

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Електричні машини»
для студентів напрямку підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»

Рекомендовано Методичною радою факультету електроенерготехніки та автоматики

Київ
НТУУ «КПІ»
2014

Електричні машини: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електричні машини» для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/ Уклад.: М.О.Реуцький, М.Г.Анпілогов, О.М. Давидов, Є.М.Дубчак, Троян О.І.– К.: НТУУ «КПІ», 2014- 77с.

*Гриф надано Методичною радою ФЕА
Протокол № 6 від “20” лютого 2014р.*

Навчальне видання

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Електричні машини»
для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»**

Укладачі:

*Микола Олександрович Реуцький к.т.н. доцент
Микола Георгійович Анпілогов к.т.н. доцент
Олексій Миколайович Давидов к.т.н. доцент
Євген Михайлович Дубчак ст. вкл.
Олександр Ігорович Троян ст. вкл.*

Відповідальний

Редактор:

Ю.М. Васьковський д.т.н. професор

Рецензент:

М.Я. Островерхов д.т.н. професор

За редакцією укладачів

ЗМІСТ

Вступ...	4
Підготовка до проведення лабораторної роботи.....	4
Техніка безпеки при виконанні робіт.....	5
Вказівки по проведенню роботи.....	5
Оформлення протоколу та захист змісту лабораторної роботи.....	7
Лабораторна робота № 1. Дослідження трифазного двохобмоткового трансформатора	9
Лабораторна робота № 2. Дослідження паралельної роботи двохобмоткових трифазних трансформаторів.....	17
Лабораторна робота № 3. Дослідження асинхронного двигуна з фазним ротором.....	24
Лабораторна робота № 4. Дослідження асинхронної машини з короткозамкненим ротором у режимі двигуна та генератора	36
Лабораторна робота №5. Випробування трифазного синхронного генератора в автономному режимі роботи.....	43
Лабораторна робота №6. Випробування синхронного генератора, що працює паралельно з мережею	56
Лабораторна робота №7. Випробування синхронного двигуна	64
Лабораторна робота №8. Випробування двигуна постійного струму паралельного і змішаного збудження	70
Список використаної літератури	77

ВСТУП

Метою лабораторних робіт є поглиблення знань по конструкції, принципу дії і теорії електричних машин та трансформаторів, що застосовуються в різних галузях народного господарства.

Виконання лабораторних робіт сприяє придбання вміння та навичок по випробуванню і оформленню результатів експериментальних досліджень електричних машин та трансформаторів.

Поставлена мета досягається шляхом виконання студентами наступних вимог

- обов'язкова підготовка до лабораторної роботи;
- суворе дотримання вимог техніки безпеки;
- дотримання правил і інструкцій з проведення лабораторної роботи;
- відповідне оформлення протоколу і захист результатів лабораторної роботи.

В методичних вказівках рекомендовані п'ятнадцять лабораторних робіт з дисципліни «Електричні машини» та «Силові трансформатори».

ПІДГОТОВКА ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Підготовка полягає в усвідомленні студентом мети і завдань лабораторної роботи, у вивченні конструкції, принципу дії, основ теорії випробуваної електричної машини, її основних характеристик і області застосування.

Результатом підготовки служить протокол до виконуваної роботи, що оформляється кожним студентом індивідуально. Протокол до роботи виконується на аркушах формату А4, має титульний лист, оформлення і зміст якого повинні відповідати вимогам, прийнятим на кафедрі. На наступних аркушах вказується мета роботи, програма і робоча схема. Робоча бригада студентів повинна представити один робочий зошит, у якому підготовлені таблиці для внесення довідкових даних і результатів експериментів.

Допуск студента до лабораторної роботи можливий при наявності протоколу, робочого зошита та відповідей на питання по послідовності зняття конкретних характеристик або залежностей. При поясненнях по проведенню експериментів повинні використовуватися робочі схеми, наведені в протоколі.

Готовність студента до проведення лабораторної роботи перевіряє викладач, що веде заняття. При незадовільній підготовці студент до виконання роботи не допускається.

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ РОБІТ

Студенти, що вперше приходять у лабораторію, зобов'язані прослухати інструкцію з техніки безпеки, дотримання якої потрібно протягом усього циклу лабораторних робіт.

Треба пам'ятати, що в лабораторії використовується напруга 220 В змінного і постійного струму та 110 В постійного струму. З урахуванням того, що опір тіла людини може становити близько 500 Ом, зазначені величини напруги небезпечні. Тому забороняється проводити з'єднання та переключення в схемі, що перебуває під напругою.

Слід пам'ятати, що відкриті обертові частини електричних машин мають частоту обертання до 3000 об/хв. Тому треба дотримуватися обережності, пам'ятаючи, що гладкий вал, що обертається, здатний «захоплювати» волосся та звисаючі частини одягу.

У випадку ураження струмом, «захвату» обертовою частиною машини, обриву дротів, які знаходяться під напругою, утворення неприпустимого іскріння в машинах потрібно негайно відключити напругу.

Невиконання правил техніки безпеки може призвести до травм, виходу з ладу вимірювальних приладів, допоміжних пристроїв і самої випробуваної машини.

Додаткові інструкції з техніки безпеки вказує викладач по кожній конкретній лабораторній роботі.

ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Допущені до виконання лабораторної роботи студенти зобов'язані ознайомитися з робочим місцем: щитом живлення, включенням і виключенням напруги на робочому місці, з'ясувати величину напруги, що подається, та її характер.

Далі студенти повинні записати в робочий зошит паспортні дані випробуваної та допоміжної машин, з'ясувати, які затискачі машин, реостатів і допоміжних при-

строїв відповідають окремим точкам електричної схеми, правильно вибрати реостати і вимірювальні прилади для використання в робочій схемі.

При виборі реостату треба керуватися не тільки величиною потрібного опору, але і величиною струму.

При виборі вимірювальних приладів (амперметрів, вольтметрів і ватметрів) треба виходити з рекомендацій міждержавного стандарту ГОСТ 7217-85, що рекомендує використовувати при випробуваннях вимірювальні прилади класу 0,2 і 0,5. Межа вимірювальних приладів вибирається так, щоб виміри проводилися в діапазоні від 25% до 95% шкали.

Після зазначеної підготовки необхідно приступити до безпосереднього збирання схеми. Спочатку треба раціонально розташувати прилади і допоміжні елементи схеми. Від цього залежить зручність і швидкість зняття показань приладів.

Збирання схеми проводять в такій послідовності: почавши з одного затискача джерела живлення, треба зібрати спочатку струмове послідовне коло і закінчити на іншому затискачі джерела. Далі до цього кола поступово підключають всі паралельні гілки відповідно до схеми. Провідники, що з'єднують затискачі машин, реостатів і вимірювальних приладів, повинні бути щільно приєднані.

Після обов'язкової перевірки викладачем схеми студенти мають право ввімкнути напругу. Щоб переконатися в тому, що схема працює вірно, студенти повинні в момент вмикання напруги спостерігати за показаннями вимірювальних приладів. Це дозволяє вчасно виявити несправності і неточності схеми (обриви неправильне положення повзунка реостата, невідповідні вимірювальним величинам межі приладів і т.п.)

Досліди необхідно проводити швидко, але без поспіху. Показання вимірювальних приладів записують олівцем у заздалегідь підготовлені таблиці робочого зошита, коли всі необхідні умови проведення даного досліду (наприклад, постійна напруга, постійна частота мережі і т.п.) будуть виконані. Відлік показань вимірювальних приладів потрібно робити в поділках, бажано одночасно по команді одного з членів бригади, що керує дослідом. Обов'язково вказувати ціну поділки.

Рекомендується в процесі виконання роботи студентам бригади розподілитися так, щоб на одного студента припадало максимум два прилади, з яких треба зробити запис. Правильний розподіл обов'язків – застава організованого та швидкого прове-

дення дослідів. Обов'язки кожного студента в різних дослідах варто міняти з таким розрахунком, щоб всі студенти бригади придбали більш повні навички по випробуванню електричних машин.

Після закінчення конкретного досліді студенти повинні перевести показання приладів в абсолютні величини, використовуючи ціни поділки. Результати розрахунків необхідно записати в робочий зошит. У більшості випадків саме розташування точок залежностей може вказати на неточність ряду запису, помилки у вимірах, недотримання умов проведення досліді і т.п. Точки, що випали, повинні бути перевірені ще раз. Результати досліді показують викладачу, після чого можна переходити до наступного експерименту.

Лабораторний стенд приводиться в порядок, а робочий зошит підписується викладачем після закінчення роботи.

ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛУ ТА ЗАХИСТ ЗМІСТУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Оформлення протоколу лабораторної роботи повинно відповідати вимогам державного стандарту ДСТУ 3008-95 – Документація. Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила.

Вступною частиною протоколу є опис мети лабораторної роботи, після якої подається програма роботи і робоча схема експериментальних досліджень. Далі протокол повинен містити:

- паспортні дані випробуваної електричної машини, допоміжних пристроїв і приладів;
- результати обробки дослідних даних, узятих з робочого зошита;
- Результати розрахунків з використанням оброблених даних дослідів;
- рисунки з графічним зображенням результатів;
- висновки з поясненням і аналізом отриманих результатів.

При цьому в тексті повинно бути посилання на таблиці і рисунки, на яких відображені результати досліджень і розрахунків. Крім того, треба привести приклад обробки і розрахунку однієї точки (бажано номінальної) для кожної таблиці.

Правильно оформлений протокол і відповіді на питання, які наведені в підрозділах контролю питань для самоконтролю, є підставою для заліку конкретної лабораторної роботи.

Лабораторна робота №1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ДВОХОБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи – ознайомитися з конструкцією трансформатора, визначити параметри і характеристики силового трансформатора за даними досліджень неробочого ходу (НХ) і короткого замикання (КЗ).

1.1 Програма проведення і опрацювання результатів досліджень

1.1.1 Зробити зовнішній огляд Т, записати заводські дані та виконати ескіз його магнітної системи.

1.1.2 Виміряти мегомметром опір ізоляції між обмотками і на корпус, а також опір ізоляції стяжних болтів на корпус.

1.1.3 Виміряти омичний опір обмоток трансформатора і привести опір до температури 75 °С .

1.1.4 Зібрати схему (див. рисунок 1.1). Зняти і побудувати характеристики неробочого ходу: $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_0)$.

Визначити: струм НХ у відсотках від номінального струму і параметри Z_0, X_0, r_0 при $U_0 = U_{НОМ}$. Знайти коефіцієнт трансформації.

Визначити кількість витків первинної і вторинної обмоток трансформатора.

1.1.5 Зібрати схему (див. рисунок 1.1), подаючи напругу на обмотку ВН та закортивши обмотку НН, зняти і побудувати характеристики КЗ: $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$ при $U_2 = 0$. За даними досліду визначити параметри Z_k, X_k, r_k , напругу КЗ $U_k(\%)$ і її складові $U_{ka}(\%)$ і $U_{kp}(\%)$.

1.1.6 Визначити індукцію в стержні і ярмі. Користуючись значенням втрат НХ (при номінальній напрузі), розрахувати питомі втрати в сталі трансформатора. Довести питомі втрати до індукції $B = 1$ Тл при $f_1 = 50$ Гц і порівняти з табличними значеннями. Дати оцінку магнітного стану магнітопроводу.

1.1.7 Розрахувати і побудувати залежність ККД від коефіцієнта навантаження для двох значень коефіцієнта потужності: $\cos \phi_2 = 1,0$ і $\cos \phi_2 = 0,8$.

1.1.8 За параметрами КЗ визначити зміни вторинної напруги ΔU_2 при $\beta = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ для двох значень $\cos \phi_2 = 1,0$ і $\cos \phi_2 = 0,8$.

Побудувати зовнішні характеристики $U_2 = f(\beta)$ для двох значень: $\cos \phi_2 = 1,0$ і $\cos \phi_2 = 0,8$.

1.2 Методичні вказівки до проведення роботи

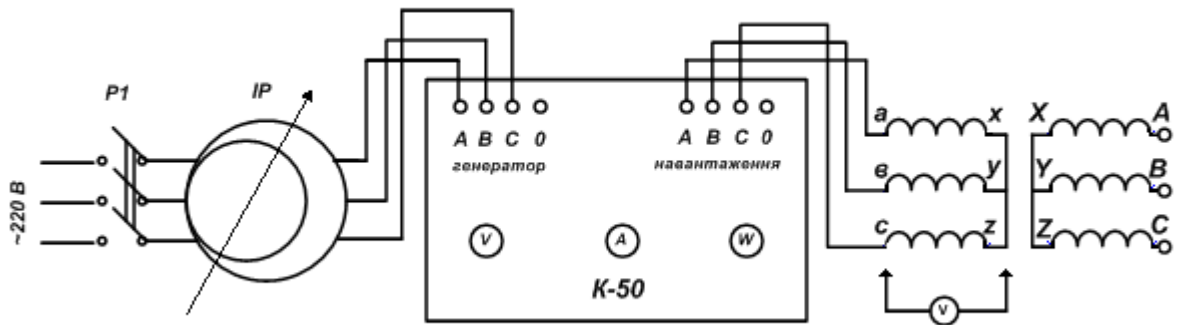


Рисунок 1.1 – Схема дослідження неробочого ходу трансформатора

1.2.1 На ескізі перерізу магнітопроводу трансформатора показати геометричні розміри пакетів. Розрахувати площі перерізу, обсяг стержнів і ярם трансформатора.

1.2.2 Дослідження трансформаторів та електричних машин усіх видів починають із виміру опору ізоляції обмоток відносно корпусу і між обмотками. Для вимірювання опору ізоляції використовують мегомметр з напругою джерела постійного струму 500В, що достатньо для вимірювання опорів до 100 МОм.

1.2.3 Опір обмоток трансформатора вимірюють за методом амперметра-вольтметра при постійному струмі в холодному стані.

Визначають і записують температуру навколишнього середовища t° .

1.2.4 Принципова електрична схема дослідження представлена на рисунку 1.1. На схемі показані такі елементи: P1- рубильник ; IP – індукційний регулятор; K-50 – комплект вимірювальних приладів для контролю струму (амперметр вимірює лінійні струми), потужності (ватметр – фазні потужності), напруги (вольтметр – фазні напруги). Обмотку НН підключити через K-50 і IP до мережі, а обмотку ВН розімкнути.

Змінюючи напругу за допомогою IP від 0,6 до $1,2 U_{H\Phi}$, знімають показники 6-8 точок характеристик НХ. Результати вимірів заносяться до таблиці 1.1. Обов'язково зняти показники U_0, P_0, I_0 , для точки $U_0 = U_{H\Phi}$.

Щоб визначити коефіцієнт трансформації за схемою (рисунок 1.1), встановлюють напругу 30-60% номінальної $U_{H\Phi}$ і вимірюють фазні напруги первинної і вторинної обмоток. Знімають одну точку. Результати вимірювань заносять у таблицю 1.2.

Таблиця 1.1 – Дослідження неробочого доходу

№ п/п	U_a	U_b	U_c	I_a	I_b	I_c	P_a	P_b	P_c	Ціна поділки шкали		
	Поділки									$C_u=$	$C_i=$	$C_w=$

Таблиця 1.2 – Визначення коефіцієнта трансформації

№ п/п	U_a	U_b	U_c	U_A	U_B	U_C	U_{20}
	$C_u=$			$C_u=$			$C_u=$

Для визначення кількості витків первинної і вторинної обмоток на один із стержнів трансформатора намотано додаткову обмотку, що має відому кількість витків $W_{доd} = 20$.

Трансформатор вмикають у мережу за схемою рисунку 1.1, встановлюють напругу приблизно $0,6U_{H\Phi}$ і вимірюють фазні напруги первинної і вторинної обмоток і напругу на виводах додаткової обмотки U_{20} .

Результати вимірювань заносять у таблицю 1.2.

1.2.5 У досліді КЗ обмотку ВН під'єднують через К-50 і ІР до мережі, а обмотку НН замикають накоротко.

За допомогою ІР підвищують напругу КЗ U_k до такого значення, щоб струм КЗ I_k дорівнював номінальному або був трохи більшим за нього. Заносять до таблиці 1.3 значення першої точки - U_k, I_k, P_k . Поступово знижуючи напругу, знімають показники 6-8 точок характеристики КЗ. Результати вимірювань заносять до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Дослідження короткого замикання

№ п/п	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C	Ціна поділки шкали		
	Поділки									$C_u =$	$C_i =$	$C_w =$

1.3 Методичні вказівки до опрацювання результатів дослідження

1.3.1 Зробити зовнішній огляд трансформатора з метою переконатися у його працездатності по виконанню роботи. З заводського щитка занести до протоколу дослідження номінальні дані трансформатора. Виконати ескіз магнітної системи.

1.3.2 З допомогою мегомметра виміряти опір ізоляції між обмотками і на корпус, а також опір ізоляції стяжних болтів на корпус.

1.3.3 Перерахувати опори обмоток до розрахункової температури 75 °С.

