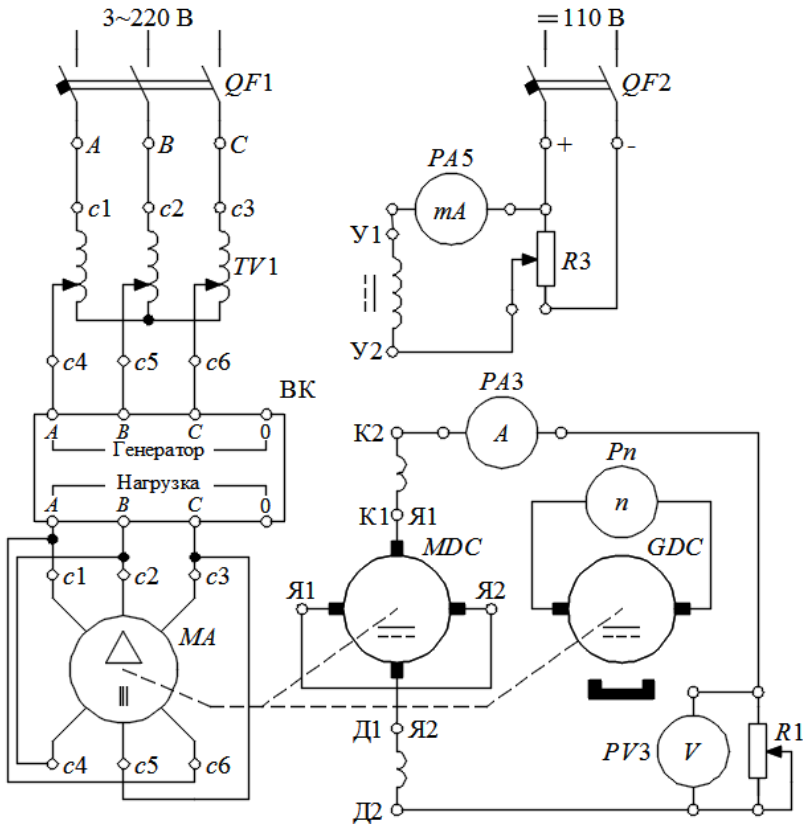


Рис.1.1

2.1. Дослід холостого ходу проводиться при відсутності гальмівного моменту на валу двигуна MA , для чого розмикається коло якоря і відключається збудження генератора постійного струму MDC . Запустивши двигун, змінюють напругу, що підводиться до нього, від максимальної для даного трансформатора $TV1$ (але не більше $1,3U_n$ двигуна MA) до мінімально можливої, при якій двигун MA ще працює стійко (приблизно $0,5 U_n$).

Дані дослідів заносять у табл. 1.1, де $U = U_0$ та $I_1 = I_0$ – середні за фазами напруга і струм двигуна в режимі холостого ходу; n – частота обертання; P_1 – сумарна потужність за всіма фазами.

Таблиця 1.1

№	U	I_1	P_1	n_2	U_a	I_a	i_3
	В	А	Вт	об/хв	В	А	

2.2. Дослід короткого замикання. Режим короткого замикання асинхронного двигуна здійснюється при загальмованому роторі та підключеній до мережі обмотці статора MA . При номінальній напрузі струм короткого замикання в чотири-вісім разів перевищує номінальний: $I_k = (4 \dots 8) I_n$. 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 $I_k < (1,5 \dots 2,5) I_n$. При цьому напруга $U_k = (0,3 \dots 0,4) U_n$. Дані дослідів короткого замикання заносять у табл. 1.1, в якій $I_1 = I_k$ є середнім за фазами струмом статора двигуна.

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

3. Обробка результатів випробувань

Оскільки обмотки двигуна з'єднані в трикутник, при проведенні розрахунків їх опір слід привести до опору еквівалентної зірки

$$r_1 = r_A = \frac{r_{AB} \cdot r_{CA}}{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}} = \frac{r_{\phi}}{3},$$

де r_{ϕ} – фазний опір обмотки статора відповідно до каталожних даних.

3.1. Характеристики холостого ходу двигуна. Потужність, що споживається із мережі змінного струму у режимі холостого ходу P_{xx} , витрачається на покриття електричних втрат в обмотках двигуна $p_{e0} = 3I_0^2 r_1$, втрат у сталі $p_{ст}$ і механічних втрат двигуна $p_{мех.д}$ та генератора $p_{мех.г}$:

$$P_{xx} = p_{e0} + p_{ст} + p_{мех.д} + p_{мех.г} = P_{1,0} + p_{мех.г},$$

де $P_{1,0}$ – потужність, що споживається двигуном у режимі холостого ходу.

Для побудови характеристик холостого ходу двигуна і подальших розрахунків потрібно зробити поділ втрат, що виконується наступним чином: віднімаючи з потужності P_{xx} величину електричних втрат p_{e0} , знаходять суму втрат $\Sigma p_{ст.мех} = p_{ст} + p_{мех.д} + p_{мех.г}$ і будують графік її залежності від напруги U_0 , а також від U_0^2 (рис.1.2). Оскільки $p_{ст} \cong B^2 \equiv U_0^2$, то залежність $p_{ст}$ від U_0^2 має вигляд практично прямої лінії.

Екстраполюючи обидві криві до осі ординат, знаходять суму $P_{\text{мех.д}} + P_{\text{мех.г}}$. Орієнтовно можна вважати, що втрати $P_{\text{мех.г}}$ складають 60 % від загальних механічних втрат.

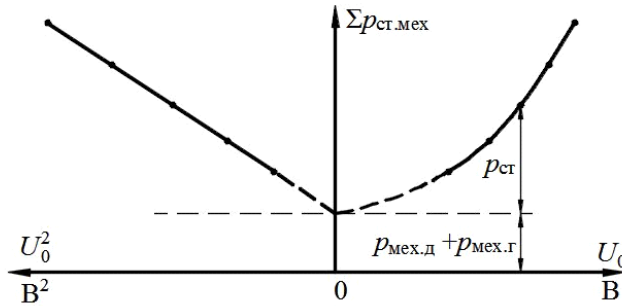


Рис. 1.2

Оскільки механічні втрати не залежать від напруги, то, використовуючи величину $P_{\text{мех.г}}$, розраховують значення $P_{1.0} = P_{\text{xx}} - P_{\text{мех.г}}$, і будують характеристики холостого ходу двигуна I_0 , $P_{1.0}$, $\cos\varphi_0 = f(U_0)$ (рис.1.3), обчислюючи $\cos\varphi_0$ за формулою

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{\text{xx}}}{3U_0I_0},$$

де U_0 та I_0 – фазні напруга і струм холостого ходу двигуна.

Значення $\cos\varphi_0$ зі збільшенням напруги, що підводиться, зменшується. Це пояснюється тим, що з ростом насичення сталі значно зростає реактивна складова струму холостого ходу.

3.2. Характеристика короткого замикання. За даними дослідів короткого замикання будують залежності I_k , P_{1k} , $\cos\varphi_k = f(U_k)$. Залежність $I_k = f(U_k)$ дещо відхиляється від прямолінійної внаслідок того, що опір x_k не залишається постійним, а зменшується через насичення зубцевої зони поля-

ми розсіювання. З цієї ж причини залежність $\cos \varphi_{\kappa} = f(U_{\kappa})$ дещо зростає. Коефіцієнт потужності розраховують за формулою

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{1\kappa}}{3U_{\kappa}I_{\kappa}},$$

де U_{κ} та I_{κ} – фазні напруга і струм двигуна в режимі короткого замикання.

Потужність, що споживається в досліді короткого замикання, йде в основному на покриття електричних втрат в обмотках, тому залежність $P_{1\kappa} = f(U_{\kappa})$ близька до параболічної (рис. 1.4). З отриманих графіків визначаються розрахункові значення $U_{\kappa,н}$, $P_{1\kappa,н}$, $\cos \varphi_{\kappa,н}$ для номінального навантаження $I_{\kappa,н} = I_{н}$.

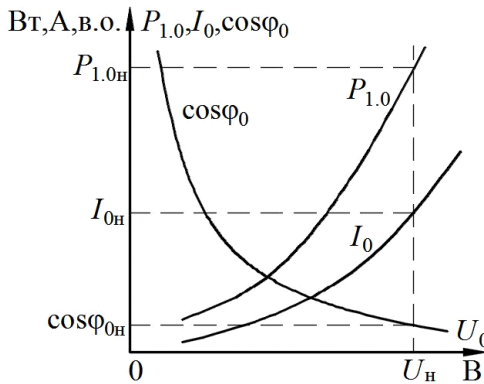


Рис. 1.3

Струм $I'_{\kappa,н}$ і потужність $P'_{\kappa,н}$ короткого замикання при номінальній напрузі $U = U_{н}$ визначають розрахунковим шляхом:

$$I'_{\kappa,н} = I_{\kappa,м} \frac{U_{н} - \Delta U_{\kappa}}{U_{\kappa,м} - \Delta U_{\kappa}}; \quad P'_{\kappa,н} = P_{\kappa,м} \left(\frac{U_{н} - \Delta U_{\kappa}}{U_{\kappa,м} - \Delta U_{\kappa}} \right)^2,$$

де ΔU_K – відрізок на осі абсцис, який відтинається дотичною до кривої $I_K = f(U_K)$ у точці, що відповідає максимальному дослідному значенню $U_{K.M}$; $I_{K.M}$ і $P_{K.M}$ – струм і потужність короткого замикання, які відповідають значенню напруги $U_{K.M}$ (рис. 1.4).

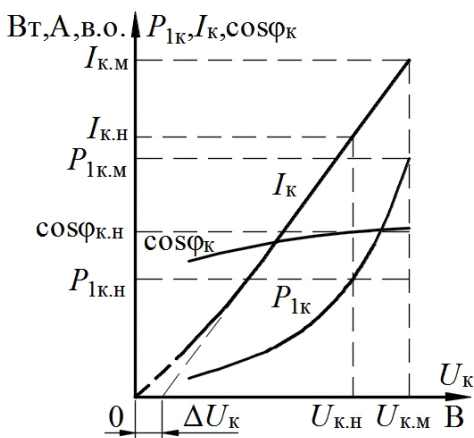


Рис. 1.4

3.3. Робочі характеристики двигуна. За даними дослідів навантаження розраховують робочі характеристики двигуна n (або s), I_1 , P_1 , M_2 , $\cos \phi$, $\eta = f(P_2)$ (рис.1.5). Для цього визначають суму втрат у двигуні

$$\Sigma p = p_{e1} + p_{e2} + p_{ст} + p_{мех} + p_{дод},$$

де $p_{e1} = 3I_1^2 r_1$ – електричні втрати в обмотках статора;
 $p_{e2} = sP_{ем} = s(P_1 - p_{ст} - p_{e1})$ – електричні втрати в обмотках ротора; $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ – ковзання; $n_1 = \frac{60f}{p}$ – синхронна частота обертання двигуна; p – число пар полюсів обмотки ста-

тора; $p_{\text{ст}} + p_{\text{мех}}$ – знаходять із побудови (див. рис. 1.2) для номінальної напруги; $p_{\text{дод}} = 0,005P_1$ – додаткові втрати.

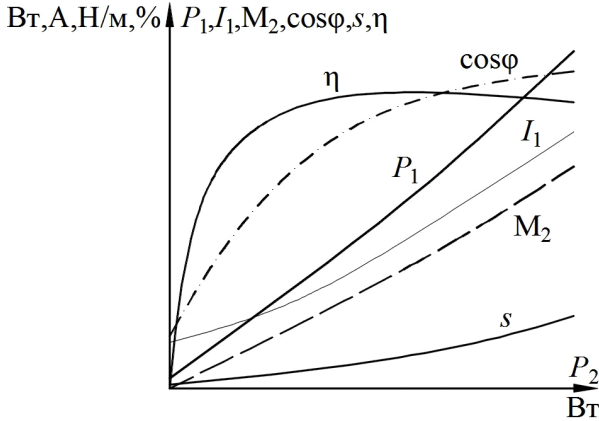


Рис.1.5

Тоді корисна потужність на валу двигуна $P_2 = P_1 - \Sigma p$.

$$\text{ККД двигуна } \eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}.$$

$$\text{Момент на валу двигуна } M_2 = \frac{60P_2}{2\pi n_2},$$

де n_2 – частота обертання, об/хв.

За отриманими робочими характеристиками для номінальної корисної потужності на валу $P_{2н}$ визначаємо всі номінальні дані асинхронного двигуна ($P_{1н}$, $I_{1н}$, $\cos\varphi_{н}$, $s_{н}$, $M_{2н}$, $\eta_{н}$).

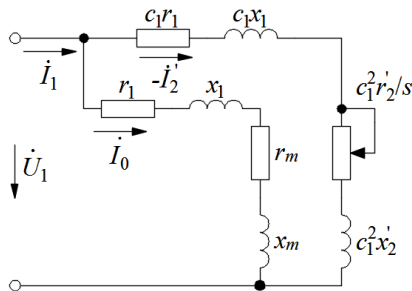


Рис. 1.6

3.4. Визначити параметри схеми заміщення двигуна. Для визначення робочих характеристик розрахунковим шляхом або для розрахунку робочої точки більш доцільно Т-подібну схему заміщення перетворити на Г-подібну (рис. 1.6). Комплексний коефіцієнт, що з'явився в результаті цього перетворення $\dot{c}_1 = c_1 e^{j\gamma}$, має модуль 1,05...1,02 і кут γ , який по абсолютній величині менше 2° . Тому для двигунів потужністю більше 1 кВт його можна з достатньою точністю визначити по формулі:

$$c_1 = 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_m + jx_m} \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}.$$

Параметри схеми заміщення визначаються із дослідів холостого ходу та короткого замикання. За даними дослідів холостого ходу для номінальної напруги U_n визначаються параметри гілки намагнічування схеми заміщення

$$z_0 = \frac{U_{0\phi}}{I_{0\phi}}, \quad r_0 = \frac{P_{xx} - P_{\text{мех}}}{3I_{0\phi}^2}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

За даними дослідів короткого замикання визначаються

$$z_k = \frac{U_{\text{кф}}}{I_{\text{кф}}}, \quad r_k = \frac{P_{\text{к}}}{3I_{\text{кф}}^2}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Параметри схеми заміщення, що представлена на рис.1.6, визначають за такими виразами:

$$r'_2 = r_k - r_1; \quad x'_2 = x_1 = \frac{1}{2} x_k;$$

$$r_m = r_0 - r_1; \quad x_m = x_0 - x_1.$$

Для розрахунку робочих характеристик MA за схемою заміщення задається мінімум 5–6 відносних значень корисної потужності $P_{2*} = P_2 / P_{2н}$ від 0 до 1,2. Для кожного із цих значень розраховуються параметри двигуна за наступними формулами:

$$P_2 = P_{2*} P_{2н}; \quad P_{\text{дод}} = 0,005 \frac{P_2}{\eta_{\text{н}}}; \quad P_2' = P_2 + P_{\text{дод}} + P_{\text{мех.д}};$$

$$A_s = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{P_2'} + r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2; \quad B_s = 2c_1 r_1 r_2' - \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{P_2'};$$

$$s = \left(-B_s - \sqrt{B_s^2 - 4A_s(c_1 r_2')^2} \right) / (2A_s);$$

$$\dot{Z}_p = (c_1 r_1 + c_1^2 r_2' / s) + j(c_1 x_1 + c_1^2 x_2');$$

$$\dot{Z}_{\text{екв}} = \frac{(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_m) \dot{Z}_p}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_m + \dot{Z}_p} = r_{\text{екв}} + jx_{\text{екв}} = z_{\text{екв}} e^{j\varphi_1};$$

$$I_{1*} = \frac{U_1}{I_{1н} z_{\text{екв}}}; \quad \cos \varphi_1 = r_{\text{екв}} / z_{\text{екв}};$$

$$P_{1*} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 / P_{1н}; \quad \eta = P_2 / (P_{1н} P_{1*}); \quad n_{2*} = 1 - s;$$

$$M_* = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right] M_{\text{н}}}.$$

Значення $P_{1н}$ береться з паспортних даних *МА*; значення номінального ККД η_n слід взяти з робочих характеристик (див. п. 3.3); значення номінальної корисної потужності розраховується за формулою $P_{2н} = P_{1н} \eta_n$.

За результатами теоретичних розрахунків слід побудувати робочі характеристики і порівняти їх з характеристиками, отриманими в п. 3.3.

Зитання для самоконтролю

1. Чому в режимі холостого ходу двигуна можна знехтувати втратами в міді, а в режимі короткого замикання – втратами в сталі?

2. Що таке енергетична діаграма асинхронного двигуна? Чим вона відрізняється від енергетичної діаграми асинхронного генератора?

3. Що таке робочі характеристики двигуна? Чим пояснити, що при відсутності активної потужності на валу двигуна ($P_2 = 0$) струм статора $I_{1н}$ та коефіцієнт потужності $\cos\varphi_n$ відмінні від нуля?

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 у випадках: при замкненій 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 п. 1.2, п. 1.3 зробити поділ втрат.

1.8. За даними дослідів п. 1.5 розрахувати і побудувати графіки залежностей обертового моменту і струму статора АМ від частоти обертання.