1.3.4 Розрахувати середні арифметичні значення напруги, струму, потужності:

$$U_{O\phi} = (U_a + U_b + U_c) \cdot C_u / 3; I_{O\phi} = (I_a + I_b + I_c) \cdot C_i / 3; P_0 = (P_a + P_b + P_c) \cdot C_w, \text{ а також}$$

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (3U_{O\phi} I_{O\phi}). \text{ Результати занести до таблиці 1.4.}$$

Таблиця 1.4 – Розрахункові величини дослідження НХ

№ п/п	$U_{O\phi}, B$	$I_{O\phi}, A$	$P_0, Вт$	$\cos \varphi_0$

На підставі отриманих даних побудувати характеристики НХ $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_0)$. При обґрунтуванні характеристик НХ варто звернути увагу на те, що залежність $I_0 = f(U_0)$ подібна магнітній характеристиці трансформатора або кривій намагнічування $H = f(B)$. Потужність, споживана Т при НХ, використовується в основному на магнітні втрати, а електричні втрати малі і ними нехтують. Магнітні втрати:

$$p_{me} \approx B^2 \approx \Phi^2 \approx U_0^2.$$

Зменшення $\cos \varphi_0$ у зв'язку із зростанням напруги пояснюється головним чином збільшенням реактивного струму намагнічування, який зростає швидше ніж потужність P_0 .

Зі схеми заміщення Т очевидно, що параметри НХ з достатньою точністю представляють параметри гілки намагнічування:

$$Z_0 \approx Z_M = U_{O\Phi} / I_{O\Phi}; r_0 \approx r_M = P_0 / (3I_{O\Phi}^2); x_0 \approx x_M = \sqrt{(Z_0^2 - r_0^2)}$$

Параметри Z_0, X_0 найбільш залежить від насичення осердя Т, помітно зменшуючись із зростанням напруги U_0 .

Розраховують середні значення коефіцієнта трансформації за даними вимірювань:

$$K_A = \frac{U_A}{U_a}; K_B = \frac{U_B}{U_b}; K_C = \frac{U_C}{U_c}; K_{CP} = \frac{K_A + K_B + K_C}{3}.$$

Кількість витків в обмотках визначають виходячи з таких формул:

$$\frac{U_A}{W_1} = \frac{U_{20}}{W_{\partial\partial\partial}}; \frac{U_a}{W_2} = \frac{U_{20}}{W_{\partial\partial\partial}},$$

де $W_{\partial\partial\partial}$ - кількість витків; U_{20} - напруга додаткової обмотки.

1.3.5 Розрахувати значення напруги, струму, потужності, коефіцієнта потужності за такими формулами:

$$U_{\kappa\phi} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} C_v; I_{\kappa\phi} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} C_i; P_k = (P_A + P_B + P_C) C_w;$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3U_{\kappa\phi} I_{\kappa\phi}}.$$

Результати занести до таблиці 1.5. На підставі отриманих даних побудувати характеристики КЗ: $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$.

Таблиця 1.5 – Розрахункові величини дослідження КЗ

№ п/п	$U_{\kappa\phi}, \text{В}$	$I_{\kappa\phi}, \text{А}$	$P_{\kappa\phi}, \text{Вт}$	$\cos \varphi_k$

Мале магнітне насичення магнітної системи трансформатора визначає лінійний характер $I_k = f(U_k)$, а $P_k = f(I_k)$ - має вид параболи, що у режимі КЗ є електричними втратами в обмотках.

З дослідження визначають параметри короткого замикання:

$$Z_k = \frac{U_{\kappa\phi}}{I_{\kappa\phi}}; r_k = \frac{P_k}{3I_{\kappa\phi}^2}; x_k = \sqrt{(Z_k^2 - r_k^2)}.$$

Дослідне значення r_k довести до температури 75 °C :

$$r_{k75} = r_k \frac{310}{235 + \theta},$$

Де θ - температура навколишнього середовища, °C. Потім уточнюють розрахункове значення $Z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}$. Обчислити величину U_k і її складові у відсотках від номінальної напруги тієї обмотки, з боку якої робили вимірювання під час дослідження КЗ:

$$U_{k75} = \frac{U_{\kappa\phi}}{U_{1\phi}} 100 = \frac{I_{1\phi} Z_{k75}}{U_{1\phi}} 100; \quad U_{ka75} = \frac{I_{1\phi} r_{k75}}{U_{1\phi}} 100;$$

$$U_{\kappa p 75} = \frac{I_{1\phi} X_k}{U_{1\phi}} 100.$$

Напруга КЗ нормальних силових трансформаторів складає (5...15)% і вказується на його щитку. За значенням цієї величини і її складових можна визначити зміну вторинної напруги і говорити про можливість паралельної роботи трансформаторів.

1.3.6 Визначити індукцію в стержні і ярмі:

$$B_{cm} = \frac{U_{\phi} 10^4}{4,44 f_1 s_{cm}}; \quad B_y = \frac{U_{\phi} 10^4}{4,44 f_1 s_y},$$

де $U_{\phi} = U_{1\phi} / W_1$ - напруга на один виток, В; $f_1 = 50$ Гц.

Питомі втрати в сталі трансформатора визначають як відношення потужності НХ при номінальній напрузі $P_{он}$ до маси магнітопроводу, Вт/кг:

$$P_{y\phi} = \frac{P_{он}}{G_{Fe}},$$

де $G_{Fe} = 3G_{cm} + 2G_y$; $G_{cm} = \mathcal{W}_{cm}$; $G_y = \mathcal{W}_y$; $\gamma = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{см}^3$; –питома щільність електротехнічної сталі.

1.3.7 ГОСТ 11677-85 рекомендує визначати ККД трансформатора непрямим методом за формулою, в.о.:

$$\eta = 1 - \frac{P_{он} + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_{он} + \beta^2 P_{кн}},$$

де S_n - номінальна потужність, ВА; β - коефіцієнт навантаження; $P_{он}$ - втрати в сталі, які дорівнюють потужності НХ при номінальній напрузі, Вт; $P_{кн}$ - електричні втрати в обмотках при номінальному струмі і $t = 75^\circ\text{C}$, Вт; $\cos \varphi_2$ - коефіцієнт потужності вторинної обмотки.

Якщо задатися рядом значень β від 0 до 1,25, можна одержати залежність $\eta = f(\beta)$ або $\eta = f(P_2)$.

1.3.8 З достатньою точністю зміну вторинної напруги можна визначити за формулою, %:

$$\Delta U = \beta(U_{a75} \cos \varphi_2 + U_{p75} \sin \varphi_2).$$

Задаючись відповідними струмами навантаження (коефіцієнтами навантаження β) і підрахувавши відсоткову зміну падіння напруги ΔU , можна визначити вторинну напругу, В:

$$U_2 = U_{2н} \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right).$$

За результатами розрахунків побудувати зовнішню характеристику $U_2 = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 1,0$ і $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Питання для самоконтролю

1. Що приймають за струм і втрати неробочого ходу? Де використовуються дані дослідження режиму неробочого ходу?
2. Що приймають за напругу і втрати короткого замикання? Де використовуються дані дослідження короткого замикання?
3. Нарисуйте схему і поясніть порядок проведення дослідження неробочого ходу. Як визначають коефіцієнт трансформації і кількість витків? Поясніть, чому струм неробочого ходу середньої фази менший за струми крайніх фаз?
4. Які показники визначені на заводському щитку трансформатора?

5. Проведіть аналіз характеристик неробочого ходу.
6. Нарисуйте схему і поясніть порядок проведення дослідження короткого замикання. Як визначаються параметри короткого замикання?
7. Проаналізувати характеристики короткого замикання.
8. Провести аналіз ККД трансформатора.
9. Чому ККД трансформатора при активно-індуктивному навантаженні менший, ніж при активному?
10. За яких умов ККД трансформатора досягає максимального значення?
11. Що таке зовнішня характеристика трансформатора? Проведіть її аналіз.

Лабораторна робота №2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ДВОХОБМОТКОВИХ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи – вивчити поняття групи з'єднання обмоток трансформатора /методику експериментального визначення групи/; правила вмикання і роботи при паралельному з'єднанні трансформаторів.

2.1 Програма проведення і опрацювання результатів досліджень

2.1.1 Ознайомитися з досліджуваними трансформаторами і записати до протоколу випробувань паспортні дані із заводських щитків.

2.1.2 Визначити групу з'єднання обмоток трансформатора при з'єднанні вторинної обмотки в «зірку» і «трикутник».

2.1.3 Зміною схеми з'єднання, маркування початків і кінців та перестановкою маркувань затискачів вторинної обмотки по колу одержати групи 8; 6; 2; 5; 11. Побудувати векторні діаграми лінійних ЕРС для вказаних груп з'єднання обмоток.

2.1.4 Зібрати схему вмикання (рисунок 2.3) трансформаторів і перевірити дотримання умов вмикання у паралельну роботу двох трансформаторів.

2.1.5 Зняти і побудувати зовнішні характеристики кожного трансформатора $U_{2I} = f(I_{2I})$ і $U_{2II} = f(I_{2II})$ та трансформаторів, що працюють паралельно $U_2 = f(I_{2H})$ для двох випадків: а) при однакових напругах КЗ; б) при різних напругах КЗ.

2.2 Методичні вказівки до проведення роботи

Роботу виконують одночасно дві бригади на різних робочих місцях: одна бригада визначає групу з'єднань обмоток трансформатора, а інша знімає зовнішні характеристики трансформаторів при їхній паралельній роботі. Після виконання своєї частини роботи бригади міняються робочими місцями.

2.2.1 Зробити зовнішній огляд трансформатора з метою переконатися у його працездатності по виконанню роботи. З заводського щитка занести до протоколу дослідження номінальні дані трансформатора.

2.2.2 Групу з'єднань можна визначити вимірюванням напруги між відповідними затискачами обмоток вищої (ВН) і низької (НН) напруг. Для цього з'єднують два однойменних затискачі, наприклад, A і a , трансформатор вмикають до мережі і вимірюють напруги $U_{AB}, U_{ab}, U_{bB}, U_{cC}, U_{bC}, U_{cB}$ (рисунок 2.1,а – для схеми $Y/Y - 0$ і рисунок 2.1,б – для схеми $Y/\Delta - 11$). Результати вимірів заносять до таблиці 2.1. Потім для визначення групи з'єднання обмоток користуються графічною побудовою. Для цього за трьома виміряними первинними лінійними напругами будують ΔABC . Побудову Δabc виконують таким чином. Вважають точку «а» сполученою з точкою A , оскільки затискачі A і «а» сполучені перемичкою. Точку «в» знаходять на перетині кіл, проведених із точок B і C , як із центрів радіусами, рівними відповідно виміряним напругам U_{bB} і U_{bC} , а точку «с» - на перетині кіл, проведених із тих же центрів радіусами, рівними відповідно виміряним напругам U_{bB} і U_{bC} , а точку «с» - на перетині кіл, проведених із тих же центрів радіусами, рівними відповідно виміряним напругам U_{cB} і U_{cC} .

Масштаб для побудови всіх напруг повинний бути узятий однаковим і достатньо великим для того, щоб одержати чітку графічну побудову.

Зразковий вид векторної діаграми ЕРС для визначення групи з'єднань обмоток ($Y/Y - 0$ і $Y/\Delta - 11$) показано на рисунку 2.2.

Група з'єднань визначається кутом, виміряним за годинниковою стрілкою між сторонами трикутників ABC і abc , що зображують однойменні лінійні напруги, наприклад, між сторонами AB і ab . Замість побудови векторних можна визначити групу з'єднань обмоток, порівнюючи виміряні напруги $U_{bB}, U_{cC}, U_{bC}, U_{cB}$ якщо вони попарно однакові або близькі між собою, то група з'єднань визначена правильно.

2.2.3 Залежно від схем (таблиця 2.1) з'єднання обмоток ВН і НН і способу маркування одержати інші групи. Дані вимірів занести до таблиці 2.1. У формулах (таблиця 2.1) коефіцієнт K_n визначають за формулою $K_n = U_{AB} / U_{ab}$, а напруга $U_2 = U_{ab}$.

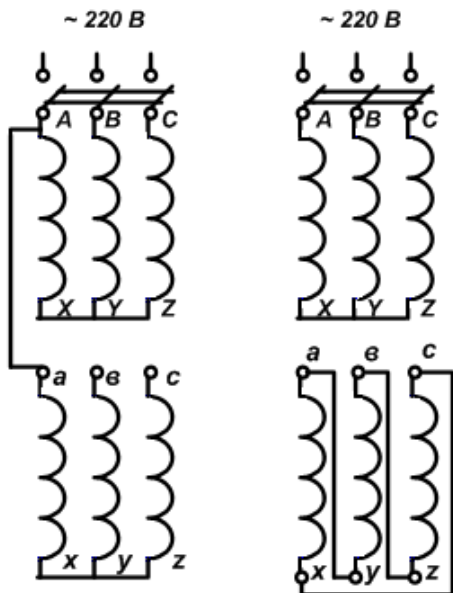


Рисунок 2.1- Схема дослідного визначення групи з'єднання

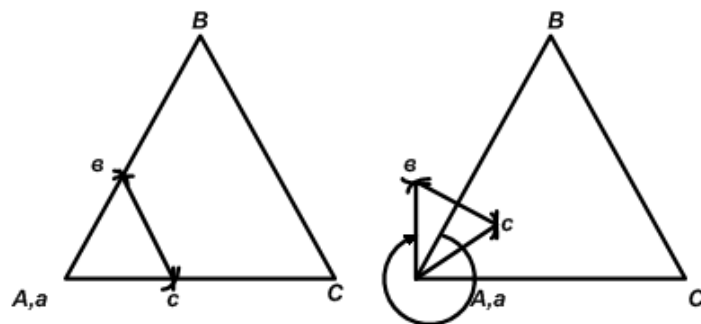


Рисунок 2.2- Діаграма лінійних ЕРС для визначення групи з'єднання

Для одержання інших груп з'єднання варто виконати перемаркування початків і кінців фаз вторинної обмотки. Зручно вирізувати з щільного паперу шість квадратиків із літерними позначеннями a, b, c, x, y, z . Якщо, наприклад, потрібно одержати групу 8, то попередньо розклавши квадратики так, щоб вони збігалися з маркуванням вторинної обмотки, варто пересунути їх циклічно проти годинникової стрілки (вліво), отримане розташування маркірованих квадратиків буде відповідати восьмій групі, якщо з'єднати кінці фаз x, y, z між собою і виконати перемичку між A і a .

Для одержання групи 2 потрібно в групі 8 поміняти маркування початків і кінців відповідних фаз. Після цього замкнути клеми x, y, z і з'єднати A і a . Зрозуміло, що виміри завжди виконуються за позначеннями, показаними на маркірованих квадратиках. Аналогічно можуть бути отримані всі інші групи, показані в таблиці 2.1.

2.2.4 Скласти схему відповідно до рисунку 2.3. На цій схемі показані такі елементи: $P1$ – рубильник, за допомогою якого подається живлення на первинні обмотки трансформаторів TrI і $TrII$; амперметри $A_{a1}, A_{b1}, A_{c1}, A_{aII}, A_{bII}, A_{cII}$ - для контролю фазних струмів трансформаторів TrI і $TrII$ відповідно; $P2$ – рубильник

для вмикання у паралельну роботу трансформаторів; амперметри A_{aH}, A_{bH}, A_{cH} - для контролю фазних струмів, що протікають по навантаженню R_H ; R_H - навантажувальний опір (регульована трифазна тумба, призначена для регулювання навантаження при паралельній роботі трансформаторів); V_2 - вольтметр, що використовується для контролю вихідної напруги U_2 ; V_0 - вольтметр, призначений для вимірювання напруг U_{bI-bII} і U_{cI-cII} на розімкнутих затискачах рубильника P_2 .

Правильність складання схеми (рисунок 2.3) і дотримання перших двох умов вмикання у паралельну роботу перевіряють у такий спосіб. При розімкнутому рубильнику P_2 , максимальному опорі R_H (у положенні « ∞ ») а також вже встановленій в схемі перемичці, що з'єднує клема a_1 - a_{II} подати живлення на первинні обмотки трансформаторів за допомогою рубильників P_1 .

Потім за допомогою тумблера, що розташований на випробувальному стенді, по черзі під'єднують вольтметр V_0 до клем $b_1 - b_{II}$ і $c_1 - c_{II}$ рубильника P_2 і перевіряють на них напруги U_{bI-bII} і U_{cI-cII} (рисунок 2.3). Ці напруги повинні дорівнювати нулю. Якщо напруги U_{bI-bII} і U_{cI-cII} не дорівнюють нулю (вторинні напруги на затискачах рубильника P_2 відрізняються по фазі), що може бути наслідком неправильного приєднання фаз обмоток до рубильників P_1 і P_2 , варто поміняти місцями дві фази одного з трансформаторів на рубильнику P_1 або P_2 після чого виміряти напруги знову.