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

2. Вказівки до виконання роботи

Схема для дослідів асинхронної машини із фазним ротором *МА2* та індукційного регулятора *МА1* наведена на рис. 2.1. Обмотка статора *МА2* живиться від мережі через *МА1*, вихідну напругу якого можна плавно регулювати. У режимі двигуна навантаження здійснюється за допомогою генератора

постійного струму *MDC*, який має жорстке механічне з'єднання з двигуном *MA2* і працює на реостат *R2* (перемикач *SA1* у лівому положенні). У режимі генератора машина постійного струму *MDC* використовується як привідний двигун (*SA1* у правому положенні).

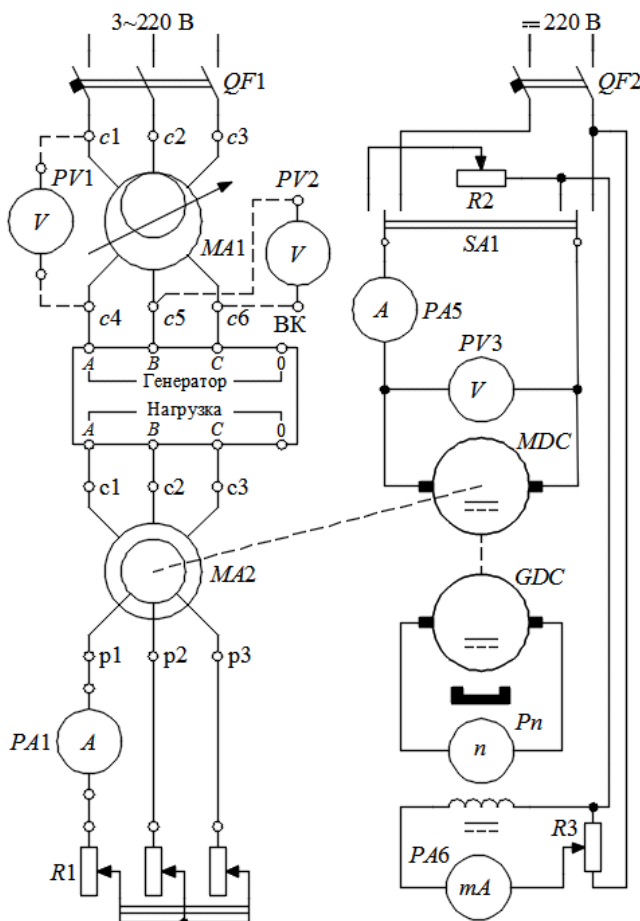


Рис. 2.1

2.1. Випробування індукційного регулятора *МА1* проводиться в режимі холостого ходу, для чого провідники, що йдуть до асинхронної машини *МА2*, відключаються від затискачів *с4, с5, с6* індукційного регулятора і замість них на ці затискачі підключається вольтметр. Вольтметр також включається на затискачі однієї з фазних обмоток статора індукційного регулятора, наприклад *с1 с4*. Ротор індукційного регулятора встановлюється в положення, при якому на вихідних затискачах буде найменша напруга; це положення береться за нульове. Повертаючи ротор на визначений кут, записують значення кута β за лімбом і вихідної напруги U_2 . Характеристику $U_2 = f(\beta)$ знімають до максимально можливої напруги $U_{2\max}$. У ході проведення дослідів необхідно переконатися, що величина фазної напруги статора, яка вимірюється вольтметром на затискачах *с1 с4*, не змінюється.

Таблиця 2.1. $U_\phi = \dots$

β	град	0	15	30	45	60	75	90
U_2	В							

2.2. Дослід холостого ходу асинхронної машини *МА2* при нерухомому роторі. До проведення дослідів обмотку ротора розмикають і на її затискачі підключають вольтметр. На обмотку статора подають живлення від індукційного регулятора *МА1*. При декількох значеннях напруги живлення, у тому числі і при номінальній напрузі, вимірюють напруги на статорній U_1' і роторній U_2' обмотках, струм I_0' та потужність P'_0 , що споживаються з мережі. Дані дослідів записують у таблицю 2.2.

2.3. У досліді холостого ходу при роторі, що обертається, 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_{xx} , що споживаються двигуном із мережі, при зміні напруги від $U_0 = 1,3U_H$ до мінімально можливої (порядка $0,3U_H$), при якій двигун ще може стійко працювати.

Дані дослідів I_0 , P_{xx} , U_0 і частоту обертання двигуна n_2 записують у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

№	U_1	U_2	I_1	I_2	P_1	n_2	$U_{я}$	$I_{я}$	i_3
	В		А		Вт	об/хв	В	А	

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 значення U_K встановлюється таким, щоб струм короткого замикання I_K не перевищував $(1,5 \dots 2,0) I_H$.

Дані дослідів записують у таблицю 2.2. Відлік кожної точки слід робити швидко (протягом 10 с), щоб уникнути надмірного нагрівання обмотки. На час дослідів пусковий реостат $R1$ повинен бути виключений із кола ротора, а обмотка ротора замкнена накоротко.

2.5. Дослід навантаження. Напруга, що підводиться до обмоток двигуна $MA2$, встановлюється рівною номінальній і надалі підтримується незмінною. Пусковий реостат $R1$ в ланцюзі ротора виводиться в нульове положення.

Двигун $MA2$ навантажують за допомогою генератора постійного струму MDC , збільшуючи навантаження реостатом $R2$ до $I_1 = I_{1H}$. Слід зняти 5...6 точок характеристики, записуючи показання приладів у таблицю 2.2.

Дослід навантаження при введенні додаткового опору в обмотку ротора проводиться в такому порядку: двигун за-

пускають і при номінальній напрузі навантажують номінальною потужністю (тобто встановлюють $I_1 = I_{1н}$). Потім вводять у коло ротора асинхронного двигуна такий додатковий опір $R1$, щоб частота обертання $MA2$ знизилась приблизно до значення $0,7 \dots 0,8$ від номінальної. Після цього так само, як і в попередньому досліді, змінюють навантаження двигуна від мінімального до максимально можливого, записуючи дані в таблицю 2.2.

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 валу машини механічної енергії з боку двигуна постійного струму. Потужність $U_{я} I_{я}$, яку споживає машина постійного струму MDC , 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 $SA1$. Коли агрегат досягне повної швидкості, перевіряють умови вмикання в мережу генератора постійного струму (умови паралельної роботи), тобто рівність напруг мережі і генератора постійного струму ($PV3$), а також відповідність полярностей. При їхньому виконанні вимикач $SA1$ замикають у праве положення (рис. 2.1.) Збільшення частоти обертання агрегата і навантаження асинхронної машини в режимі генератора виконують шляхом зменшення струму збудження машини постійного струму MDC . 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 2.2. Напруга на затискачах асинхронної машини повинна бути номінальною.

3. Обробка результатів випробувань

Оскільки обмотки двигуна з'єднані в трикутник, при проведенні розрахунків їх опір слід привести до опору еквівалентної зірки

$$r_1 = r_A = \frac{r_{AB} \cdot r_{CA}}{r_{AB} + r_{BC} + r_{CA}} = \frac{r_\phi}{3},$$

де r_ϕ – фазний опір обмотки статора у відповідності до каталожних даних.

3.1. Для побудови векторної діаграми індукційного регулятора *МА1* з обраної початкової точки *0* відкладають відрізок $OB = U_{2\max} / \sqrt{3}$ (в обраному масштабі напруг) і знаходять точку *C*, відкладаючи від точки *B* відрізок $BC = U_\phi$. З точки *C* радіусом *CB* проводять окружність, яка буде геометричним місцем кінця вектора напруги індукційного регулятора *МА1*, проведеного з точки *0*. Довжина вектора напруги змінюється при зміні кута β , що відраховується від лінії *0C* навколо точки *C*. Кут β в електричних градусах пов'язаний із геометричним кутом, що визначається по лімбу *МА1*, співвідношенням

$$\beta_{\text{ел}} = p\beta,$$

де p – число пар полюсів *МА1*.

Задавшись будь-якими двома значеннями кута β , зафіксованими в протоколі дослідів (таблиця 2.1), будують відповідні вектори U_2 і порівнюють їх із дослідними значеннями (рис. 2.2).

3.2. За даними випробувань АМ у режимі холостого ходу при нерухомому роторі п. 2.2 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.

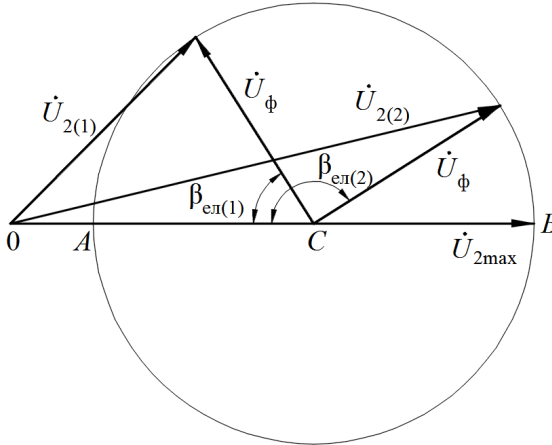


Рис. 2.2

3.3. За даними дослідження холостого ходу при роторі, що обертається, так само, як і в роботі № 1, виконують поділ механічних втрат і втрат у сталі статора $p_{ст1}$ (рис. 1.2) та визначають параметри гілки намагнічування схеми заміщення z_0 , r_0 , x_0 при номінальній напрузі U_n .

3.4. Втрати в сталі ротора $p_{ст2}$ визначають за даними дослідження холостого ходу при нерухомому роторі наступним чином.

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

$$P'_0 = p_{e1} + p_{ст1} + p_{ст2},$$

де $p_{e1} = 3I_0^2 r_1$ – електричні втрати в обмотці статора.

Звідси виділяють сумарні втрати в сталі статора і ротора і будують залежність цих втрат від квадрата напруги (пряма 2) у другому квадранті графіка рис. 1.2:

$$p_{\Sigma\text{ст}} = p_{\text{ст1}} + p_{\text{ст2}} = P_0' - p_{\text{ел}}.$$

В результаті втрати в сталі ротора будуть визначатися як різниця ординат точок прямих 2 і 1, що виходять з початку координат (рис. 2.3):

$$p_{\text{ст2}} = p_{\Sigma\text{ст}} - p_{\text{ст1}} = U_1'^2 (k_2 - k_1),$$

де

$$k_2 = \text{tg}\alpha_2 = p_{\Sigma\text{ст}} / U_1'^2,$$

$$k_1 = \text{tg}\alpha_1 = (p_{\Sigma\text{ст.мех}} - p_{\text{мех}}) / U_1'^2.$$

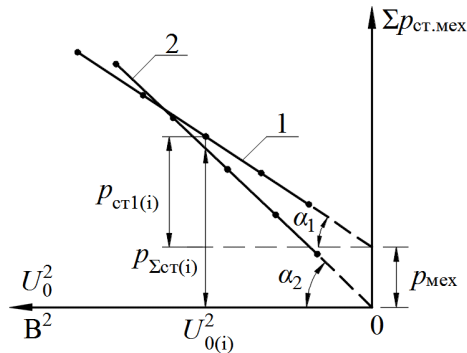


Рис. 2.3

3.5. За даними дослідження короткого замикання так само, як і в роботі № 1, визначають струм $I'_{\text{к.н}}$ і потужність $P'_{\text{к.н}}$ короткого замикання при номінальній напрузі, а також параметри схеми заміщення $z_{\text{к}}, r_{\text{к}}, x_{\text{к}}$.

3.6. Обертальний момент двигуна визначають за потужністю на його валу P_2 , що віддається генератору постійного струму MDC :

$$M_2 = \frac{30P_2}{\pi n_2},$$

де n_2 – частота обертання, об/хв;

$$P_2 = U_{я} I_{я} + \Sigma p;$$

де $U_{я} I_{я}$ – потужність, що віддається генератором MDC у навантаження; Σp – втрати в генераторі, які визначаються наступним чином:

$$\Sigma p = p_e + p_0 + p_{\text{дод}},$$

де $p_e = I_{я}^2 R_{я} + \Delta U_{\text{щ}} I_{я}$ – електричні втрати в колі якоря ($\Delta U_{\text{щ}} = 2\text{В}$); $p_0 = 0,08 P_{\text{н.мпс}}$ – втрати холостого ходу приймаються рівними 8 % номінальної потужності генератора постійного струму MDC ; $p_{\text{дод}} = 0,01 P_{\text{н.мпс}} (I_{я} / I_{я.н})^2$ – додаткові втрати.

Результати розрахунку зводять у табл. 2.3. За її даними будують механічну характеристику $M_2 = f(n_2)$.

Також будують залежність $I_1 = f(n_2)$ за даними табл. 2.2.

Таблиця 2.3

№	$U_{я} I_{я}$	p_e	p_0	$p_{\text{дод}}$	Σp	P_2	n_2	M_2
	Вт						об/хв	Нм

3.7. Розрахунок і побудова механічних характеристик для випадку введення в ланцюг ротора додаткового опору виконується в такому ж порядку, як і в попередньому пункті.

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

$$M_2 = \frac{30P_1}{\pi n_2},$$

де $P_1 = U_{\text{я}} I_{\text{я}} - \Sigma p$ – потужність, що підводиться до вала двигуна; втрати в машині постійного струму визначаються так само, як і в п. 3.6.

Результати дослідів і розрахунків зводять у таблицю 2.3, і будують залежності $M_2 = f(n_2)$, $I_1 = f(n_2)$ у другому квадранті в тих самих координатних осях, що і для режиму двигуна.

3.9. Значення пускового моменту визначають з наступної формули, приймаючи ковзання $s = 1$:

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s \left[\left(r_1 + c_1 r_2' / s \right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2' \right)^2 \right]},$$

де значення параметрів схеми заміщення знаходяться з дослідів холостого ходу і короткого замикання так само, як і в роботі № 1.

Для визначення максимального моменту спочатку розраховують значення критичного ковзання

$$s_{\text{кр}} = \frac{c_1 r_2'}{x_1 + c_1 x_2'}.$$

Тоді

$$M_{\text{max}} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s_{\text{кр}} \left[\left(r_1 + c_1 r_2' / s_{\text{кр}} \right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2' \right)^2 \right]}.$$

Визначають значення кратності пускового і максимального моментів:

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}}, \quad k_{\text{M}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{H}}}.$$

Питання для самоконтролю

1. Які переваги і недоліки асинхронної машини з фазним ротором у порівнянні з асинхронною машиною з короткозамкненим ротором?
2. Як виглядає енергетична діаграма асинхронного двигуна?
3. Як виглядає енергетична діаграма асинхронного генератора?
4. Поясніть принцип дії індукційного регулятора.
5. Які необхідно виконати умови для переведення асинхронної машини в генераторний режим?
6. Як збільшити пусковий момент асинхронного двигуна з фазним ротором?

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

1. Обсяг роботи

1.1. Увімкнути генератор на паралельну роботу з мережею. При номінальних потужності, напрузі, струмі якоря та $\cos\varphi$ 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 $i_z = i_{zn}$.

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 синхронного генератора в мережу здійснюється методом точної синхронізації, описаним у п. 2.1 лабораторної роботи № 4. Ввести пусковий реостат $R1$. Включити $QF2$. Запустити MDC за допомогою пускового реостата $R1$. Встановити за допомогою реостатів $R4$ і при необхідності $R1$ номінальну частоту обертання $n = n_c$. За допомогою реостата $R2$ встановити $U_{л} = U_{н}$ по $PV1$. Включити вимикач $QF1$. Автотрансформатором $TV1$ встановити по вольтметру вимірювального комплексу ВК $U_{сф} = U_{н}$. Включити $Q2$ в момент

проходження стрілки синхроноскопа PS (на схемі рис. 3.1 не показаний) через нуль.

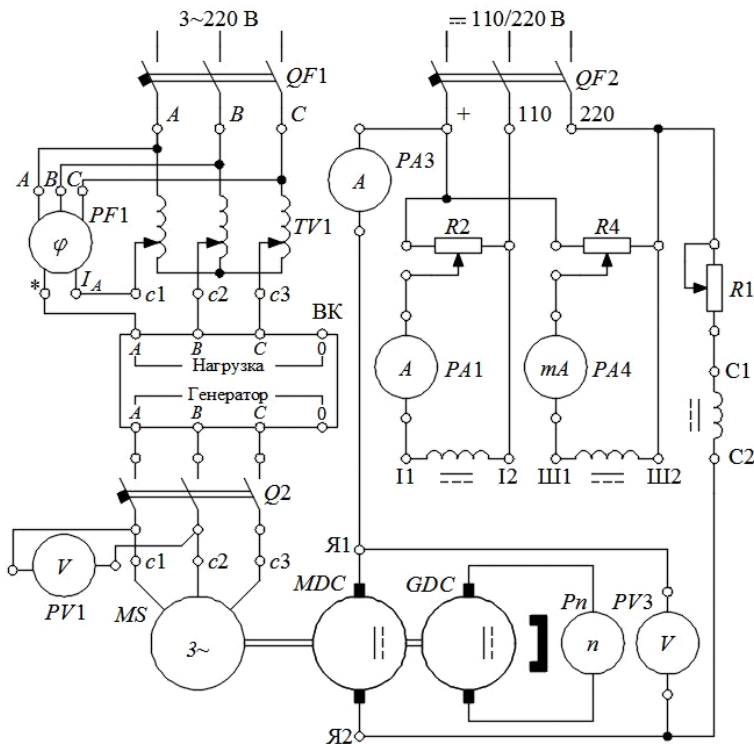


Рис. 3.1

2.2. Навантаження синхронного генератора MS реактивним та активним струмом здійснюється в такий спосіб: генератор буде віддавати в мережу реактивну потужність, якщо збільшити його струм збудження при незмінній напрузі автотрансформатора $TU1$ або якщо зменшити напругу автотрансформатора при незмінному струмі збудження.