2.2.5 Після перевірки умов вмикання для паралельної роботи двох трансформаторів замикають рубильник P_2 і приступають до зняття зовнішніх характеристик кожного трансформатора $U_{211} = f(I_{21})$ і $U_{211} = f(I_{211})$ та трансформаторів, що працюють паралельно $U_2 = f(I_{2H})$

для двох випадків:

а) усі три зовнішні характеристики знімаються одночасно. Струми вимірюються в трьох фазах кожного трансформатора і навантаження. За допомогою вольтметра V_2 вимірюють вторинну напругу U_2 . Характеристики бажано знімати, починаючи з НХ до номінального навантаження. Показання приладів занести до таблиці 2.2.


$$y$$

21

Таблиця 2.1 - Визначення груп з'єднань обмоток трансформатора

№ гр.	Схема з'єднання обмоток	Векторна діаграма лінійних ЕРС, Кутове зміщення ЕРС	U_{AB}		$U_{BB} = U_{CB}$		U_{CB}			
			В	В	ФОРМУЛА	Розрахунок	Дослід	ФОРМУЛА	Розрахунок	Дослід
1								$\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$		
2								$\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$		
3								$\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$		
4								$\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$		
5								$\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$		
6								$\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$		

Таблиця 2.2 – Зовнішні характеристики трансформатора

№ п/п	U_2 , В	Перший трансформатор TrI			Другий трансформатор TrII			Навантаження		
		I_{aI} , А	I_{bI} , А	I_{cI} , А	I_{aII} , А	I_{bII} , А	I_{cII} , А	I_{aH} , А	I_{bH} , А	I_{cH} , А

Питання для самоконтролю

1. Умови вмикання трансформаторів у мережу для паралельної роботи.
2. Що таке напруга короткого замикання?
3. Зазначте стандартні групи з'єднання.
4. Як визначити групу з'єднань обмоток трансформатора?
5. Як перевірити можливість вмикання трансформаторів у мережу для паралельної роботи?
6. Як розподіляється навантаження між паралельно працюючими трансформаторами: а) при дотриманні усіх умов; б) із неоднаковими напругами короткого замикання?
7. Чи можна увімкнути для паралельної роботи трансформатори із з'єднанням обмоток $Y / Y - 0$ і $Y / \Delta - 11$. Що при цьому відбуватиметься?
8. Як перемаркувати трансформатор групи $Y / Y - 2$ на $Y / Y - 0$; $Y / Y - 10$ на $Y / Y - 0$; $Y / \Delta - 7$ на $Y / \Delta - 11$?
9. Що називається зміною вторинної напруги?

Лабораторна робота №3. ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Мета роботи – провести дослідження, одержати параметри і характеристики асинхронного двигуна з фазним ротором.

3.1 Програма проведення досліджень

3.1.1 Ознайомитись з випробуванням агрегатом. Записати дані заводського щитка асинхронного двигуна і допоміжної машини.

3.1.2 Виміряти омичні опори обмоток статора і ротора асинхронного двигуна. Записати температуру навколишнього середовища.

3.1.3 Зібрати схему, яку представлено на рисунку 3.1. Записати дані вимірювальних приладів і іншої апаратури, що використовується під час роботи.

3.1.4 Визначити коефіцієнт трансформації.

3.1.5 Зняти характеристики неробочого ходу (НХ).
 $I_0, P_0, \cos \varphi_0, I_{0\mu}, P_{ct} + P_{mex} = (U_0)$.

3.1.6 Зняти характеристики короткого замикання (КЗ). $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$.

3.1.7 Зняти робочі характеристики. $I_1, P_1, n, \cos \varphi, M_2, s, \eta = f(P_2)$.

3.2 Програма опрацювання результатів досліджень

3.2.1 Виміряні опори обмоток статора і ротора привести до розрахункової робочої температури 75°C .

3.2.2 Обчислити коефіцієнт трансформації K_{12} .

3.2.3 На підставі дослідних даних побудувати характеристики НХ: $I_0, P_0, \cos \varphi_0, I_{0\mu}, P_{ct} + P_{mex} = (U_0)$. За кривою $I_{0\mu} = f(U_0)$ визначити коефіцієнт насичення. Розділити сумарні втрати $P_{ct} + P_{mex}$ на втрати в сталі і механічні. Визначити струм НХ у відсотках від номінального при $U_0 = U_H$.

3.2.4 На підставі дослідних даних побудувати характеристики КЗ: $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$. Обчислити і побудувати залежності $r_k, X_k, Z_k = f(U_k)$. Знайти напругу U_k на статорі у відсотках від номінальної, при якій струм статора дорівнює номінальному. Розрахувати кратність струму КЗ при номінальній напрузі.

3.2.5 На підставі дослідних даних побудувати робочі характеристики:
 $I_1, P_1, n, \cos \varphi, M_2, s, \eta = f(P_2)$.

3.3 Методичні вказівки до проведення досліджень

До п. 3.1.3 У схемі на рисунку 3.1 прийняті такі позначення:

- 1 – вимикач;
- 2 – індукційний регулятор (потенціал – регулятор);
- 3 – вимірювальний комплект К-50;
- 4 – обмотка статора асинхронного двигуна;
- 5 – обмотка якоря навантажувального генератора постійного струму;
- 6 – вимикач кола обмотки якоря;
- 7 – вимикач кола обмотки збудження;
- 8 - обмотка ротора асинхронного двигуна;
- 9 – пусковий реостат;
- 10 – навантажувальний реостат генератора (тумба);
- 11 – вимикач.

За наявності на робочому стенді монтажною схемою ідентифікувати її з принциповою схемою на рисунку 3.1.

До п. 3.1.4 У асинхронних машинах коефіцієнт трансформації прийнято визначити від обмотки ротора незалежно від їх номінальних напруг. Тому коефіцієнт трансформації може бути як більше, так і менше одиниці.

Для визначення коефіцієнта трансформації дослідним шляхом до обмотки статора при розімкнутій обмотці ротора підводиться напруга, близька до номінальної, та вимірюється на затискачах обох обмоток. Вірніше було б вимірювати фазні напруги, але тому що нульова точка обмотки ротора звичайно недоступна, а нульова точка обмотки статора доступна не завжди, тому обмежуються виміром лінійних напруг обох обмоток.

За дійсне значення коефіцієнта трансформації приймається відношення середніх арифметичних з вимірянних значень напруги статора U_1 та ротора U_2 :

$$K_{12} = \frac{U_1}{U_2}.$$

До п. 3.1.5 Під неробочим ходом розуміють роботу двигуна, увімкненого до мережі і не з'єднаного з виробничим механізмом.

В умовах навчальної лабораторії для навантаження двигуна застосовується навантажувальний генератор постійного струму. Тому НХ двигуна може бути здійснений, якщо демонтувати з'єднувальну муфту на валу, для чого обов'язково повинен бути дозвіл викладача. Тому що ця операція потребує участі обслуговуючого персоналу і займає багато часу, припускається при проведенні дослідження муфту не розбирати. У цьому випадку навантажувальний генератор не збуджується і його якірні обмотки розімкнуті. Значить, досліджуваний асинхронний двигун буде нести невелике навантаження, що відповідає механічним втратам навантажувального генератора.

Для проведення дослідження складається схема (рисунок 3.1). Обмотка статора 4 двигуна приєднується до джерела живлення вимикачем 1 через індукційний регулятор (потенціал-регулятор) 2, що служить для зміни напруги на затискачах обмотки статора. В коло ротора 8 вмикається пусковий реостат 9, а також амперметр АЗ для визначення ковзання.

Пуск двигуна провадиться без навантаження на валу. Після цього, піднявши напругу на затискачах двигуна індукційним регулятором до $1,3 U_{нф}$, роблять перший запис таких величин: підведеної фазної напруги для кожної фази, струму статора в кожній фазі, споживаної потужності. Подальші записи роблять поступово знижуючи напругу індукційним регулятором до можливо низьких значень. При зниженій напруги статора помітно починає зростати ковзання. Збільшення струму ротора, спричинене збільшенням ковзання, обумовлює підвищення струму в обмотці статора. Це явище і ставить нижню межу напруги в досліді НХ.

Показання вимірювальних приладів, що отримані в процесі проведення дослідження, заносять до таблиці 3.1.

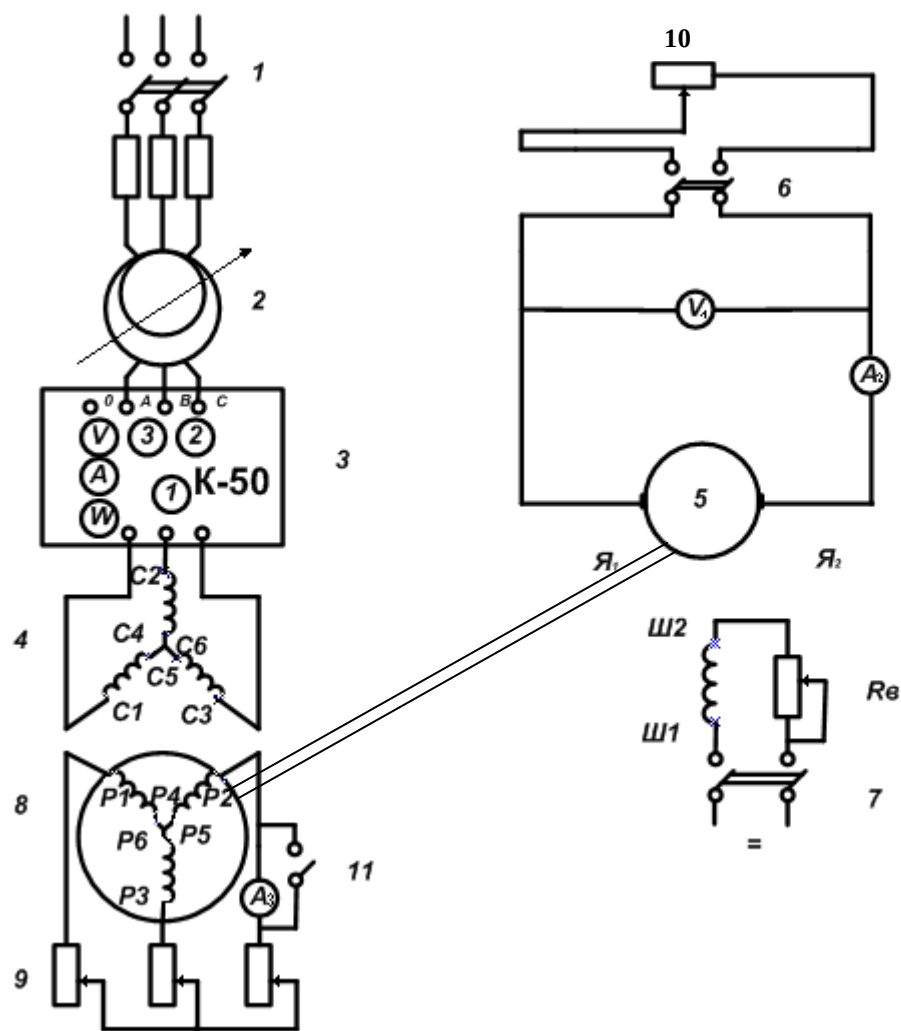


Рисунок 3.1 – Схема дослідження АД з фазним ротором

Таблиця 3.1 – Дослід неробочого ходу

№ п/п	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C
	Поділки			Поділки			Поділки		
	$C_V =$			$C_I =$			$C_W =$		

До п. 3.1.6 Під час дослідження КЗ асинхронного двигуна припускається живлення обмотки статора при замкненому накоротко і загальмованому роторі. Якщо за таких умов до затискачів двигуна підвести номінальну напругу, він буде споживати струм у декілька разів перевищуючий номінальний. При цьому ізоляція обмоток перегрівається.

Під час проведення досліджень варто обмежуватися такою напругою, при якій струм КЗ не перевищує 1,5 – 2,0 номінального.

Схема з'єднання двигуна залишається такою ж, як і для досліду НХ, з тією лише різницею, що ротор повинен бути замкнутий накоротко і загальмований за

допомогою важеля, а межу вимірювання приладів потрібно змінити відповідно до очікуваного струму і напруги. При користуванні комплексом вимірювальних приладів К-50 може виявитися, що мінімальна межа вимірювання вольтметра, що входить у комплект, буде занадто велика для вимірювання підведеної напруги. У цьому випадку варто взяти окремий вольтметр з межею, що підходить для вимірювання, і вимірювати тільки одну напругу між будь-якими двома лінійними за- тискачами обмотки статора. Результати вимірювань занести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Дослід короткого замикання

№	U_K	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C
п/п	Поділки	Поділки			Поділки		
	$C_V =$	$C_I =$			$C_W =$		

До п. 3.1.7 Під робочими характеристики асинхронного двигуна розуміють залежності ряду величин від корисної потужності на валу. Це характерні для умов експлуатації: споживана потужність і струм, ковзання, момент на валу двигуна, ККД і коефіцієнт потужності за умови незмінності прикладеної напруги і частоти.

У лабораторних умовах навантаження двигуна здійснюється за допомогою спареного з ним генератора постійного струму.

Проводиться реостатний пуск двигуна від мережі, для чого зі схеми вилучається потенціал-регулятор.

Після закінчення пуску асинхронного двигуна збуджують до номінальної напруги навантажувальний генератор, завантажують двигун до навантаження, що відповідає споживаному ним струму $I_1 \approx I, 2I_H$. Після цього роблять перший запис показань приладів. Потім поступово розвантажують двигун до НХ, записуючи показання вимірювальних приладів. Для кожної точки повинні бути отримані дані, які потрібні для визначення ковзання методом амперметра постійного струму. В коло однієї з фаз ротора вмикають магнітоелектричний амперметр з нулем посередині шкали (безпосередньо або за допомогою шунта в залежності від номінальних струмів ротора). Частота струму обертового ротора мала, тому стрілка

амперметра буде коливатися в такт коливань струму. Якщо відрахувати кількість повних коливань ν стрілки за час t с. (за допомогою секундоміру), то ковзання: $S = \nu / f_{1t} * 100(\%)$, де f_1 - частота струму статора.

При $f_1 = 50$ Гц, маємо: $S = 2\nu / t$ (%). Дані вимірювань заносять до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Дослідження навантаження АД

№ п/п	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C	P _A	P _B	P _C	v	t
										Кол.	с
	C _V =			C _I =			C _W				

3.3 Методичні вказівки до опрацювання та аналізу дослідних даних

До п.3.2.3 Коефіцієнт потужності визначається за формулою:

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0}.$$

Щоб надалі мати можливість розділити втрати в сталі статора і механічні, потрібно від потужності P_0 відняти електричні втрати статора $3I_{0\phi}^2 r_1$:

$$P_{cm} + P_{mex} = P_0 - 3I_{0\phi}^2 r_1.$$

Індуктивна складова струму НХ $I_{0\mu} = I_0 \sin \phi_0$.

Обчислені дані заносять до таблиці 4.4.

За даними таблиці 4.4 будують характеристики НХ:

$$I_0 = f(U_0), P_0 = f(U_0), \cos \phi_0 = f(U_0), I_{0\mu} = f(U_0), P_{cm} + P_{mex} = f(U_0).$$

Характеристики варто будувати у відносних одиницях, причому за одиничні значення напруги, струму і потужності приймають відповідно номінальну напругу, струм і потужність двигуна.

Крива $I_{0\mu} = f(U_0)$ має типовий вигляд кривої намагнічування. За цією кривою потрібно визначити коефіцієнт насичення магнітного кола. Механічні втрати і втрати у сталі можуть бути визначені екстраполяцією кривої $P_{cm} + P_{mex} = f(U_1)$ на нульову напругу.

Таблиця 3.4 – Визначення параметрів НХ

№ п/п	U_0		I_0		P_0		$3I_{0\phi}^2 r_1$		$p_{ст}+p_{мех}$		$\cos \varphi_0$	$I_{0\mu}$	
	В	в.о.	А	в.о.	Вт	в.о.	Вт	в.о.	Вт	в.о.		А	в.о.

Для більш зручної екстраполяції криву втрат варто побудувати у функції квадрата напруги. Внаслідок майже точної квадратичної залежності втрат у сталі від напруги дослідні точки розташовуються на прямій (рисунок 3.2).

Продовживши отриману пряму до перетину з віссю ординат, знаходять значення aO , що дорівнює механічним втратам двигуна та генератора, тому що при напрузі, рівній нулю, потік, а виходить, і втрати в сталі також дорівнюють нулю.

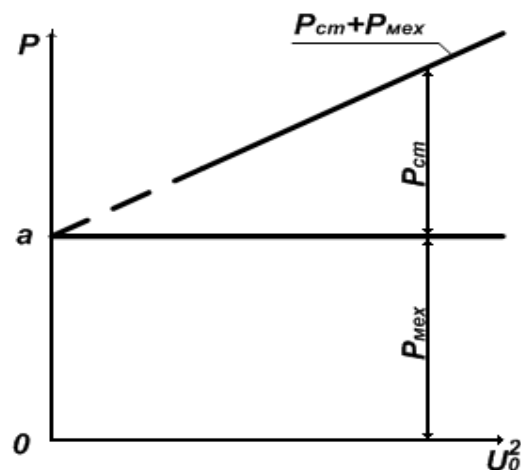


Рисунок 3.2

Якщо з точки a провести пряму, паралельну вісі абсцис, то при заданій напрузі U_0 ордината, укладена між цією прямою і графіком $P_{ст} + P_{мех}$ дасть величину втрат у сталі, а розмір $P_{мех}$ втрат механічних визначається ординатою aO .

Якщо під час дослідження навантажувальний генератор не був механічно роз'єднаний із випробуваним двигуном, знайдене $P_{мех}$ буде містити в собі також і механічні втрати навантажувального генератора.

До п. 3.2.4 Після визначення коефіцієнта потужності знаходять параметри КЗ:

а) повний опір КЗ при з'єднанні обмоток зіркою:

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_k},$$

або трикутником:

$$Z_k = \frac{\sqrt{3}U_k}{I_k};$$

б) активні та індуктивні опори:

$$r_k = Z_k \cdot \cos \phi_k;$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin \phi_k.$$

Обчислені дані КЗ заносять до таблиці 3.5, на підставі яких будуються характеристики КЗ.

Таблиця 3.5 – Визначення параметрів КЗ

№ п/п	U _к		I _к		P _к		Z _к	r _к	x _к	cos φ _к
	В	в.о.	А	в.о.	Вт	в.о.	Ом	Ом	Ом	

Вигляд характеристик багато в чому залежить від форми і розмірів пазів статора і ротора. Якщо двигун має відкриті або напіввідкриті пази, можна вважати, що потоки розсіювання статора і ротора розподіляються в середовищі з постійною магнітною проникністю і тому індуктивний опір $X_k \approx const$. При постійній частоті і заданій температурі маємо $r_k = const$. Звідси випливає, що $Z_k = const$ і залежність $I_k = f(U_k)$ є пряма, що виходить з початку координат. Відповідно:

$$\cos \phi_k = \frac{r_k}{Z_k} = f(U_k) \approx const,$$

а крива $P_k = f(U_k)$ практично є парабола.

Якщо характеристика $I_k = f(U_k)$ практично має вигляд прямої, що виходить з початку координатної системи, струм КЗ при номінальній напрузі:

$$I_{кн} = I_k \frac{U_H}{U_k}.$$

При номінальній напрузі потужність КЗ:

$$P_{кн} = P_k \left[\frac{I_{кн}}{I_k} \right]^2.$$

До п. 3.2.5 За розрахункові значення напруги U_1 на затискачах двигуна і струму I_1 статора приймають середнє арифметичне трьох виміряних значень. Споживана потужність, що підводиться до двигуна, визначається як алгебраїчна сума показань ватметрів, помножена на ціну поділок шкали ватметра C_w .

Коефіцієнт потужності визначається за формулою $\cos \varphi = P_1 / (\sqrt{3} U_1 I_1)$ ковзання – відповідно до викладеного вище.

Одним із найважливіших результатів опрацювання даних проведеного дослідження навантаження є визначення ККД двигуна методом окремих втрат, що рекомендується стандартами для двигунів із ККД більш 10%.

Спосіб підрахунку ККД ґрунтується на таких підставах. Включений у мережу двигун споживає під навантаженням потужність P_1 . У статорі частина цієї потужності витрачається на покриття втрат у сталі, електричні втрати в обмотках статора і на додаткові втрати. Інша потужність (електромагнітна) магнітним полем передається ротору. Тут відбувається її подальше зменшення за рахунок електричних втрат в обмотках ротора, додаткових втрат у роторі. Залишок потужності перетвориться у механічну потужність, від якої варто відняти механічні втрати двигуна. Інша механічна потужність передається на вал і є корисною потужністю двигуна.

Окремі втрати визначаються таким чином:

а) втрати в обмотці статора визначаються з виразу:

$$P_{m1} = 3 I_{1\phi}^2 \cdot r_{1(75)},$$

де $I_{1\phi}$ - фазний струм двигуна; $r_{1(75)}$ - опір однієї фази статора при розрахунковій робочій температурі 75°C;

б) втрати в сталі p_{cm} і механічні p_{mex} визначаються окремо за даними досліджу

НХ для напруги, що мала місце при знятті робочих характеристик. При цьому приймається, що в межах зміни навантажень від НХ до номінальної справедлива рівність:

$$p_{cm} + p_{mex} = const.$$

Електромагнітна потужність визначається як різниця між підведеною потужністю і втратами в статорі:

$$P_{em} = P_1 - p_{M1} - p_{cm};$$

в) втрати в обмотці ротора визначаються за виміряними під час дослідження навантаження значеннями ковзання й електромагнітної потужності:

$$p_{M2} = P_{em} S/100,$$

де S – ковзання,%;

г) додаткові втрати при номінальному режимі можуть бути прийняті $p_{dn} = 0,005 P_{1n}$,

а при іншому режимі, відмінному від номінального, $P_d = 0,005 P_{1n} (I_1/I_{1N})^2$

Таблиця 3.6 - Робочі характеристики АД

Корисна (що віддається) потужність двигуна визначається як різниця між підведеною потужністю і сумою всіх вказаних втрат:

$$P_2 = P_1 - \sum p = P_1 - (p_{M1} + p_{cm} + p_{M2} + p_{mex} + p_d).$$

ККД двигуна:

$$\eta = (1 - \sum p/P_1) * 100\%$$

Частота обертання ротора $n = n_1 (1-S)$,

№ п/п	U ₁		I ₁		P ₁		cosφ	S	n		P _{M1}	P _{M2}	P _д	Σp	P ₂	M ₂	η
	В	В.О.	А	В.О.	Вт	В.О.	В.О.	%	Об/хв	В.О.	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Нм	%

де n_1 - синхронна частота обертання; S – ковзання, в.о.

Корисний момент на валу двигуна:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega}; \quad \Omega = \frac{\pi n}{30},$$

де P_2 - вимірюється у ватах; n – в обертах на хвилину. Результати опрацювання дослідних даних заносять до таблиці 3.6

За даними таблиці 3.6 будують робочі характеристики. При їх аналізі варто врахувати, що в асинхронному двигуні живлення до обмотки ротора не підводиться і вона в робочому режимі замкнена накоротко. З ростом навантаження на валу двигун повинен розвинути більший електромагнітний момент:

$$M_{EM} = C_M \Phi I_{2a}.$$

Оскільки при $U_1 = \text{const}$ магнітний потік змінюється незначно, то збільшення моменту відбувається за рахунок зростання струму ротора, що можливо тільки при збільшенні індукованої ЕРС у роторі. Враховуючи те, що при $f_1 = \text{const}$ частота обертання ротора повинна зменшуватися, це означає збільшення відносної швидкості поля стосовно ротора, а значить, індуквання більшої ЕРС.

Питання для самоконтролю

1. Що таке ковзання асинхронної машини?
2. При яких ковзаннях асинхронна машина працює в режимі двигуна?
3. За яким методом визначається ковзання? Суттєвість методу.
4. Як здійснюються режими НХ асинхронної машини при нерухомому та обертуючомуся роторі?
5. Чим відрізняється режим НХ нерухомої асинхронної машини від режиму НХ трансформатора?
6. З якою метою в обмотку фазного ротора двигуна при пуску вмикають реостат?
7. У чому полягає різниця і що спільного у характеристиках КЗ асинхронної машини і трансформатора?
8. Поясніть характеристики НХ $\cos \varphi_0$, P_0 , I_0 .
9. Поясніть характеристики КЗ $\cos \varphi_k$, P_k , I_k .
10. Чому при збільшенні навантаження на валу асинхронної машини її частота обертання зменшується?
11. Як пояснити залежність $\cos \varphi = f(P_2)$?

12. Чому з ростом навантаження двигуна збільшуються споживання з мережі струму I_1 і потужності P_1 ?
13. Яким чином визначається корисна потужність P_2 на валу асинхронного двигуна ?
14. Чому нехтують втратами в сталі ротора асинхронного двигуна в номінальному режимі?
15. Чому в асинхронному двигуні створюється обертовий момент, а в трансформаторі – не створюється?

Лабораторна робота №4. ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ У РЕЖИМАХ ДВИГУНА ТА ГЕНЕРАТОРА

Мета роботи – провести дослідження, одержати параметри і характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у режимах двигуна та генератора.

4.1 Програма проведення досліджень

4.1.1 Ознайомитися з випробуваним агрегатом. Записати дані заводського щитка асинхронної та допоміжної машин.

4.1.2 Виміряти омичні опори обмотки статора. Виміряти температуру навколишнього середовища.

4.1.3 Зібрати схему, зображену на рисунок 4.1. Записати дані вимірювальних приладів і іншої апаратури, яка використовується у схемі.

4.1.4 Зняти характеристику НХ у режимі двигуна $I_0, P_0, \cos \varphi_0, I_{0\mu}, P_{ст} + P_{мех} = f(U_0)$.

4.1.5 Зняти робочі характеристики асинхронної машини для режимів двигуна і генератора. $I_1, P_1, n, \cos \varphi, M_2, s, \eta = f(P_2)$.

4.2. Програма опрацювання результатів досліджень

4.2.1 Вимірний опір обмотки статора привести до розрахункової робочої температури 75°C.

4.2.2 На підставі дослідних даних побудувати характеристики НХ: $I_0, P_0, \cos \varphi_0, P_{ст} + P_{мех} = f(\varphi_0)$ Розділити сумарні втрати $P_{ст} + P_{мех}$ на втрати в сталі і механічні.

4.2.3 На підставі дослідних даних побудувати робочі характеристики для режимів роботи двигуна і генератора асинхронної машини: $I_1, P_1, \cos \varphi, \eta, S, n, M_2 = f(P_2)$ при $U_1 = U_{1н} = const, f_1 = f_{1н} = const$

Визначити гістерезисний стрибок при переході асинхронної машини з режиму двигуна у генераторний і навпаки.

4.3 Методичні вказівки до проведення досліджень

До п. 4.1.3 Складається схема, яка показана на рисунку 4.1.

За наявності на робочому стенді монтажною схемою зробити її ідентифікацію і принциповою схемою на рисунку 4.1.

До п. 4.1.4 Методика проведення дослідження НХ така, як і для двигуна з фазним ротором.

До п. 4.1.5 Провести прямий пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, захистивши при цьому вимірювальні прилади комплексу К-50. До приєднання машини 5 до мережі постійного струму треба перевірити та забезпечити умови вмикання її на паралельну роботу: однакові полярності і напруги на затискачах машини й мережі. Перевірка проводиться за допомогою вольтметра V_2 що вмикається по черзі до машини 5 і до мережі рубильниками 6 і 7. Переконавшись у тому, що умови паралельної роботи дотримані, машину постійного струму 5 вмикають до мережі, замкнувши рубильники 6 і 7.

Машина постійного струму відіграє роль навантажувального генератора і віддає потужність у мережу постійного струму при роботі асинхронної машини в режимі двигуна, і, навпаки, під час роботи асинхронної машини в генераторному режимі, машина постійного струму відіграє роль двигуна, що обертає асинхронний генератор, і споживає потужність із мережі постійного струму.

Зміна навантаження асинхронної машини проводиться зміною струму паралельної обмотки збудження машини постійного струму. Якщо машину постійного струму, увімкнену паралельно до мережі, збуджувати так, щоб ЕРС її стала більше, ніж напруга цієї мережі, то вона буде працювати як генератор, а асинхронна машина у даному випадку – двигуном. Якщо, навпаки, збудження цієї ж машини постійного струму зменшиться так, щоб ЕРС її була менше за напруги мережі, то вона буде працювати як двигун і може прискорювати ротор асинхронної машини до частоти обертання, що перевищує синхронну. При такій частоті обертання ротора асинхронної машини її ковзання стає негативним, і механічна енергія з валу

машини передається обертовим магнітним полем на статор, а відтіля у формі електричної енергії до мережі, тобто асинхронна машина переходить у генераторний режим. При цьому намагнічуючий струм, потрібний для створення магнітного потоку генератора, як і в режимі двигуна, надходить із зовнішньої мережі.

До п.4.1.5 Зняття робочих характеристик починають із режиму двигуна при перевантаженні за струмом не менше 10% номінального. Для цього після закінчення пуску агрегату і вмиканні до мережі машини постійного струму збільшують збудження її доти, доки струм статора асинхронної машини не перевищить на 10% номінальне значення. Після цього роблять перший запис показань приладу. Потім, зменшуючи збудження машини постійного струму, плавно змінюють навантаження асинхронної машини, переводячи її з режиму двигуна в генераторний також до перевантаження струму статора не менше ніж на 10%. При цьому записують 5-6 показань приладів для кожного режиму: фазних напруг і лінійних струмів, а також потужності на затискачах статора асинхронної машини, напруги, струму у якорі і струму збудження машини постійного струму, у кожній точці роблять виміри, необхідні для визначення ковзання стробоскопічним методом.

Для вимірювання ковзання за цим методом, придатним для асинхронних машин усіх типів, на кінець вала двигуна має бути насаджений диск, розділений на чорні і білі сектори, що чергуються.

Диск освітлюють світлом неонові лампи, увімкненої до мережі, що живить двигун. Якби ротор двигуна обертався із синхронною частотою, чорний сектор залишався б нерухомим. Якщо машина має не одну пару полюсів, а p пар, то при синхронній частоті обертання за один відлічений оборот сектора ротор устигне повернутися на $1/p$ оберту. Внаслідок цього сектор буде здаватися спостерігачу помноженим в p разів, тобто буде видно не один, а p сектори. Звичайно, на диску кількість секторів виконується рівним числу пар полюсів.

Порахувавши число повних обертів ν чорного сектора за час t с, отримаємо ковзання: $S = (\rho\nu / f_1 t) 100\%$ або при $f_1 = 50$ Гц:

$$S = \frac{2\nu p}{t} [\%].$$

Потрібно пам'ятати, що існують і кратні стробоскопічні картини, що можуть привести спостерігача до помилкового висновку про частоту обертання випробу-

ваної машини. Так якщо частота спалахів джерела світла в m разів менша за частоту обертання ротора, спостерігач буде бачити також одне нерухоме зображення, але за меншій освітленості.

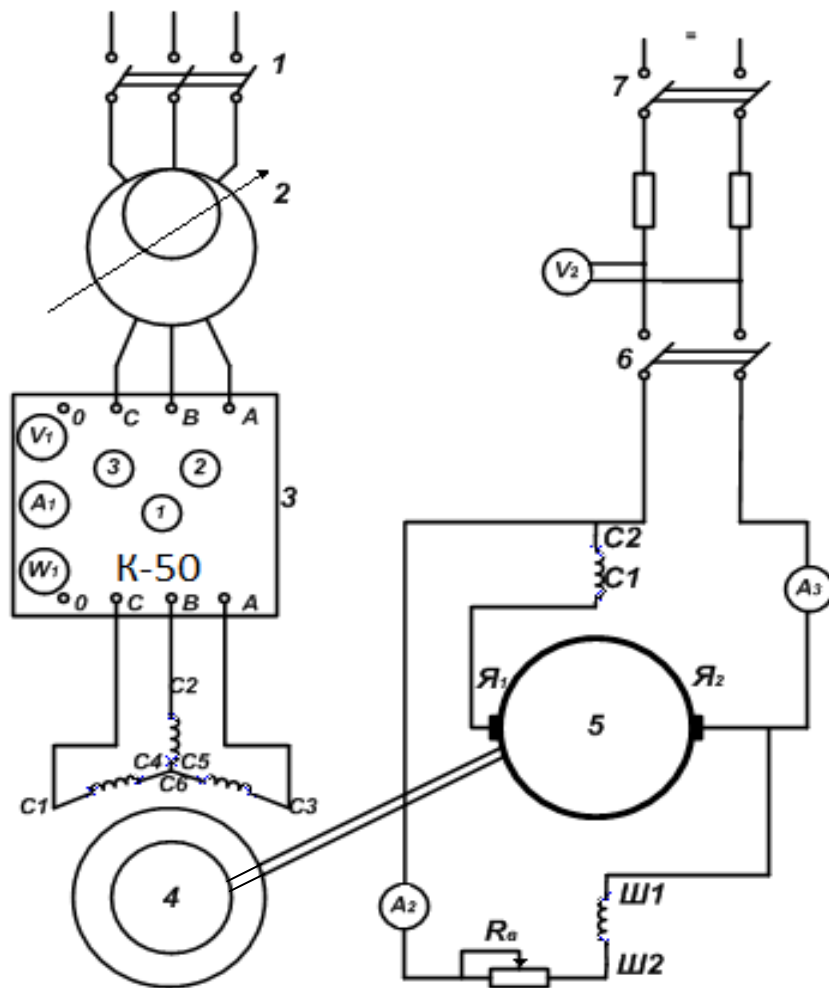


Рисунок 4.1 – Схема дослідження асинхронної короткозамкненої машини в режимах двигуна і генератора

- 1 – вимикач;
- 2 – індукційний регулятор (потенціал - регулятор);
- 3 – вимірювальний комплект К-50;
- 4 – обмотка ротора асинхронного двигуна;
- 5 – обмотка якоря навантажувального генератора постійного струму;
- 6 – вимикач кола обмотки якоря ;
- 7 – вимикач.

Якщо частота спалахів джерела світла в m разів більша за частоту обертання ротора, спостерігач побачить не одне, а m нерухомих зображень.

Отже, відліки достовірні, якщо спостерігач бачить одне найбільш яскраве нерухоме зображення.

При переході з режиму двигуна в генераторний потрібно записати такі характерні точки:

а) НХ асинхронного двигуна, коли струм якоря машини постійного струму дорівнює нулю;

б) ідеального НХ асинхронної машини, коли ковзання дорівнює нулю (нерухома стробоскопічна картина), а струм статора мінімальний.