Щоб увімкнений у мережу генератор MS віддавав активну потужність, потрібно збільшити рушійний момент на його

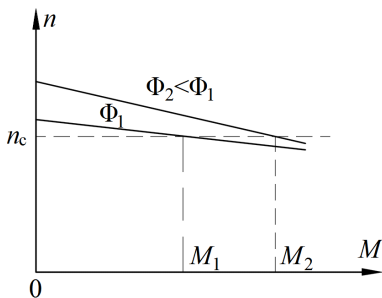


Рис. 3.2

валу. Це можна зробити, зменшуючи струм збудження двигуна постійного струму MDC . При цьому двигун буде працювати на механічній характеристиці з меншим магнітним потоком, а оскільки частота обертання агрегата n_c визначається частотою мережі і не змінюється, то обертальний момент двигуна зросте $M_2 > M_1$ (рис. 3.2).

2.3. Зовнішня характеристика $U = f(I)$ знімається при $i_3 = i_{3н} = \text{const}$, $\cos\varphi = \cos\varphi_n = \text{const}$, $f = f_n = \text{const}$. Спочатку встановлюється точка номінального навантаження. Регулюючи реостатом $R4$ струм збудження і опір $R1$ в ланцюзі якоря машини постійного струму MDC , встановлюють по ватметру вимірювального комплексу BK потужність, що віддається генератором MS в мережу, приблизно рівною номінальній. Напруга на виході автотрансформатора $TV1$ встановлюється по вольтметру BK на 15...20 % нижче номінальної. Регулюючи реостатом $R2$ струм збудження генератора MS , встановлюють номінальне значення $\cos\varphi$. Одержаний струм збудження генератора MS вважаємо номінальним.

При знятті зовнішньої характеристики струм збудження $i_{3,г}$ залишається постійним. Точки характеристики встановлюються шляхом зміни реостатом $R4$ струму збудження двигуна MDC , а напругою автотрансформатора $TV1$ підтримують $\cos\varphi = \text{const}$. При цьому струм статора змінюється в межах від I_n до 0. Результати вимірювань заносяться в табл. 3.1.

2.4. Регулювальна характеристика $i_3 = f(I)$ знімається при $U = U_{\text{н}} = \text{const}$, $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{н}} = \text{const}$, $f = f_{\text{н}} = \text{const}$. Точки характеристики встановлюються шляхом зміни реостатом $R4$ струму збудження двигуна MDC , при цьому струмом збудження генератора MS (реостатом $R2$) підтримують $\cos\varphi_{\text{н}} = \text{const}$. Вихідна потужність генератора MS змінюється в межах від $P_{\text{н}}$ до 0. Результати вимірювань заносяться в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

№	U	I	P	$\cos\varphi$	$i_{3,\text{г}}$
	В	А	Вт		А

2.5. Навантажувальна індуктивна характеристика $U = f(i_3)$ знімається при $I = I_{\text{н}} = \text{const}$, $\cos\varphi = 0$, $f = f_{\text{н}} = \text{const}$. Змінюючи струм збудження двигуна MDC реостатом $R4$ і напругу на його якорі за допомогою пускового реостата $R1$ (при малих навантаженнях це допустимо), досягають, щоб активна потужність, що віддається генератором MS в мережу, була близька до нуля.

Змінюючи реостатом $R2$ струм збудження генератора MS , для кожного його значення знаходять таку напругу автотрансформатора $TV1$, при якому струм статора дорівнює $I_{\text{н}}$. Дослід проводять при зміні напруги від $U = U_{\text{н}}$ до мінімально можливої. Записують у таблицю 3.1 струм збудження генератора MS і відповідні значення напруги.

2.6. Характеристика холостого ходу $U_0 = f(i_{3,\text{г}})$ знімається при $I = 0$. Генератор MS відключають від мережі. Встановлюють номінальну частоту обертання $n_{\text{н}}$ генератора, і під час проведення досліду підтримують її постійною за допомогою реостата $R4$ в ланцюзі збудження двигуна MDC . Струм збудження генератора змінюється реостатом $R2$ від значення,

при якому $U_0 = 1,3 U_H$, до 0. Записують струм збудження і напругу генератора MS в таблицю 3.1.

2.7. Характеристика сталого трифазного короткого замикання $I = f(i_{3,Г})$ знімається при $U = 0, f = f_H = \text{const}$.

Розімкнути вимикач $Q2$, тим самим автотрансформатор $TV1$ відключають від генератора MS , затискачі генератора замикаються накоротко. Струм збудження генератора MS дорівнює нулю (реостат $R2$ в крайньому положенні). Запускається привідний двигун MDC і реостатом $R4$ встановлюється номінальна частота обертання генератора MS . На обмотку збудження генератора MS подається напруга і реостатом $R2$ встановлюється струм $i_{3,Г} = i_{3,Г.\text{max}}$, який відповідає струму статора $1,2 I_H$. Потім струм збудження зменшується до нуля. В таблицю 3.1 записуються струми статора і збудження.

3. Обробка результатів випробувань

У звіті будують зовнішню та регульовальну характеристики на окремих рисунках.

За зовнішньою характеристикою визначити номінальну зміну напруги генератора у відсотках при переході від номінального навантаження до холостого ходу

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

Для визначення номінального струму збудження і номінальної зміни напруги генератора будують діаграму ЕРС (Потьє). Для цього у спільних координатних осях будуються характеристики холостого ходу $U_0 = f(i_{3,Г})$, навантажувальна індуктивна $U = f(i_{3,Г})$ (при $\cos\varphi = 0$) і характеристика трифазного сталого короткого замикання $I_{кз} = f(i_{3,Г})$ (U_0 , U – фазні напруги). Від точки С (рис. 3.3), яка знаходиться на перетині характеристики $U = f(i_{3,Г})$ і прямої U_H , уздовж прямої відкла-

дається відрізок $AC = 0G$, рівний струму збудження, що відповідає номінальному струму якоря I_H за характеристикою $I_{кз} = f(i_{3.Г})$. Через точку A проводиться пряма AB паралельно прямій 1 (дотичній до початкової частини характеристики холостого ходу $U_0 = f(i_{3.Г})$) до перетину з характеристикою $U_0 = f(i_{3.Г})$. З точки B на відрізок AC опускається перпендикуляр

$$BD = I_H x_p,$$

де x_p – індуктивний опір Потье.

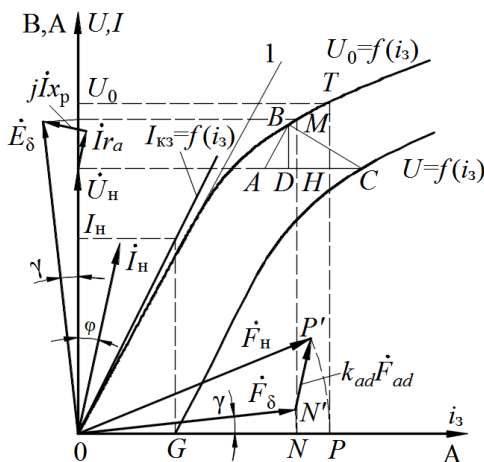


Рис. 3.3

По осі ординат відкладається вектор фазної напруги $\dot{U}_H$, під кутом φ до нього – вектор струму $\dot{I}_H$. Визначаємо вектор результуючої ЕРС

$$\dot{E}_\delta = \dot{U}_H + \dot{I}_H r_a + j \dot{I}_H x_p,$$

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

За характеристикою $U_0 = f(i_{3.г})$ для $\dot{E}_\delta$ знаходимо намагнічуючу силу $\dot{F}_\delta$ у масштабі струму збудження, що дорівнює відрізку ON . Відрізок ON повертаємо відносно осі абсцис на кут γ . Кут між вектором $\dot{E}_\delta$ і прямою ON' повинен бути 90° . З точки N' паралельно вектору струму $\dot{I}_H$ відкладається відрізок $N'P' = DC$, який у масштабі струму збудження дорівнює намагнічуючій силі подовжньої реакції якоря $k_{ad}\dot{F}_{ad}$. Відрізок $OP = OP'$ є намагнічуючою силою збудження в номінальному режимі, яка виражена в масштабі струму збудження. Таким чином, номінальний струм збудження $i_{3.г.н} = OP$. Для $i_{3.г.н}$ за кривою $U_0 = f(i_{3.г})$ знаходиться $U_0 = PT$. Тоді номінальна зміна напруги генератора при зміні навантаження від номінальної до холостого ходу

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

Отримане значення порівняти зі значенням провалу напруги з п. 3.1.