Ідеальний НХ може бути отриманий як із боку двигуна ($S = 0$ при $+S \rightarrow 0$) так і з боку генераторного ($S=0$ при $-S \rightarrow 0$) режиму роботи. Варто зробити обидва виміри в режимі ідеального НХ. Ці виміри дозволяють визначити гістерезисний стрибок. Дані вимірювань заносять до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Дослід навантаження АД

№ п/п	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C	P _A	P _B	P _C	v	t	Машина пост. струму		
	C _V =			C _I =			C _W =			об	с	U _a	I _a	i _f
	поділки			поділки			поділки					C _V	C _I	C _I

4.4 Методичні вказівки до опрацювання та аналізу дослідних даних

До п.4.2.2 Методика опрацювання даних дослідів НХ така ж, як і для двигуна з фазним ротором (підрозділ 3.4, до п.3.2.3).

До п. 4.2.3 Дослідні дані, потрібні для побудови робочих характеристик, опрацьовуються так само, як і для асинхронного двигуна з фазним ротором (підрозділ 3.4, до п. 3.2.5).

Результати опрацювання дослідних даних заносять до таблиці 4.2. У генераторному режимі підведеною потужністю P_1 є потужність, одержувана генератором з вала, а корисною потужністю P_2 - потужність, виміряна ватметрами на затискачах статора. Отже, для підведеної до асинхронного генератора потужності з боку вала маємо: $P_1 = P_2 + \Sigma p$, де P_2 - потужність, виміряна ватметрами на затискачах статора (корисна потужність генератора).

Таблиця 4.2 – Робочі характеристики АД

№ п/п	Асинхронна машина										Машина пост. струму							
	U ₁		I ₁		P ₁		Cosφ		S	n	P ₂		η	M ₂	U _A	I _A	i _f	
	B	В.О.	A	В.О.	Вт	В.О.	В.О.		%	об/хв	В.О.	Вт	В.О.	%	Нм	В	A	A

Для генераторного режиму робочі характеристики будують залежно від потужності P_2 на затискачах. ККД визначається за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p}.$$

Сумарні втрати визначаються, як і для режиму двигуна. Але при цьому потрібно враховувати, що електромагнітна потужність асинхронного генератора більша за потужність, вимірюваної на затискачах статора (корисної) на розмір втрат у статорі і визначається так: $P_{em} = P_2 + p_{m1} + p_{cm}$.

Це варто враховувати при занесенні вимірювань до таблиці 9.2, в якій величини, що відносяться до асинхронної машини, позначені для режиму двигуна.

Гістерезисний стрибок визначається як різниця потужностей, споживаних асинхронною машиною в режимі ідеального НХ при переході з режиму двигуна в генераторний і з генераторного в режим двигуна.

Характеристики асинхронної машини потрібно побудувати на одному графіку, справа від осі ординат – для режиму двигуна, зліва – для генераторного.

Питання для самоконтролю

1. Які переваги і недоліки має асинхронний двигун із КЗ ротором у порівнянні з двигуном з фазним ротором?
2. За яким методом визначається ковзання двигуна в цій роботі?
3. Як здійснити пуск двигуна з КЗ ротором?
4. Як змінити напрямок обертання двигуна?

5. У чому різниця між режимами реального та ідеального НХ асинхронного двигуна?

6. Як асинхронний двигун, увімкнений до мережі, може бути переведений у генераторний режим?

7. При яких ковзаннях асинхронна машина працює в режимі генератора?

8. Переваги і недоліки асинхронного генератора.

9. Звідкіля надходить і як витрачається енергія асинхронної машини в режимі генератора?

10. У який спосіб визначається потужність P_1 , що підводиться, у генераторному режимі?

Див. Також питання для самоконтролю 1, 2, 7, 8, 10, 11, 13 до роботи «Дослідження асинхронного двигуна з фазним ротором».

Лабораторна робота №5. ВИПРОБУВАННЯ ТРИФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

Мета| роботи _ експериментально визначити основні експлуатаційні характеристики синхронного генератора, що працює в автономному режимі; вивчити вплив реакції якоря і характеру навантаження; ознайомитися з основними методами регулювання синхронного генератора в автономному режимі роботи.

5.1 Програма роботи

5.1.1 Ознайомитися з даними заводських щитків синхронного генератора і привідного двигуна постійного струму досліджуваного агрегату і записати їх в робочий зошит.

5.1.2 Визначити на стенді місцеположення вимірювальних приладів, навантаження, пускового і регулювальних реостатів, що відносяться до даної схеми; переписати дані вимірювальних приладів з вказівкою цін поділок шкали кожного вимірювального приладу. Особливу увагу слід звернути на схему з'єднання обмоток машини (Y або Δ) і на позначення на комплекті вимірювальних приладів: фазну або лінійну напругу мережі він вимірює.

5.1.3 Зібрати схему згідно рисунку 5.4.

5.1.4 Зняти і побудувати зовнішні характеристики $U_a = f(I_a)$ при

$$f = f_H = \text{const} \quad \text{і} \quad I_{\text{всг}} = \text{const} :$$

а) при чисто активному навантаженні $-\cos\varphi = 1,0$;

б) при змішаному навантаженні $-\cos\varphi = 0,707$ (активна і реактивна складові струму якоря рівні $I_{a_{\text{акт}}} = I_{a_{\text{реакт}}}$);

в) (по вказівці викладача) – при чисто індуктивному навантаженні $-\cos\varphi \approx 0$.

5.1.5 Зняти і побудувати регулювальні характеристики

$$I_{\text{в}} = f(I_a) \text{ при } f = f_H = \text{const} \text{ і } U_a = U_{a_{\text{ном}}} = \text{const} :$$

а) при чисто активному навантаженні $-\cos\varphi_2 = 1,0$;

б) при змішаному навантаженні $-\cos\varphi_2 = 0,707$.

5.1.6 Зняти і побудувати характеристику короткого замикання $I_a = f(I_{\phi})$ $U_a = 0$ і $f = f_n = const$.

5.1.7 Зняти і побудувати характеристику неробочого ходу $E_a = f(I_{\phi})$ при $I_a = 0$ і $f = f_H = const$.

5.1.8 Зняти і побудувати індукційну навантажувальну характеристику $U_a = f(I_{\phi})$ при $I_a = 0.5I_{ан} = const$.

5.1.9 За даними дослідів побудувати характеристичний трикутник.

5.2 Загальні методичні вказівки по проведенню роботи

У синхронному генераторі електромагнітна система збудження, що живиться від джерела постійного струму, знаходиться на роторі. На статорі (якорі) розташована трифазна обмотка змінного струму. Магнітні опори по подовжній осі d і поперечній осі q обертаючої системи збудження в неявнополюсній конструкції однакові; у явнополюсній конструкції вони різні, це викликає необхідність роздільного обліку по осях відповідних значень струмів I_{ad} і I_{aq} , ЕРС E_{ad} і E_{aq} і еквівалентних їм індуктивних опорів X_{ad} і X_{aq} .

Вивчення основних властивостей і характеристик зручніше почати з попереднього розгляду моделі ідеального генератора, принципово відповідного реальному, але поки без урахування другорядних чинників. У ідеальному генераторі: 1) активний опір фази обмотки статора (якорі) r_a і індуктивний опір розсіювання $X_{\sigma a}$ обмотки якоря дорівнюють нулю; 2) магнітні зв'язки лінійні.

При обертанні ротора з частотою обертання n і протіканні по його обмотці струму збудження I_b , в якірній обмотці наводиться основна ЕРС E_o , що змінюється з частотою $f = \frac{pn}{60}$. У режимі неробочого ходу напруга генератора визначається тільки основною ЕРС E_o .

У режимі навантаження струм I_a , що протікає по обмотці якоря, створює МРС якоря F_a і відповідний магнітний потік

$$\Phi_a = \frac{F_a}{Z_M} = \frac{I_a W_a}{Z_M},$$

який наводить в обмотці якоря ЕРС

$$\underline{E}_a = -j \underline{I}_a X_a.$$

У неявнополюсній конструкції результуючі значення взаємодіючих МРС, потоків і відповідних ЕРС

$$\underline{F}_{рез} = \underline{F}_o + \underline{F}_a,$$

$$\underline{\Phi}_{рез} = \underline{\Phi}_o + \underline{\Phi}_a,$$

$$\underline{U}_a = \underline{E}_{рез} = \underline{E}_o + \underline{E}_a = \underline{E}_o - j \underline{I}_a X_a.$$

У явнополюсній конструкції

$$\underline{U}_a = \underline{E}_{рез} = \underline{E}_o + \underline{E}_{ad} + \underline{E}_{aq} = \underline{E}_o - j \underline{I}_d X_{ad} - j \underline{I}_q X_{aq},$$

де $\underline{I}_q$ і $\underline{I}_d$ – відповідно поперечна (активна) і подовжня реактивна складові струму якоря $\underline{I}_a$.

На рисунку 5.1,а показана схема заміщення, на рисунку 5.1,б і в – векторні діаграми неявнополюсного ідеального генератора при активному і індуктивному навантаженнях, а на малюнку 5.1,г – векторна діаграма явнополюсного генератора при змішаному активно-індуктивному навантаженні без урахування насичення.

Відповідні векторні діаграми реальних синхронних генераторів принципово такі ж, в них лише додатково враховується вплив $X_{\sigma a}$:

у неявнополюсних

$$\underline{U}_a = \underline{E}_o - j \underline{I}_a X_{cn},$$

де $X_{cn} = X_a + X_{\sigma a}$

у явнополюсних

$$\underline{U}_a = \underline{E}_o - j \underline{I}_d X_d - j \underline{I}_q X_q,$$

де $X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}$, $X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}$.

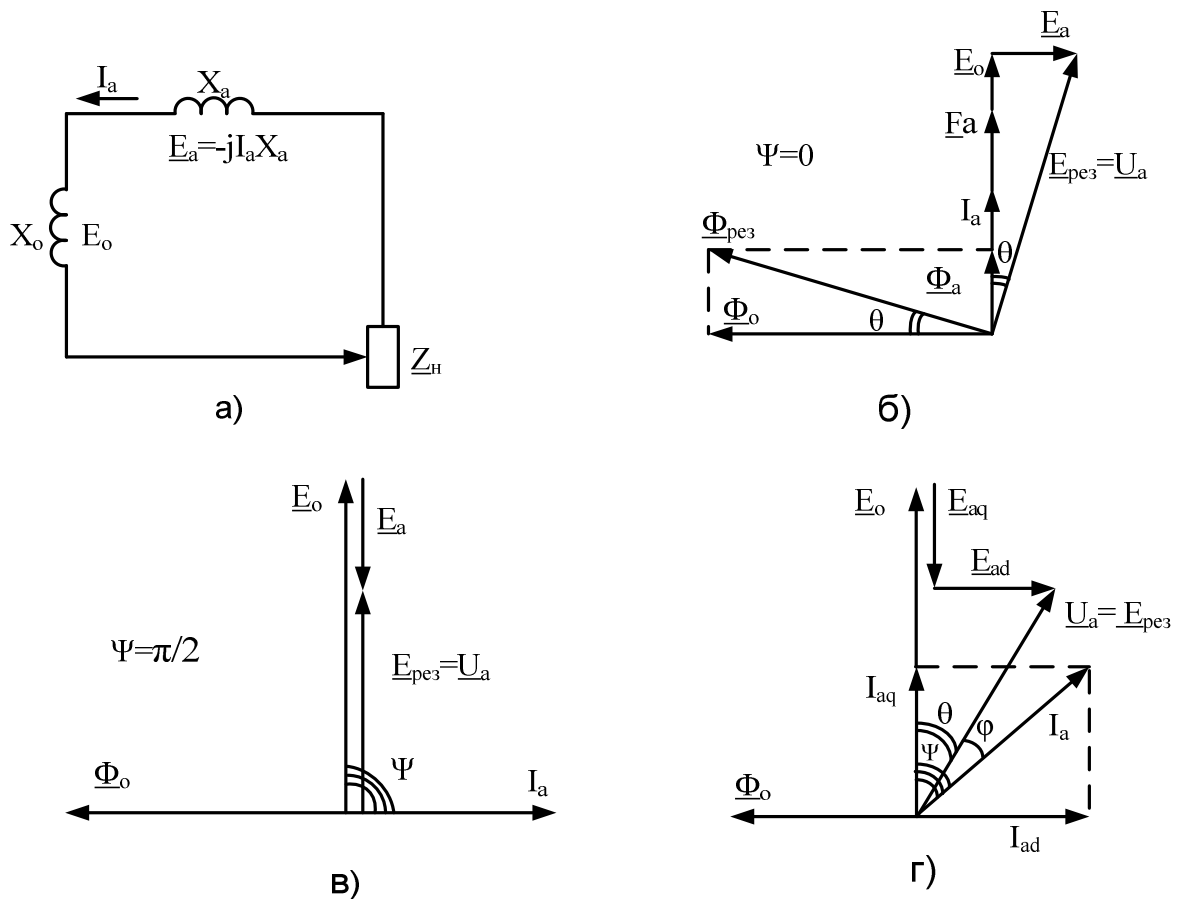


Рисунок 5.1 – Схема заміщення і векторні діаграми синхронних генераторів
Впливом r_a зазвичай нехтують, а вплив нелінійностей магнітопроводу враховується спеціальними методами.

При експлуатації генераторів найважливішою є зовнішня характеристика $U_a = f(I_a)$. Векторні діаграми дозволяють легко пояснити зміни зовнішніх характеристик при різному характері навантаження. У ідеальному генераторі при активному навантаженні із збільшенням струму якоря I_a значення напруги U_a трохи підвищується, а в реальних генераторах за рахунок впливу параметрів обмотки якоря і, особливо, нелінійних магнітних зв'язків вихідна напруга U_a при збільшенні струму якоря I_a знижується (крива 1 на рисунку 5.2,а). При зростанні індуктивного навантаження (крива 2) значення напруги U_a істотно зменшується, а при ємнісній (крива 3) - підвищується.

Дуже частим і практично важливим завданням регулювання роботи генератора є утримання вихідної напруги стабільним при величині, що змінюється, і характері навантаження.

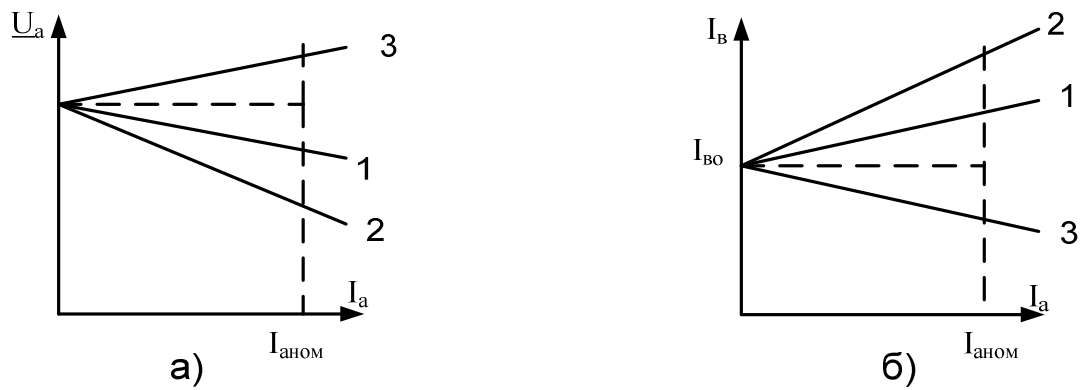


Рисунок 5.2 – Зовнішні і регулювальні характеристики синхронного генератора

Забезпечити $U_a = const$ можна за рахунок відповідного регулювання струму збудження I_B - збільшення при активному, індуктивному або змішаному навантаженнях (криві 1 і 2 на рисунку 5.2,б) або зменшення при ємнісному навантаженні (крива 3).

При дослідженні крупних генераторів на місці їх виробництва відсутні реальні можливості для створення режимів навантажень, близьких до номінального - немає приводних турбін необхідної потужності і відповідних споживачів активної електричної потужності. Проте є можливість зняти характеристики неробочого ходу і короткого замикання. За допомогою цих експериментальних характеристик можна приблизно змодельовати властивості генератора при навантаженні.

У реальних генераторах вплив насичення магнітопроводу приводить до істотної нелінійності характеристики неробочого ходу $E_0 = f(I_B)$ при $I_a = 0$ і до відповідної зміни їх властивостей при навантаженні. Наближений облік такого впливу може бути проведений за допомогою графоаналітичних побудов.

Заздалегідь будують характеристику неробочого ходу $E_0(U_0) = f(I_{\epsilon})$ в абсолютних одиницях (рисунок 5.3,а).

Якщо ЕРС залишкового намагнічення $E_{зал.}$ істотна, то початок координат зміщують вліво на ΔI_B ; положення точки 0 визначається прямолінійною екстраполяцією характеристики до її перетину з віссю абсцис.

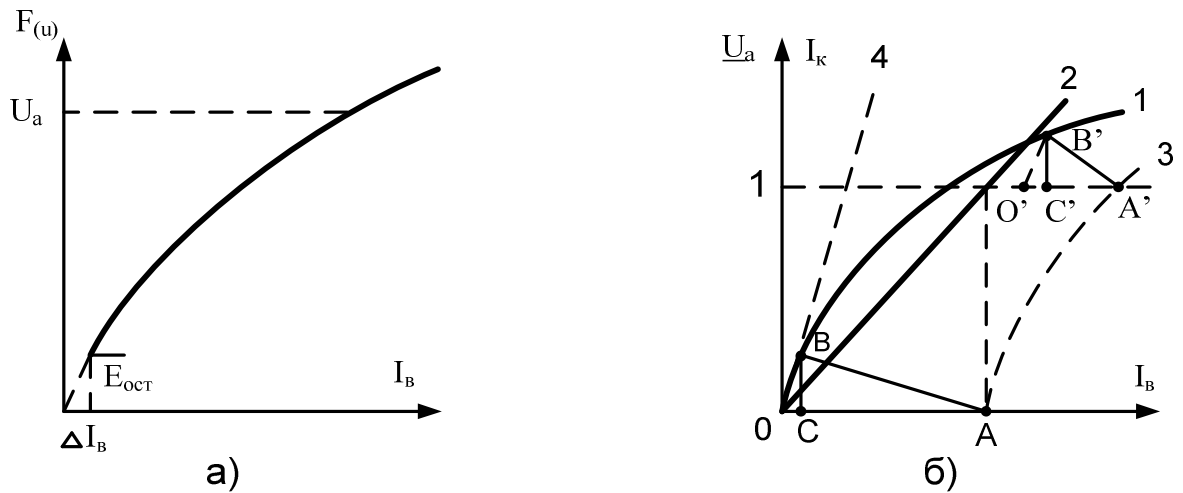


Рисунок 5.3 - Допоміжні характеристики синхронного генератора

Скореговану характеристику неробочого ходу (крива 1 на рисунку 5.3,б) і зняті характеристики короткого замикання $I_a = f(I_e)$, а також індукційну навантажувальну $U_a = f(I_e)$ при незмінному $I_a = I_{аном}$ (відповідно криві 2 і 3), будують в одних координатах у відносних одиницях при однаковому масштабі, наприклад: $I_{аном} = 100 \text{ мм}$. Для індукційної характеристики навантаження потрібна принаймні одна її точка A^1 при $U_2 = U_{2 ном}$. Ліворуч від неї по горизонталі відкладають відрізок $A^1 O^1 = AO$, який визначають по характеристиці короткого замикання (крива 2) при $I_{ак} = I_{аном} = I_{о.е.}$. З точки O^1 проводять пряму, паралельну початковій лінійній частині характеристики неробочого ходу (прямій 4) до перетину з кривою 1 в точці B^1 , з якої опускають перпендикуляр $B^1 C^1$. Трикутник $A^1 B^1 C^1$ називають реактивним. При переміщенні реактивного трикутника $A^1 B^1 C^1$ (або ΔABC) паралельно самому собі так, щоб точка B ковзала по характеристиці неробочого ходу 1, точка A опише індукційну характеристику навантаження 3.

По суті характеристика неробочого ходу є окремим випадком сімейства характеристик навантажень при $I_a = const$. Величина катета BC у відповідному масштабі дорівнює добутку $I_{аном} \cdot X_{си}$; по величині BC можна визначити $X_{си}$.

Катет CA відповідає струму збудження, компенсуючому розмагнічуючу дію поздовжньої реакції якоря, що становить $F_{ad\text{ ном}}$.

Слід зазначити, що подібні методи досліджень характеристик використовуються також і для генераторів постійного струму.

5.3 Методичні вказівки по проведенню дослідів

5.3.1 Схема випробування приведена на рисунку 5.4. У початковому положенні вимикачі P_1, P_2 і P_3 розімкнені.

5.3.2 Після збирання і перевірки схеми викладачем проводиться вмикання приводного двигуна постійного струму. Для цього опір реостату R_{B2} встановлюють мінімальним і за допомогою пускового реостата PP плавним переміщенням рукоятки реостату запускають приводний двигун постійного струму.

5.3.3 Вимикачем P_2 подають живлення на обмотку збудження генератора $OZCГ$ і реостатом R_{B1} регулюють струм збудження генератора I_B так, щоб напруга на затискачах ОЯСГ генератора досягла $U_a = U_{a\text{ ном}}$.

Напругу U_a якоря СГ вимірюють приладом К50. Регулюванням опору R_{B2} змінюють частоту обертання приводного двигуна так, щоб частота напруги $f = f_{\text{ном}} = 50$ Гц; впродовж всіх подальших дослідів вона повинна підтримуватися сталою. Вимикання установки проводять в зворотному порядку: розвантажують генератор до $I_a=0$, реостатом R_{B1} зменшують струм збудження до $I_{B\text{ min}}$ і відключають P_2 ; зменшують опір R_{B2} до мінімального, відключають P_3 , а рукоятку PP повертають в початкове положення.

5.3.4 Зовнішні характеристики $U_a = f(I_a)$ знімають для двох режимів:

- при чисто активному навантаженні, тобто $\cos\varphi_2=1$ (P_1 відключений);
- при змішаному навантаженні при $\cos\varphi_2=0.707$ (рівність активної і реактивної складових струму I_a в обмотці якоря ОЯСГ).

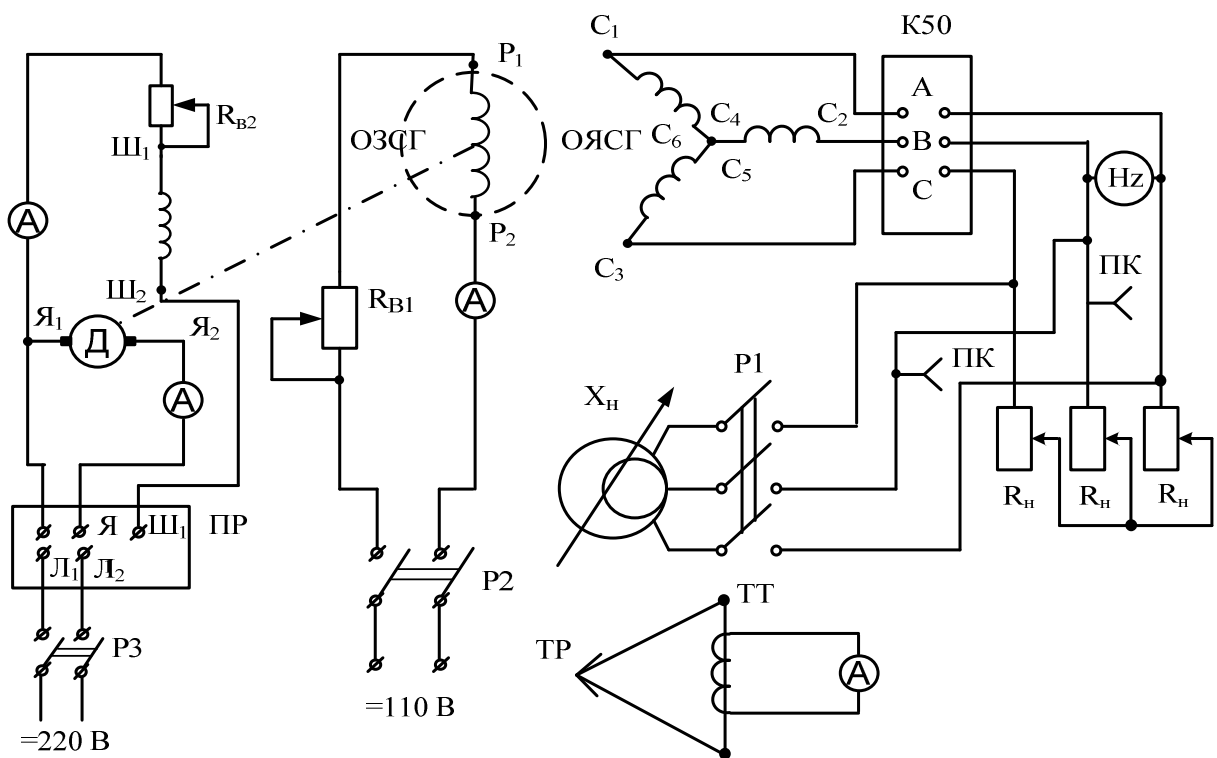


Рисунок 5.4 - Принципова схема випробувань синхронного генератора при роботі в автономному режимі

Для зняття зовнішньої характеристики $U_a = f(I_a)$ при чисто активному навантаженні ($\cos\varphi=1$):

- P_1 - розімкнутий;
- регулюючи реостат навантаження, встановлюють струм якоря СГ, рівним $I_a = I_{аном}$ при $U_a = U_{аном}$ (регулюючи опір $R_{Б1}$ в ланцюзі обмотки збудження СГ) і $f = f_{ном} = 50$ Гц по частотоміру (регулюючи струм в колі обмотки збудження привідного двигуна постійного струму опором $R_{Б2}$);
- підтримуючи незмінною частоту обертання привідного двигуна постійного струму ($f = f_{ном} = 50$ Гц) і не змінюючи величину опору $R_{Б1}$, зменшують навантаження СГ шляхом збільшення опору R_n . При цьому струм якоря I_a зменшуватиметься. Провести вимірювання в 5÷6 точках, остання точка – при струмі якоря СГ $I_a = 0$. Дані дослідів записати в таблицю 5.1.

Для зняття зовнішньої характеристики $U_a = f(I_a)$ при змішаному навантаженні ($\cos\varphi=0.707$) :

- увімкнути рубильник Р1;
- регулюючи реостат навантаження R_n і індуктивний опір навантаження X_n , встановлюють струм якоря СГ, рівним $I_a = I_{аном}$ при $U_a = U_{аном}$ і $f = f_{ном} = 50$ Гц. При цьому підтримують рівність активного і реактивного струмів навантаження $I_{aакт} = I_{aреак}$, для чого за допомогою струмового розтину СР, трансформатора струму ТТ, амперметра А і пружинних контактів ПК у фазі В контролюють споживання активної потужності реостатом навантаження R_n і реактивної потужності асинхронної машини в режимі змінної індуктивності X_n . Спочатку ступінчасто регулюють опір R_n і вимірюють активний струм, а значення реактивної складової струму плавно встановлюють регулюючи X_n так, щоб $I_{aакт} = I_{aреак}$.

- вимірювання проводять в 5÷6 точках, зменшуючи струм навантаження СГ до $I_a = 0$.

Дані дослідів записати в таблицю 5.1.

5.3.5 Регульовальні характеристики $I_B = f(I_a)$ при $U_a = U_{аном} = const$; $f = f_{ном} = 50$ Гц також знімають для двох режимів навантаження:

- при чисто активному навантаженні $\cos\varphi=1$;
- при змішаному навантаженні $\cos\varphi=0.707$.

Для зняття регульовальної характеристики $I_B = f(I_a)$ при чисто активному навантаженні ($\cos\varphi_2=1$):

- рубильник Р₁ відключений;
- регулюючи реостат навантаження, встановлюють струм якоря СГ, рівним $I_a = I_{аном}$ при $U_a = U_{аном}$ (регулюючи опір R_{B1} в колі обмотки збудження СГ і $f = f_{ном} = 50$ Гц);

– підтримуючи незмінною частоту обертання привідного двигуна постійного струму ($f = f_{ном} = 50$ Гц) і постійну напругу обмотки якоря $U_a = U_{аном} = const$ регулювальним реостатом R_{B1} , зменшуємо навантаження СГ шляхом збільшення опору R_n . При цьому струм якоря зменшуватиметься.

Провести вимірювання в 5÷6 точках, остання точка при струмі якоря СГ $I_a = 0$. Дані дослідів записати в таблицю 5.2.

Для зняття регулювальної характеристики при змішаному навантаженні $\cos\varphi=0.707$:

– включити рубильник P_1 ;
– регулюючи реостат R_n навантаження і індуктивний опір навантаження X_n , встановлюють струм якоря СГ, рівним $I_a = I_{аном}$ при $U_a = U_{аном}$ і $f = f_{ном} = 50$ Гц.

– підтримуючи незмінною частоту обертання привідного двигуна постійного струму і постійну напругу обмотки якоря $U_a = U_{аном} = const$ регулювальним реостатом R_{B1} , зменшуємо навантаження СГ шляхом збільшення опору R_n і X_n . При цьому струм якоря зменшуватиметься. Для підтримки рівності активного і реактивного струмів навантаження $I_{аакт} = I_{аеак}$ спочатку ступінчасто регулюють опір R_n і вимірюють активний струм $I_{аакт}$ за допомогою струмового ножа СР трансформатора струму ТТ і амперметра А, а значення реактивної складової струму плавно встановлюють регулюючи X_n так, щоб $I_{аакт} = I_{аеак}$.

– вимірювання проводять в 5÷6 точках, зменшуючи струм навантаження СГ до $I_a = 0$.

Дані дослідів записати в таблицю 5.2.

5.3.6 Характеристику короткого замикання $I_a = f(I_e)$ знімають при замкненому зовнішньому колі генератора, на вихідних затискачах вимірювального комплексу К-50. Регулюючи струм збудження I_e в колі ОЗСГ реостатом R_{B1} встановити струм якоря СГ $I_a = 1.2I_{аном}$. Це перша точка дослідів.

Зменшуючи струм збудження I_{ϵ} в колі ОЗСГ реостатом R_{B1} , зменшуємо струм якоря СГ I_a . Проводимо вимірювання в 3÷4 точках. Останню точку знімаємо при відключеному рубильнику P_2 .

Дані дослідів заносимо в таблицю 5.3.

5.3.7 Зняття характеристики неробочого ходу $E_0(U) = f(I_B)$ при $I_a = 0$ проводять тільки для низхідної гілки в першому квадранті:

- у початковому стані рубильник P_1 - відключений, опір навантаження $R_n = \infty$;

- регулюючи струм збудження I_{ϵ} в колі ОЗСГ реостатом R_{B1} встановити $E_0 = 1.2U_{ном}$; це буде перша точка характеристики;

- зменшуючи струм збудження I_{ϵ} в колі ОЗСГ провести вимірювання в 5÷6 точках характеристики, останню точку $E_0 = E_{зал}$ зняти при $I_{\epsilon} = 0$, для чого відключити рубильник P_2 ; вимірювання $E_{зал}$ провести точним вольтметром.

Дані досліду занести в таблицю 5.4.

5.3.8 Зняття індукційної характеристики навантаження $U_a = f(I_B)$ при $I_a = 0.5I_{ан} = const$ і $f = f_{ном} = 50$ Гц знімають:

- увімкнути рубильник P_1 ;

- регулюючи струм збудження I_{ϵ} ОЗСГ реостатом R_{B1} і індуктивний опір X_n , встановити $U_a = U_{аном}$ при струмі навантаження $I_a = 0.5I_{ан}$, це перша точка характеристики;

- при одночасному зменшенні опору X_n і струму збудження I_{ϵ} ОЗСГ зняти залежність $U_a = f(I_B)$ підтримуючи постійною величину струму якоря $I_a = 0.5I_{ан}$.

Дані досліду занести в таблицю 5.5.

5.4 Методичні вказівки по обробці і аналізу дослідних даних

5.4.1 Дослідні і розрахункові дані рекомендується заносити в нижче приведені таблиці.

Таблиця 5.1- Зовнішні характеристики (при різних $\cos\varphi$)

№ п/п	Дослідні дані							Розрахункові дані			
	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	Ціна поділки	U_a		I_a	
	поділок					C_U	C_I	В	о.е.	А	о.е.
1											

Таблиця 5.2 – Регулювальні характеристики (при різних $\cos\varphi$)

№ п/п	Дослідні дані					Розрахункові дані				
	I_B	I_A	I_B	I_C	Ціна поділок	I_B		Ia		
	поділок				C_{IB}	C_{IA}	В	о.е.	А	о.е.
1										

Таблиця 5.3 – Характеристика короткого замикання

№ п/п	Дослідні дані						Розрахункові дані				
	I_B	I_A	I_B	I_C	Ціна поділок		I_B		I_a		
	поділок				C_{IB}	C_{IA}	A	о.е.	A	о.е.	
1											

Таблиця 5.4 – Характеристика неробочого ходу

№ п/п	Дослідні дані					Розрахункові дані						
	U_A	U_B	U_C	I_B	Ціна по-ділок		$U_a = E_0$		I_B		$I_B = I_{BOT}^* \cdot \Delta I_B$	
	поділок				C_U	C_I	В	о.е.	А	о.е.	А	о.е.
1												

Таблиця 5.5 – Індукційна навантажувальна характеристика

№ п/п	Дослідні дані						Розрахункові дані				
	U_A	U_B	U_C	U_B	Ціна поділок		I_B		U_a		
	поділок				C_U	C_I	A	о.е.	B	о.е.	
1											

5.4.2 За даними дослідів побудувати характеристичний трикутник.

Питання для самоконтролю

- 1 Як провести дослід неробочого ходу?
- 2 Як провести дослід короткого замикання?
- 3 Як зняти зовнішні характеристики?
- 4 Як зняти регульовальні характеристики?
- 5 Як користуватися системою відносних одиниць? У чому її переваги?
- 6 Поясніть вид зовнішніх характеристик при різних значеннях коефіцієнта потужності.
- 7 Поясніть вид характеристики неробочого ходу.
- 8 Поясніть вид характеристики короткого замикання.
- 9 Поясніть вид регульовальних характеристик при різних значеннях коефіцієнта потужності.
- 10 Як впливає реакція якоря на властивості синхронного генератора в автономному режимі роботи?
- 11 Показати на прикладі дію реакції якоря.
- 12 Поясніть доцільність і принцип побудови реактивного трикутника.
- 13 Напишіть рівняння ЕРС для неявнополюсного і явнополюсного синхронного генераторів.
- 14 Що називається реакцією якоря?