Питання для самоконтролю

1. Як змінити активне навантаження синхронного генератора, увімкненого в потужну мережу?
2. Як змінити реактивне навантаження синхронного генератора, увімкненого в потужну мережу?
3. Як впливає характер навантаження на вигляд зовнішньої характеристики?
4. Як впливає характер навантаження на вигляд регулювальної характеристики?
5. Які вихідні дані потрібні для побудови діаграми Потьє і для чого вона будується?

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 при роботі в режимі холостого 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; при половинному збудженні до межі статичної стійкості; при відсутності збудження до межі статичної стійкості.

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

1.4. За даними дослідів визначити синхронний індуктивний опір машини по подовжній осі x_d і синхронний індуктивний опір по поперечній осі x_q , для чого зняти ділянку характеристики холостого ходу $U = f(i_3)$ в діапазоні $(1,3 \dots 0,7) U_n$.

1.5. За даними дослідів навантаження побудувати векторну діаграму для номінального режиму і визначити ЕРС E та кут навантаження θ .

1.6. Розрахувати і побудувати кутові характеристики генератора $P_2 = f(\theta)$ 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.

Схема установки наведена на рис. 4.1.

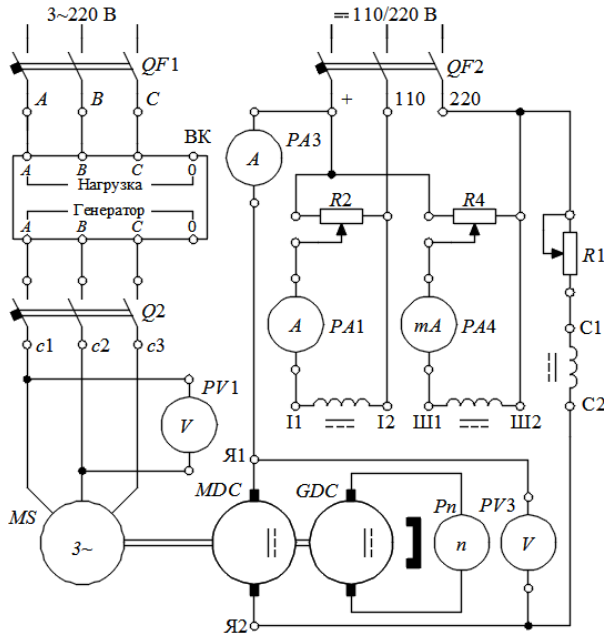


Рис. 4.1

- 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.

- чергування фаз генератора і мережі повинно бути од-
овим;
- частоти генератора і мережі повинні бути однакові;
- напруга генератора повинна дорівнювати напрузі мережі;
- напруга генератора і напруга мережі відносно точок

При виконанні цих умов підключення відбудеться без стрибка струму і механічного поштовху на валу.

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

Різниця частот генератора і мережі контролюється синхроскопом. Якщо частота генератора менша від частоти мережі, то після підключення до мережі синхронна машина *MS* буде працювати в режимі двигуна зі споживанням активної потужності з трифазної мережі.

Якщо частота генератора *MS* 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 *MS* 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, обирається за допомогою синхроскопа.

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

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 *MS* до мережі струм статора генератора залишається рівним нулю. Струм збудження при цьому позначимо i_{30} . При відхиленні струму збудження від значення i_{30} з'явиться реактивний струм. При зміні струму збудження від $i_3 \approx 0$ до $i_{3.\text{max}}$, при якому струм статора I не перевищує $1,2 I_n$,

знімаються обидві гілки (при $i_3 < i_{30}$ та при $i_3 > i_{30}$) V -подібної характеристики з обов'язковою фіксацією точки, в якій $I = 0$.

Для зняття V -подібної характеристики при половинній потужності необхідно навантажити генератор активною потужністю $P_2 = 0,5 P_{2н}$. Це досягається збільшенням обертового моменту на валу, для чого зменшують реостатом $R4$ струм збудження генератора постійного струму MDC . Потім, змінюючи струм збудження генератора MS і підтримуючи постійність потужності P_2 , знімають V -подібну характеристику при половинній потужності. При цьому струм якоря не повинен перевищувати $1,2 I_n$. Потрібно зняти обидві гілки характеристики й обов'язково точку, в якій $I = I_{min}$ (при цьому $\cos\varphi = 1$).

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

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

Явнополюсний синхронний генератор MS може працювати без збудження, тобто при $i_3 = 0$, за рахунок реактивного моменту. Дослід проводиться в наступному порядку. Генератор MS 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 *MDC*. **При перевищенні меж статичної стійкості генератор випадає із синхронізму і його слід швидко відключити.** Слід зафіксувати потужність $P_2 = P_{2m0}$, яка відповідає межі статичної стійкості.

2.4. Визначення синхронних індуктивних опорів x_d і x_q можна здійснити наступним шляхом. Якщо при роботі генератора *MS* паралельно з мережею в режимі холостого ходу встановити струм збудження, при якому ЕРС E генератора відрізняється від напруги мережі, то встановиться режим роботи генератора з чисто реактивним струмом статора. Рівняння ЕРС генератора в цьому випадку має вигляд

$$\dot{U}_0 = \dot{E} + j\dot{I}x_d.$$

На V -подібній характеристиці знаходимо значення струму збудження i_{30} генератора *MS*, яке відповідає мінімальному струму статора $I = I_{min}$ (рис. 4.2). За характеристикою холостого ходу визначаємо значення ЕРС E , яке в цій точці має дорівнювати напрузі мережі U_0 . Слід обчислити декілька значень x_d , що відповідають різним струмам збудження, в тому числі для $E > U_0$ та $E < U_0$. Тому відкладаємо $\Delta U = 5$ В і $\Delta U = 10$ В у сторону збільшення й аналогічно в сторону зменшення напруги. Знаходимо значення ЕРС $E_1 \dots E_4$, яким за характеристикою холостого ходу (точки 1...4) відповідають струми збудження $i_{31} \dots i_{34}$. З V -подібної характеристики для цих значень струмів збудження знаходимо точки 1' ... 4', яким відповідають струми статора $I_1 \dots I_4$. Підставимо значення ЕРС і відповідні значення струмів статора в формулу

$$x_d = \frac{|U_0 - E|}{I} = \frac{|\Delta U|}{I}.$$

Отримані значення опору x_d усереднюються.

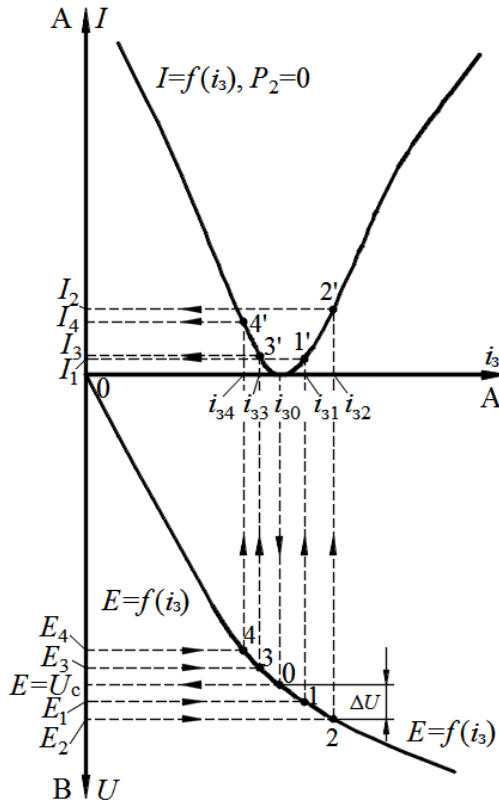


Рис. 4.2

Визначення синхронного опору генератора по поперечній осі x_q виконуємо з наступних міркувань. Максимальна потужність незбудженого явнополюсного синхронного генератора, яка відповідає межі статичної стійкості, визначається за формулою