Лабораторна робота №6. ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ ПАРАЛЕЛЬНО З МЕРЕЖЕЮ

Мета роботи - ознайомитися з особливостями роботи синхронного генератора в комплексі з енергетичною системою (паралельно з мережею) при загальних значеннях напруги U_a і його частоти f ; вивчити можливості управління роботою генератора в такому режимі (в т.ч. його вмикання, навантаження, розвантаження і відключення), а також регулювання реактивної потужності.

6.1 Програма роботи

6.1.1 Ознайомитися з даними заводських щитків синхронного генератора і привідного двигуна і записати їх в робочий зошит.

6.1.2 Визначити на стенді місцеположення вимірювальних приладів, пускового і регулювальних реостатів, що відносяться до даної схеми; переписати дані вимірювальних приладів.

6.1.3 Зібравши схему на рисунку 6.2, провести перевірку умов вмикання на паралельну роботу і включити на паралельну роботу з мережею синхронний генератор.

6.1.4 Зняти і побудувати V – подібні характеристики $I_1 = f(I_B)$ при $P_2 = const$.

6.1.5 Зняти робочі характеристики синхронного генератора.

$$I_1, P_1, \cos \varphi_1, \eta, M_2 = f(P_2) \text{ при } I_B = const.$$

6.2 Загальні методичні вказівки

Робота синхронного генератора паралельно з мережею істотно відрізняється від роботи в автономному режимі, оскільки стабільне значення напруги U_a і його частота f вже задані енергетичною системою (мережею). Тому при підключенні генератора на паралельну роботу з мережею необхідно погоджувати ці величини і після цього синхронізувати роботу генератора з мережею. Спочатку забезпечують приблизну рівність частот змінної напруги генератора в автономному режимі і мережі за свідченнями частотоміра, регулюючи швидкість обертання привідного дви-

гуна. Після цього добиваються рівності значень напруги генератора і мережі регулюванням струму збудження генератора I_B .

Збіг по фазі векторів напруги генератора і мережі контролюється синхроскопом - ламповим або стрілочним. У простому випадку момент збігу векторів напруги визначається за допомогою лампового синхроскопа, а само включення в цю мить проводиться вручну. Досконалішим є стрілочний синхроскоп; у сучасних крупних установках використовуються прилади точної автоматичної синхронізації (ТАС).

Підключений паралельно з мережею генератор поки не виконує основних функцій, не віддає в мережу потужність, тобто працює в режимі неробочого ходу. Для того, щоб навантажити генератор активною потужністю, необхідно впливати на його привід, тобто регулювати привідний двигун постійного струму, що імітує функції парової або гідравлічної турбіни, так, щоб він збільшував частоту обертання валу. Проте, число обертів ротора генератора при цьому не збільшиться (якщо потужність мережі істотно більше потужності генератора), а генератор почне віддавати активну потужність споживачам, що харчуються від мережі. У цьому можна переконатися за свідченнями відповідних приладів. Таке регулювання привідного двигуна (енергетичного каналу) приведе до певного розвантаження інших синхронних генераторів, що паралельно працюють на цю ж мережу. Регулювання системи збудження генератора (каналу збудження) на віддачу в мережу активної потужності практично не впливає; у ідеальному синхронному генераторі канали енергетичний і збудження є повністю незалежними.

Якщо споживання активної потужності в мережі знижується або виникає інша причина для відключення генератора (профілактичний огляд, ремонт або ін.), то при виведенні його з режиму паралельної роботи, необхідно спочатку розвантажити генератор до режиму неробочого ходу регулюванням струму збудження привідного двигуна так, щоб активна потужність СГ, що віддається в мережу, стала рівною нулю. Якби таке регулювання енергетичного каналу продовжувалося в цьому напрямі і далі, то синхронна машина перейшла б в режим роботи двигуном; проте, дослідження такого режиму не входить в програму даної роботи.

У режимі неробочого ходу (при $P_2=0$) синхронний генератор, що паралельно працює з мережею, може споживати або віддавати в мережу реактивний струм. Тому регулюванням каналу збудження, тобто струму I_B , необхідно довести значення реактивного струму якоря I_a до нуля і після цього відключити генератор від

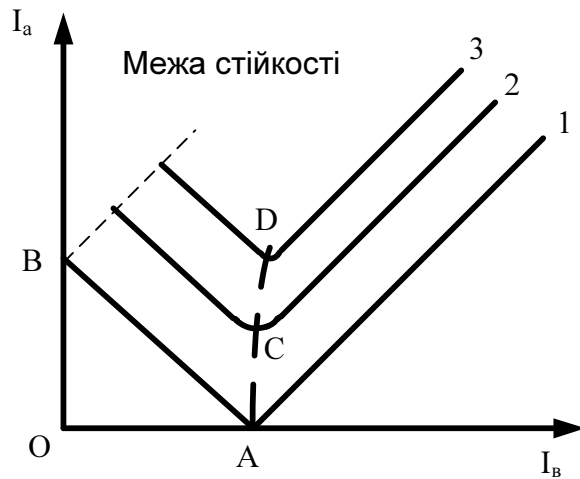


Рисунок 6.1

мережі; при цьому він переходить в автономний режим роботи. Для повного відключення агрегату слід зменшити струм збудження СГ регулюванням опору в його колі збудження з подальшим відключенням цього кола від джерела постійного струму; після цього зупиняють привідний двигун. Для цього струм в колі збудження двигуна постійного струму збільшують до максимального значення, відключають живлення у колі якоря, а рукоятку пускового реостату переводять в початкове по-

ложення.

Синхронний генератор, що працює паралельно з мережею, проявляє особливі властивості, не властиві йому в автономному режимі роботи: залежно від ступеня збудження він може споживати реактивний струм з мережі або віддавати його в мережу. Переконатися в цьому дозволяють досліди по зняттю V-подібних характеристик $I_a = f(I_B)$. Для цього підключають синхронний генератор на паралельну роботу з мережею. Першу характеристику (рисунок 9.1) знімають в режимі неробочого ходу, тобто при $P_2 = 0$, починаючи з точки В максимального споживання реактивного струму I_a при $I_B = 0$ з подальшим збільшенням струму збудження I_B . При цьому реактивний струм I_a зменшується до значення $I_a = 0$ в точці А (повне збудження, відповідне $\cos \varphi=1$), і далі підвищується (режим перезбуджування). Таким чином, синхронний генератор, що працює паралельно з мережею може генерувати в неї не тільки активну, але і реактивну потужність; це видно з отриманої характеристики І. У точці В незбуджений синхронний генератор споживає з мережі реактивний струм, як трансформатор або асинхронний двигун. При невеликих значеннях I_B він генерує реактивний струм зворотного знаку для створення магніт-

них полів, тому загальне споживання реактивного струму I_a при збільшенні I_B продовжує зменшуватися аж до точки А, де настає баланс індуктивних і ємкісних реактивних струмів; а при подальшому збільшенні I_B характер струму якоря I_a стає ємнісним.

Подібні ж V - подібні характеристики можна зняти не тільки при $P_2 = 0 = \text{const}$, але і при інших постійних значеннях активної потужності $P_2 = \text{const}$, що віддається в мережу (у режимі роботи генератором) або споживаний з мережі (у режимі роботи двигуном). Тому специфічна властивість синхронної машини, що працює паралельно з мережею, генерувати в неї реактивний струм при перезбуджуванні (динамічна ємність) однаково властиво як в режимі роботи генератором, так і в режимі роботи двигуном.

V - подібні характеристики (2 і 3 на рисунку 6.1) при вищих, стабілізованих рівнях активного навантаження відповідно проходять вище. У ідеальному синхронному генераторі вони симетричні щодо вертикальної осі, а в реальному їх мінімальні значення при $\cos \varphi = 1$ із зростанням активної потужності P_2 зміщуються вправо із-за впливу нелінійності магнітного кола і інших чинників. Тому значення струму I_B , відповідного повному збудженню при $\cos \varphi = 1$, із збільшенням потужності P_2 декілька збільшується. Навантажена синхронна машина може працювати в синхронному режимі тільки при значеннях струму збудження I_B , що перевищують межу стійкості; при менших значеннях I_B вона випадає з синхронізму.

6.3 Методичні вказівки по проведенню дослідів

6.3.1 Схема випробувань показана на рисунку 6.2.

У початковому положенні вимикачі P1, P2, P3 і P4 повинні бути вимкнені; перевіряється положення реостатів R_{B2} (максимальний струм збудження, тобто $R_{B2} = 0$) і пускового ПР (положення "Пуск"). Подають живлення на привідний двигун, реостатом ПР проводять пуск ДПС. Реостат R_{B1} кола ОЗСГ встановлюють в положення, відповідне $R_{B\text{max}}$, і вимикачем P4 подають живлення на ОЗСГ; регулюючи R_{B1} добиваються $U_a \approx U_{\text{аном}}$ по вольтметру на вимірювальному комплекті К50. Вимикачем P1 і перемикачем P5 підключають прилади і вимірюють частоту і величину напруги в мережі. Після цього регулюванням R_{B2} добиваються такої ж частоти в генераторі

(перемиканням Р5 в положення "Генератор"), а регулюванням R_{B1} добиваються рівності напруги. Готовність синхронного генератора до паралельного включення в мережу підтверджується одночасним загорянням і потуханням ламп синхроскопа С, а також відповідною зміною показань вольтметра V_0 . Неодночасне загоряння ламп свідчить про неузгодженість чергування фаз генератора і мережі; його можна усунути зміною місць двох фаз на виході обмотки якоря ОЯСГ або К50. Частота мигання ламп визначається різницею частот генератора і мережі; чим вона менша, тим краще підготовлений генератор для синхронізації з мережею.

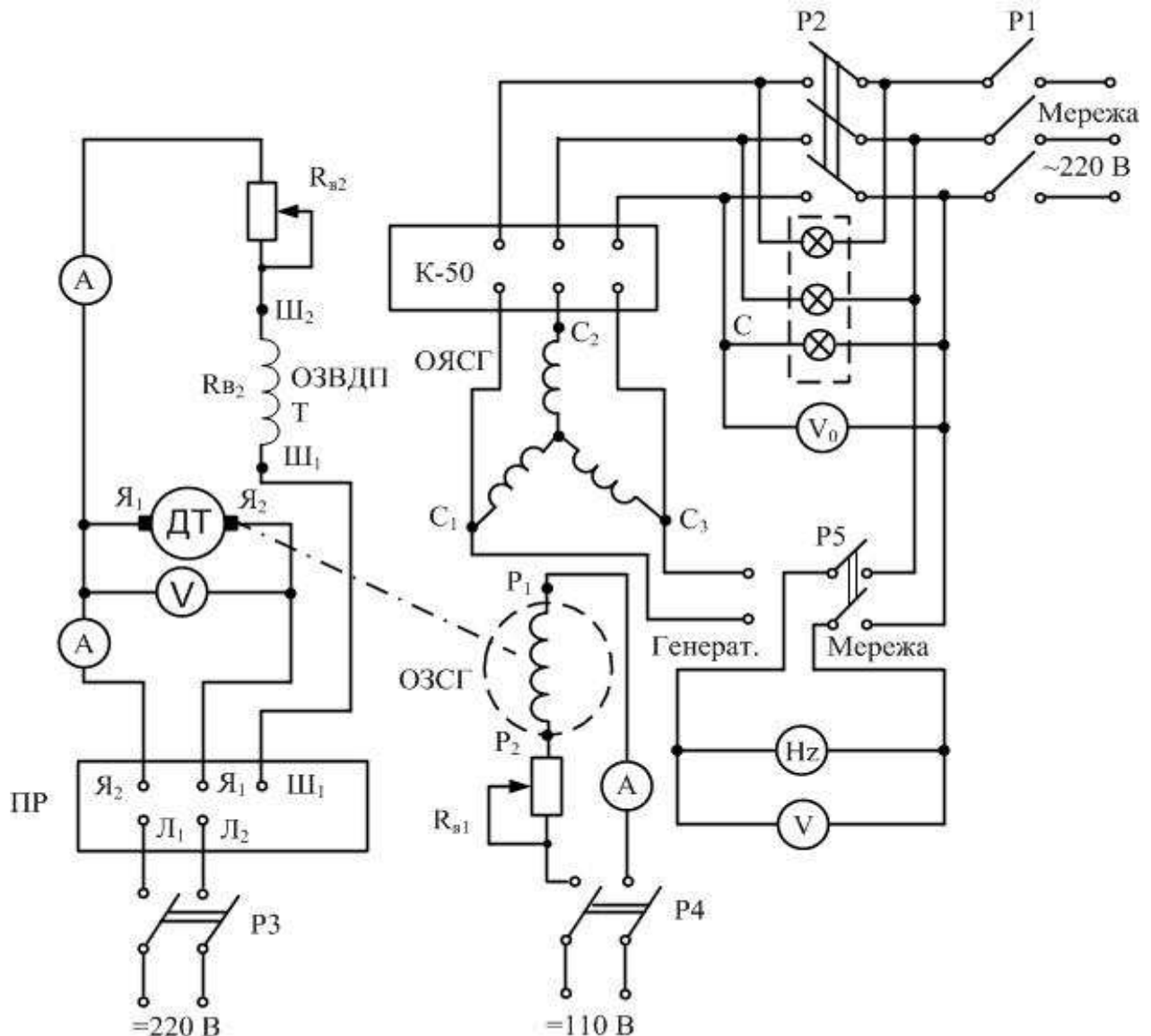


Рисунок 6.2 - Принципова схема випробувань синхронного генератора при паралельній роботі з мережею

6.3.2 Синхронізацію проводять у момент переходу різниці напруги на лампах і вольтметрі V_0 через нульове значення. У цю мить включають Р2; при хорошій

підготовці і правильно вибраній миті включення синхронізація проходить без поштовхів струму якоря. Тепер генератор включений паралельно з мережею в режимі неробочого ходу.

6.3.3 Для навантаження генератора активною потужністю регулюють R_{B2} , зменшуючи струм збудження ДПС; при цьому споживання постійного струму з мережі збільшується, свідчучи про споживання активної потужності. ДПС перетворить її в механічну потужність, яка через зв'язані вали ДПС і СГ передається в СГ; тут вона перетвориться в електричну активну потужність змінного струму (збільшення показань ватметра K50) і віддається в мережу, від якої живляться різні споживачі.

6.3.4 Розвантаження генератора до режиму неробочого ходу проводиться відповідним регулюванням R_{B2} .

6.3.5 Для зняття V - образної характеристики 1 генератора, що паралельно працює з мережею в режимі неробочого ходу, встановлюють $I_B = 0$ регулюванням R_{B1} до R_{B1max} і відключення P4, знімають першу точку В. Наступні точки знімають при включеному P4 регулюванням R_{B1} ; при цьому обов'язково фіксують точку А при $I_a = 0$, збільшуючи його надалі до $I_a \approx I_{аном}$ за рахунок підвищення I_B регулюванням R_{B1} . Наступну V - образну характеристику 2 знімають також при постійному значенні P_2 але вже відмінному від нуля, наприклад, при $P_2 = 0,25P_{ном} = const$.

Сталість $P_2 = const$ контролюють показаннями ватметра на вимірювальному комплекті K50 і при необхідності підтримують регулюванням R_{B2} . При цьому зняття характеристики 2 доцільно почати з точки С, відповідною I_{amin} , підвищуючи I_a до $I_{аном}$ збільшенням I_B ; потім від точки С знімають ліву гілку характеристики при зменшенні I_B до значень, коли робота СГ стає нестійкою (межа стійкості). Аналогічно знімаються характеристики і при вищих стабільних значеннях $P_2 = const$; рівні навантажень і кількість характеристик, що знімаються, погоджують з викладачем. Дані вносять до таблиці 6.1.

6.3.6 Після закінчення зняття характеристик генератор за показаннями ватметра розвантажують до неробочого ходу регулюванням R_{B2} ; регулюванням R_{B1} добиваються $I_a = 0$ і відключають P2, а потім і P1, переводячи генератор в автоном-

ний режим роботи. Після цього збільшують R_{B1} до R_{B1max} і відключають P4. Потім зменшують R_{B2} до нуля, вимикають P3 і повертають ПР в початкове положення.

6.4 Методичні вказівки по обробці і аналізу дослідних даних

6.4.1 Дослідні і розрахункові дані рекомендується вносити до нижче приведених таблиць.

Таблиця 6.1 – V -подібні характеристики

№ п/п	Дослідні дані									Розрахунок		
	U_1	I_A	I_B	I_C	P_A	P_B	P_C	I_B	Ціна по- діл.	I_B	I_a	P_2
	поділок						поділ.	C_T	C_W	A	A	B_T
1												

6.4.2 За даними дослідів побудувати V - подібні характеристики $I_a = f(I_B)$ для різних значень $P_2 = \text{const}$.

Питання для самоконтролю

1 Як включити синхронний генератор на паралельну роботу з мережею? Показати на схемі рисунка 6.2.

2 Назвіть умови вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею.

3 Як змінити активне навантаження генератора, що працює паралельно з мережею?

4 Як змінити реактивну складову струму якоря генератора, що працює паралельно з мережею?

5 Як змінюється $\cos\varphi$ генератора із зміною струму збудження?

6 Поясніть вид V-подібних характеристик.