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

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

Тоді індуктивний опір по поперечній осі

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

Векторна діаграма ЕРС генератора будується в такий спосіб: від початку координат (точка 0) у визначеному масштабі відкладається вектор фазної напруги $\dot{U}$ і під кутом φ до нього вектор струму $\dot{I}$; до кінця вектора $\dot{U}$ паралельно вектору струму $\dot{I}$ прибудовується вектор падіння напруги $\dot{I}r_a$, де r_a – активний опір фази обмотки статора (дається в паспортних даних). Утворюється точка A (рис. 4.3). Від кінця вектора $\dot{I}r_a$ перпендикулярно до нього відкладається вектор $j\dot{I}x_q$, кінець якого визначає положення точки Q . Через точки 0 і Q проходить напрямок вектора ЕРС генератора $\dot{E}$, тому кут між лінією $0Q$ і вектором струму є кутом $\psi = \varphi + \theta$, а кут між лінією $0Q$ та вектором напруги – це кут навантаження θ . Проекція вектора струму на лінію $0Q$ являє собою поперечну складову струму $\dot{I}_q$, а перпендикулярна до неї $\dot{I}_d$ – подовжню складову струму ($I_d = I \sin \psi$, $I_q = I \cos \psi$). Проводячи з точки A перпендикуляр AB на лінію $0Q$, одержуємо вектор $j\dot{I}_qx_q$. Тепер від точки B уздовж лінії $0Q$ відкладається вектор $j\dot{I}_dx_d$, кінець якого в точці D визначає вектор ЕРС генератора $\dot{E}$. За побудованою векторною діаграмою для номінального режиму

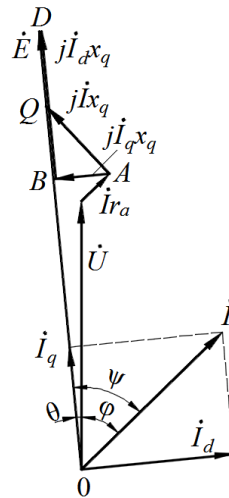


Рис. 4.3

слід установити числові значення ЕРС E і кута навантаження θ .

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

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

Підставляючи у формулу відомі значення U_c , E , x_d і x_q , розраховують кутові характеристики для номінальної ЕРС, що відповідає номінальному струму збудження, і для половинної ЕРС, що відповідає половині номінального струму збудження. Результати розрахунку подаються у вигляді таблиць і графіків.

За графіками визначають кути навантаження θ_n при номінальній потужності P_{2n} і $i_3 = i_{3n}$ та $\theta_{0,5}$ при номінальній потужності P_{2n} і $i_3 = 0,5i_{3n}$, а також максимальні потужності при цих струмах збудження P_{2m} і $P_{2m0,5}$.

Значення $P_{2m0,5}$ порівняти з дослідним.

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

$$k_{\Pi} = \frac{P_{2m}}{P_{2n}}.$$

Питання для самоконтролю

1. Які умови необхідно виконати для вмикання генератора на паралельну роботу з мережею методом точної синхронізації?

2. Як зміниться положення та вигляд V -подібної характеристики при зниженні напруги мережі?

3. Який приблизно повинен бути кут навантаження θ у номінальному режимі, якщо статична перевантаженість дорівнює двом?

4. Чим відрізняються регулювальні характеристики від V -подібних?

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА

1. Обсяг роботи

1.1. Виконати асинхронний пуск двигуна. Заміряти пусковий струм. Вивчити явище "одноосьового вмикання".

1.2. Зняти I -подібні характеристики двигуна в режимі холостого ходу і при половинному навантаженні.

1.3. Зняти робочі характеристики двигуна при номінальному струмі збудження.

1.4. 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 розімкнутому колі якоря машини постійного струму. На час пуску амперметр, призначений для вимірювання 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 накоротко 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.

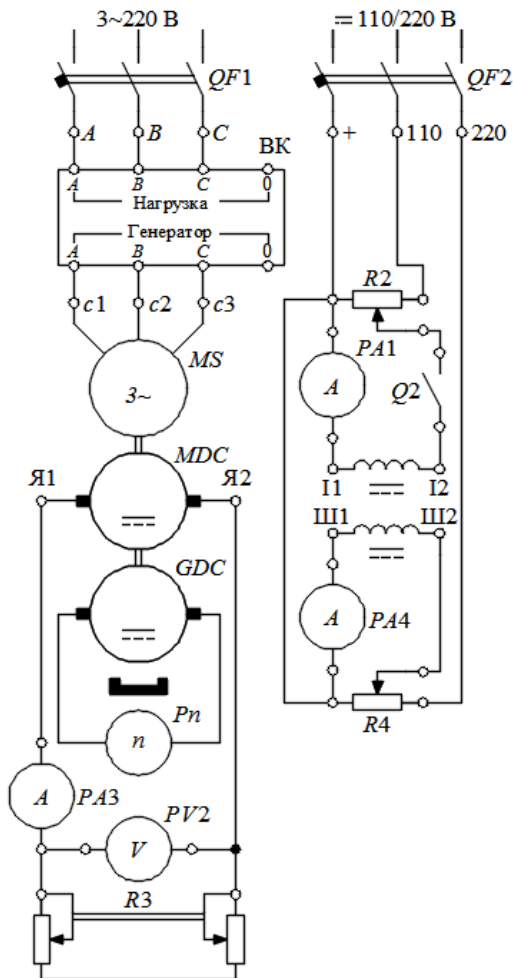


Рис. 5.1

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

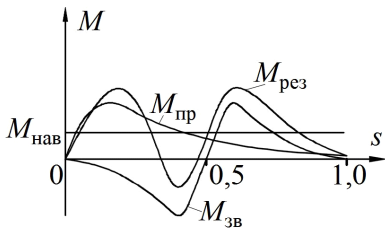


Рис. 5.2

збудження, який індукується цим полем. При такому пуску різко виражене явище так званого одноосьового вмикання, яке виявляється в тому, що крива моменту в залежності від ковзання має різкий провал при частоті обертання ротора, яка дорівнює половині синхронної (рис. 5.2).

Під час пуску в обмотці збудження індукується струм частоти $f_2 = s f_1$, який створює пульсуюче магнітне поле по осі обмотки збудження. Останнє можна розкласти на дві складові $\Phi_{\text{пр}}$ і $\Phi_{\text{зв}}$ з однаковими амплітудами намагнічуючих сил, що дорівнюють половині намагнічуючої сили пульсуючого поля. Ці складові обертаються відносно ротора з рівними швидкостями, але в протилежних напрямках $n_p = \pm 60 f_2 / p = \pm 60 s f_1 / p = \pm n_1 s$. Пряма складова утворить асинхронний момент $M_{\text{пр}}$, зворотна – $M_{\text{зв}}$. Результуючий момент $M_{\text{рез}}$ є їхньою сумою (рис. 5.2). Співвідношення між моментами $M_{\text{пр}}$ і $M_{\text{зв}}$ та результуючий момент $M_{\text{рез}}$ залежить від опору кола ротора r_3 , що в нашому випадку повинен бути 140...200 Ом. При меншому опорі момент $M_{\text{зв}}$ різко виражений, крива результуючого моменту $M_{\text{рез}}$ має глибокий провал, і пуск машини зупиняється 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 зазвичай визначається за допомогою реле ковзання. В даному випадку ця операція проводиться вручну.

Для виявлення одноосьового вмикання в коло збудження двигуна включається резистор $r_3 = 50 \dots 70$ Ом і двигун пускається повторно; швидко замірюється усталене значення частоти обертання, що повинно бути $0,5n_c$, після чого двигун відразу відключається від мережі.

2.2. V -подібні характеристики $I = f(i_3)$ при $U = \text{const}$ та $P_2 = \text{const}$. 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 $\cos\varphi = 1$. Якщо $i_3 < i_{30}$, то магнітне поле збудження мале (режим недозбудження) і для підтримки результуючого магнітного потоку, що відповідає даній напрузі мережі, двигун споживає реактивну потужність із мережі, працюючи з відстаючим $\cos\varphi$. Якщо $i_3 > i_{30}$ (режим перезбудження), двигун віддає реактивну потужність у мережу, працюючи з $\cos\varphi$, що випереджає.

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

Для зняття характеристики $I = f(i_3)$ у режимі холостого ходу коло якоря навантажувального генератора MDC розмикається і його струм збудження зменшується до нуля. У цьому випадку навантаження на валу синхронного двигуна MS дорівнює механічним втратам генератора постійного струму $P_2 = P_{\text{мех.Г}}$. Змінюючи струм збудження від $i_3 = 0$ до $i_3 = i_{3.\text{max}}$,

при якому струм якоря $I \leq 1,2I_{\text{н}}$, знімають обидві гілки характеристики й обов'язково точку, в якій $I = I_{\text{мін}}$.

Для зняття характеристики $I = f(i_3)$ при навантаженні генератор постійного струму *MDC* включається на реостат *R3* і збуджується. Встановлюється реостатом *R3* 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 *MDC* під час досліду підтримуються постійними. Цим забезпечується постійність електромагнітного моменту генератора *MDC* ($M = c_M I \Phi$), а оскільки частота обертання агрегата постійна, то і потужність на валу постійна. Струм збудження змінюється від $i_3 = i_{3,\text{мін}}$ до $i_3 = i_{3,\text{макс}}$, при якому струм якоря I не повинен перевищувати $1,2 I_{\text{н}}$. Знімаються обидві гілки характеристики й обов'язково точка, в якій $I = I_{\text{мін}}$.

2.3. Робочі характеристики $I, P_1, M_2, \cos\phi, \eta = f(P_2)$ при $U_{\text{с}} = \text{const}$ та $i_3 = \text{const}$.

Величини I та P_1 визначаються за показаннями приладів безпосередньо, а $M_2, \cos\phi, \eta, P_2$ розраховуються.

Двигун навантажується так, щоб при напрузі мережі $U_{\text{с}}$ споживана потужність дорівнювала номінальній $P_1 = P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}}/\eta_{\text{н}}$. Змінюючи струм збудження i_3 , встановлюють номінальний струм якоря $I_{\text{н}}$ двигуна *MS*. Отримане при цьому значення i_3 є номінальним і в процесі виконання досліду не змінюється. Характеристики знімаються при зміні навантаження на двигуні від $P_1 = (1,2 \dots 1,3) P_{1\text{н}}$ до холостого ходу. Дані досліду і результати розрахунку заносяться в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. ($U_{\text{м}} = \dots B, i_{3,\text{г}} = \dots A$)

№	Дослідні дані				Розрахункові дані							
	<i>MS</i>		<i>MDC</i>									
	P_1	I	$U_{\text{г}}$	$I_{\text{г}}$	$P_{\text{г}}$	$P_{\text{е}}$	$P_{\text{щ}}$	$P_{\text{дод}}$	P_2	η	M_2	$\cos\phi$
	Вт	A	B	A	Вт				Нм			

2.5. Побудова характеристик передбачає наступні розрахунково-графічні роботи:

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

- розрахунок і побудову робочих характеристик синхронного двигуна, тобто залежностей $I, P_1, M_2, \cos\varphi, \eta = f(P_2)$;

- коротке пояснення всіх характеристик.

Робочі характеристики синхронного двигуна MS розраховують за такими формулами:

- потужність, що споживається генератором з мережі,

$$P_{\Gamma} = U_{\Gamma} I_{\Gamma};$$

- електричні втрати в обмотках кола якоря генератора

$$P_e = I_{\Gamma}^2 R_{я.Г};$$

- електричні втрати в щітковому контакті $MDC P_{щ} = 2 I_{\Gamma} \Delta U_{щ} \approx 2 I_{\Gamma}$ (приймаємо $\Delta U_{щ} \approx 1B$);

- втрати холостого ходу $MDC P_0 = P_{мех} + P_{магн}$ приймаються рівними 8 % номінальної потужності $P_{Г.Н}$ машини постійного струму (тут $P_{мех}$ – механічні та $P_{магн}$ – магнітні втрати);

- додаткові втрати $P_{дод} = 0,01 U_{\Gamma} I_{\Gamma}$;

- корисна потужність на валу двигуна $P_2 = P_{\Gamma} + P_e + P_{щ} + P_0 + P_{дод}$;

- момент на валу двигуна $M_2 = \frac{30P_2}{\pi n}$ (n – частота обертання, об/хв);

- ККД двигуна $\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%.$

Питання для самоконтролю

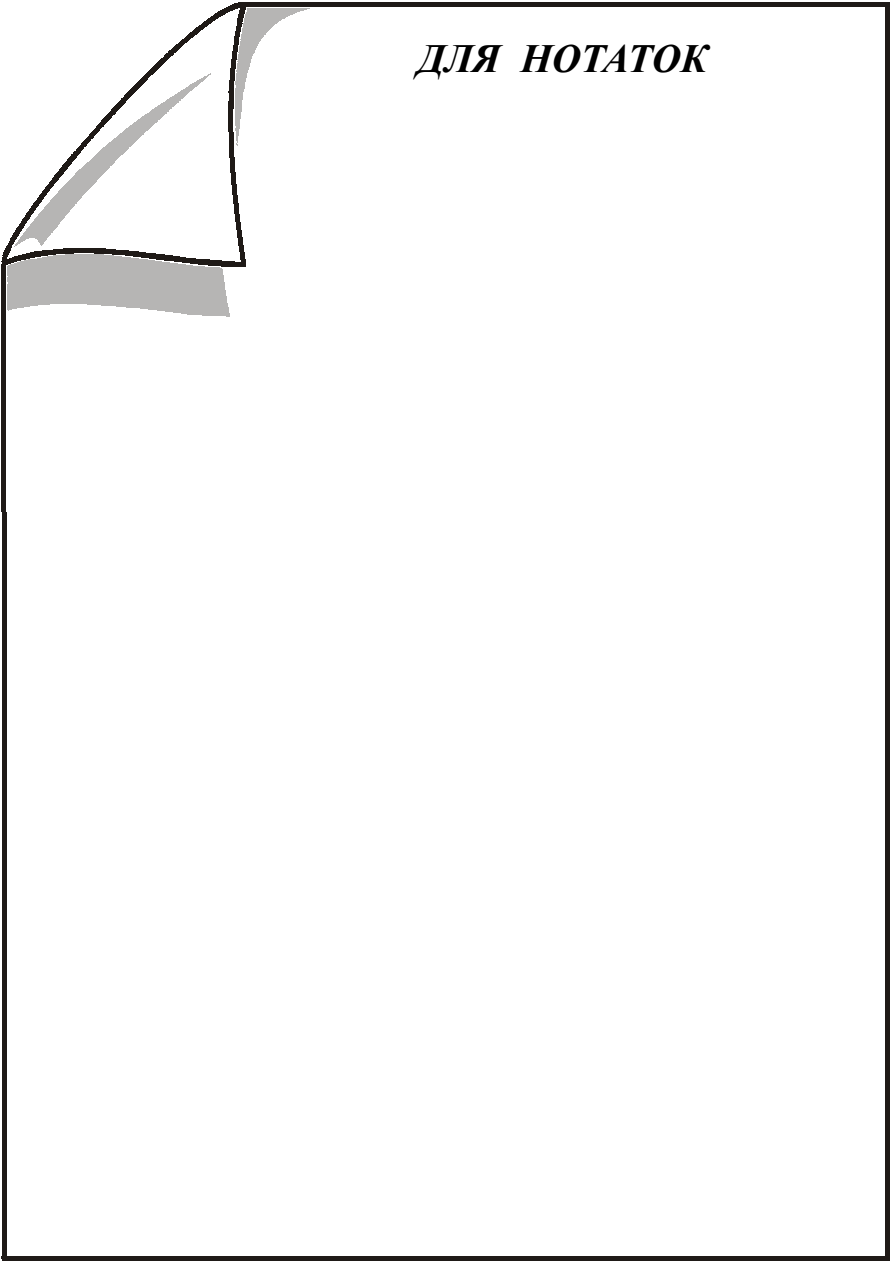
1. Як відбувається асинхронний пуск синхронного двигуна?
2. Що відбудеться в разі передчасної подачі збудження при асинхронному пуску?
3. Як за V-подібною характеристикою побудувати залежність коефіцієнта потужності від струму збудження?

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. Кимстач О.Ю. Проектування асинхронних двигунів малої і середньої потужності загального призначення з короткозамкненим ротором : навч. посібник. – Миколаїв : НУК, 2012. – 134 с.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1972. – Ч. 2. – 544 с.
7. Яцун М.А. Електричні машини : навч. посібник. – Л.: Вид-во Державного ун-ту "Львівська політехніка", 1999. – 427 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
Вимоги до виконання лабораторних робіт	4
<i>Робота № 1.</i> Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором	6
<i>Робота № 2.</i> Дослідження трифазної асинхронної машини з фазним ротором	17
<i>Робота № 3.</i> Характеристики трифазного синхронного генератора	28
<i>Робота № 4.</i> Паралельна робота синхронного генератора з мережею	35
<i>Робота № 5.</i> Характеристики трифазного синхронного двигуна	44
Рекомендована література	51



ДЛЯ ЗАДАТОК

Навчальне видання

АВДЄЄВА Олена Андріївна
АЛЕКСАНДРОВСЬКИЙ Станіслав Юрійович
БАНДУРА Сергій Іванович
НОВОГРЕЦЬКИЙ Сергій Миколайович
КОСТЮЧЕНКО Віталій Іванович

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
ЗМІННОГО СТРУМУ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з електричним машин**

У трьох частинах

Частина 2

Комп'ютерне складання та верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,2. Тираж 100 прим. Вид. № 41. Зам. № 2011-74.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.