7 Що є характерним для самої нижньої (по струму якоря) точки V- образних характеристик.

8 Поясніть принцип дії синхронного компенсатора.

9 Поясніть вплив струму збудження на статичну усталеність синхронного генератора.

10 В яку сторону при русі упродовж V- подібної характеристики кут навантаження θ збільшується, а в яку - зменшується?

11 Поясніть, чому в синхронних генераторах значення I_B , при якому настає $\cos\varphi=1$, із зростанням потужності P_2 зміщується вправо.

12 Чому при постійній потужності на валу при зміні струму збудження синхронного генератора потужність P на затискачах не залишається постійною?

Лабораторна робота №7. ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Мета роботи - дослідити і вивчити основні властивості синхронного двигуна, зокрема метод асинхронного пуску, робочі характеристики, а також методи регулювання реактивної потужності.

7.1 Програма роботи

7.1.1 Ознайомитися з даними заводських щитків синхронного двигуна і генератора навантаження і записати їх в робочий зошит.

7.1.2 Визначити на стенді місцеположення вимірювальних приладів, регулювальних реостатів, що відносяться до даної роботи; переписати дані вимірювальних приладів.

7.1.3 Зібрати схему по рисунку 7.1 і провести асинхронний пуск синхронного двигуна.

7.1.4 Зняти і побудувати U-подібні характеристики синхронного двигуна $I_1 = f(I_B)$ при $P_2 = \text{const}$.

7.1.5 Зняти і побудувати робочі характеристики синхронного двигуна $I_1, P_1, \cos\phi, \eta, M_2 = f(P_2)$ при $I_B = \text{const}$.

7.2 Загальні методичні вказівки

7.2.1 Асинхронний пуск синхронного двигуна здійснюється без збудження, за рахунок короткозамкненої клітки. Обмотку збудження ОЗСД при цьому не слід залишати розімкненою, оскільки магнітне поле статора, що діє, наводить в ній значні ЕРС, небезпечні для обслуговуючого персоналу і цілісності ізоляції обмотки збудження. Замикання виводів ОЗСД на пусковий період істотно знижує таку небезпеку, але значні струми, що виникають при цьому, в обмотці збудження створюють відповідні їм електромагнітні моменти, які погіршують умови пуску із-за прояву одноосного ефекту і можуть викликати “застрягання” процесу розгону на напівсинхронній частоті обертання.

Електромагнітні моменти, що погіршують умови пуску через прояв одноосного ефекту і можуть викликати “застрягання” процесу розгону на напівсинхронній частоті обертання.

Тому знаходять оптимальне рішення, замикаючи ОЗСД на згасаючий (розрядний) резистор, опір якого в 8 ... 10 разів більше активного опору ОЗСД. Після того, як ротор досягне сталої асинхронної частоти обертання (т.з. підсинхронної), ОЗСД підключають до джерела живлення постійного струму і двигун втягується в синхронізм. Відключення синхронного двигуна проводиться в зворотному порядку.

7.2.2 Регулювання механічного навантаження на валу двигуна імітується генератором постійного струму ГПС, який перетворює механічну енергію, що отримується від СД через спряжені вали, і перетворює її на електричну, використовувану для нагрівання блоку резисторів R_n , тобто перетворення в теплову енергію, що розсіюється в навколишнє середовище. Регулювання R_n і, відповідно, споживаної ним потужності P_2 , змінює гальмівний електромагнітний момент ГПС, тобто регулює механічне навантаження СД.

Основні властивості СД визначаються його робочими характеристиками, тобто залежностями $I_a, P_1, \cos\phi, \eta, M_2$ від рівня навантаження P_2 . Їх звичайно будують у відносних одиницях.

7.2.3 Як вже згадувалося в попередній роботі, синхронний двигун працює паралельно з мережею, тому він має такі ж специфічні властивості відносно регулювання реактивної потужності, як і паралельно працюючий з мережею синхронний генератор. СД так само, як і паралельно працюючий з мережею СГ, в недозбудженому режимі споживає з мережі реактивний струм, а в перезбудженому генерує реактивний струм і віддає його в мережу. Його V – подібні характеристики $I_a = f(I_B)$ є принципово такими ж і тому тут не вимагають додаткових пояснень.

7.3 Методичні вказівки по проведенню дослідів

7.3.1 Принципова схема випробувань показана на рисунку 7.1.

7.3.2 Пуск СД проводиться при неробочому ході, при ненавантаженому ГПС і відключеному P_2 . Реостат R_{B1} виводять в положення $R_{B1}=0$, перемикачем РЗ за-

микають ОЗСД на розрядний резистор $R_{раз}$. Встановлюють межі вимірювання амперметра вимірювального комплексу К50, достатні для очікуваних значень пускових струмів $I_{п} \approx 5...7I_{аном}$ (або тимчасово переводять перемикач фаз в положення 0) і замикають Р1. Після досягнення ротором сталої асинхронної швидкості і відповідного стабільного значення I_a перемикачем Р3 відключають $R_{раз}$ і подають живлення на ОЗСД; двигун втягується в синхронізм.

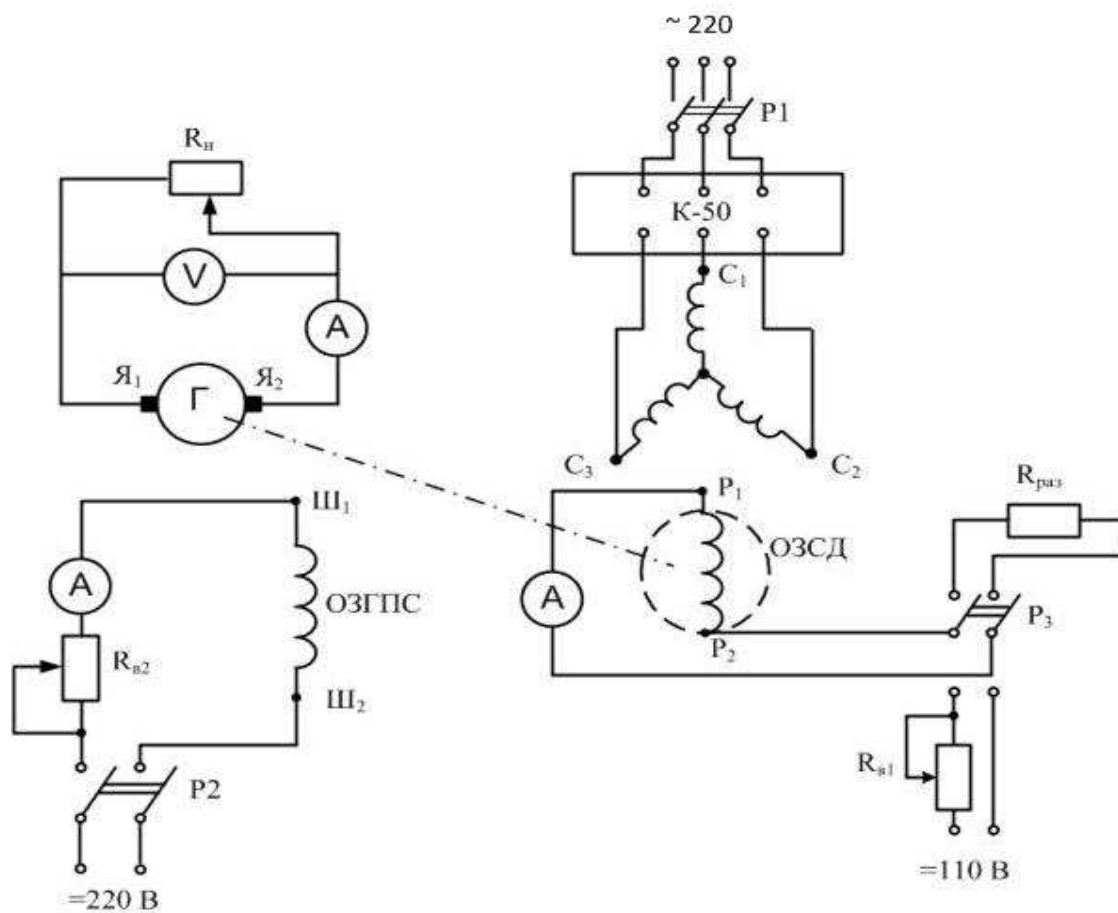


Рисунок 7.1- Принципова схема випробувань синхронного трифазного двигуна.

Регулюванням опору реостата $R_{в1}$ добиваються значенням $I_{амін}$; це відповідає точці А V-подібної характеристики (рисунок 9.1), в якій $\cos\phi = 1$. Але режим повного неробочого ходу при цьому не досягається, оскільки з мережі споживається певний активний струм I_a , необхідний для покриття втрат активної потужності (в основному $p_{мех}$ на тертя в СД і ГПС); при цьому корисна потужність $P_2=0$.

7.3.3 Робочі характеристики можна знімати при різних початкових умовах. Одним з можливих може бути таке: починаючи з вказаної точки А при $P_2=0$ (рисунок 7.1) і $\cos\varphi = 1$, навантажує СД зменшенням R_H в якірному колі зв'язаного з ним ГПС; типовий вид таких характеристик показаний на рисунку 7.2. Ніякі інші величини, в т.ч. і I_B , при цьому не регулюються. За інших початкових умов вид робочих характеристик, особливо $I_a = f(P_2)$ і $\cos\varphi = f(P_2)$, може помітно змінюватися через вплив реактивних струмів. Дані вносяться в таблицю 7.1.

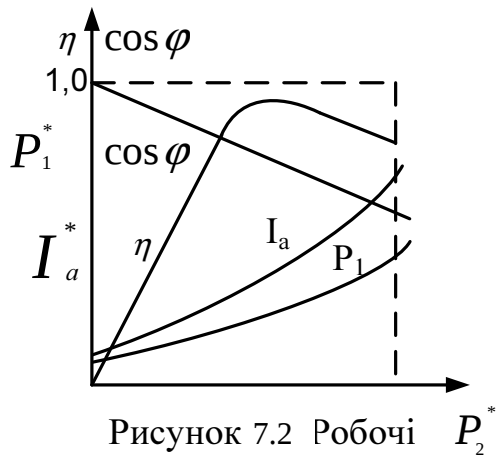


Рисунок 7.2 Робочі характеристики синхронного двигуна

7.3.4 Умови і порядок зняття V-подібних характеристик принципово такі ж, як і при дослідженні СГ, що працює паралельно з мережею.

Особливу увагу слід приділити зняттю точок, близьких до межі усталеності при малих струмах збудження і при $P_2 > 0$; оскільки можливо випадання СД з синхронізму. Це визначають по характеру його роботи і свідченням амперметра К50. Якщо частота обертання двигуна по-

чне періодично змінюватися, (двигун завиває), а струм в обмотці статора коливається і перевищує при цьому номінальне значення - необхідно відключити навантаження, або живлення обмотки якоря двигуна, або збільшити струм збудження двигуна. Дані вносяться в таблицю 10.2, аналогічну за формою таблиці 7.1.

7.4 Методичні вказівки по обробці і аналізу дослідних даних

7.4.1 Дослідні і розрахункові дані рекомендується вносити в нижче приведені таблиці.

7.4.2 За даними дослідів будують у відносних одиницях робочі і V-подібні характеристики.

Таблиця 7.1

№	Дослідні дані														Розрахунок		
п/п	U _A	U _B	U _C	I _A	I _B	I _C	P _A	P _B	P _C	Ціна поділки			I _B	U _г	I _г	η	cosφ
	поділки									C _U	C _I	C _W	A	B	C	в.о	в.о
1																	

Значення η можна визначити приблизно, вважаючи що вся сума втрат у двигуні і генераторі розподіляється приблизно порівну на СД і ГПС.

Тоді

$$\sum p = P_1 - P_2 ,$$

а сума втрат в синхронному двигуні

$$\sum p_{\text{д}} = \frac{P_1 - P_2}{2} ;$$

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_1 - \sum p_{\text{д}}}{P_1} = 1 - \frac{\sum p_{\text{д}}}{P_1} .$$

При необхідності втрати p_3 , їх можна врахувати окремо для СД.

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{3U_{\phi} \cdot I_{\phi}} .$$

Питання для самоконтролю

- 1 Як здійснити пуск синхронного двигуна ?
- 2 Поясніть призначення $R_{\text{раз}}$.
- 3 Як зняти робочі характеристики ?
- 4 Як зняти V-подібні характеристики ?
- 5 Як розрахувати коефіцієнт корисної дії синхронного двигуна ?
- 6 Поясніть залежність $\cos\varphi = f(P_2)$.
- 7 Поясніть залежність $I_a = f(P_2)$.
- 8 Поясніть залежність $\eta = f(P_2)$.

- 9 Поясніть фізичний зміст одноосного ефекту.
- 10 Порівняйте V - подібні характеристики синхронних двигунів і генераторів.
- 11 Поясніть роботу СД в режимі перезбудження.
- 12 Чому при регулюванні струму збудження СД його частота обертання залишається постійною?

Лабораторна робота №8. ВИПРОБУВАННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО І ЗМІШАНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи - дослідити робочі властивості двигуна постійного струму з паралельним і із змішаним збудженням.

8.1 Програма роботи

8.1.1 Ознайомитися з даними заводських щитків двигуна і навантажувального генератора і записати їх в робочий зошит.

8.1.2 Визначити на стенді місцеположення вимірювальних приладів, навантаження, пускового і регулювальних реостатів, що відносяться до даної схеми; переписати дані вимірювальних приладів.

8.1.3 Зібрати схему по рисунку 8.1. Зняти і побудувати характеристики неробочого ходу $E_{ao} = f(i_e)$ при $n = const$, $M_2 = 0$ для наступних частот обертання якоря: $n = 0,8n_H$; $n = n_H$; $n = 1,2n_H$. Побудувати залежності $P_{ao} = f(E_{ao}^2)$ і $P_{мх} = f(n)$.

8.1.4 Зібрати схему по рисунку 8.2. Зняти і побудувати робочі характеристики двигуна постійного струму $P_1, I_a, \eta, n, M_2 = f(P_2)$, при $U = U_H = const$ і $I_e = const$:

- а) по схемі паралельного збудження;
- б) по схемі змішаного збудження при узгодженому вмиканні обмоток.

8.1.5 Зняти і побудувати регулювальну характеристику двигуна постійного струму з паралельним збудженням $n = f(i_e)$ при $U = U_H = const$, $M_2 = 0$.

8.2 Методичні вказівки до проведення роботи

8.2.1 Схема випробувань (рисунок 8.1) використовується для зняття характеристики неробочого ходу. Оскільки сила струму якоря при неробочому ході невелика, то амперметр A_1 в якірному колі підбирається на струм $(0,05 \div 1)I_H$. Як додатковий опір $R_{дод}$ використовується тумба навантаження. Перед пуском двигуна необхідно рубильником P_2 зашунтувати амперметр A_1 , рубильник P_3 розі-

мкнути, а опір $R_{\text{дод}}$ встановити максимальним; опір в ланцюзі обмотки збудження $R_{\text{вз}}$ – мінімальним.

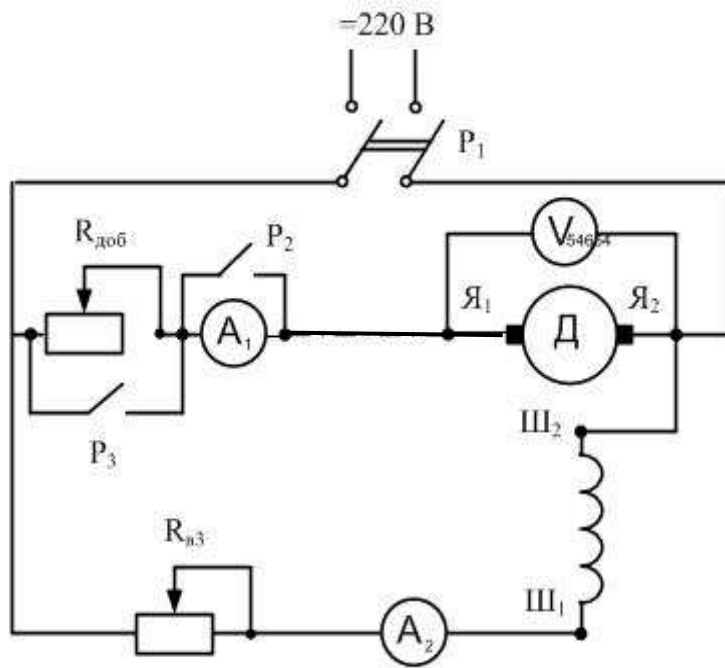


Рисунок 8.1 - Схема характеристики холостого ходу

Для пуску двигуна після подачі мережної напруги рубильником P_1 плавно зменшити опір $R_{\text{дод}}$ до нуля і встановити задану частоту обертання при замкнутому рубильнику P_3 . Це перша точка характеристики неробочого ходу. Вимірювання струму якоря амперметром A_1 провести при розімкнутому рубильнику P_2 . Подальше зняття характеристики $E_{ao} = f(i_e)$ зробити після розмикання рубильника P_3 шляхом зменшення напруги, підведеного до якоря двигуна (збільшити навантаження $R_{\text{дод}}$).

Вимірювання в 6-8 точках проводять до тих пір, поки вдається підтримувати задану частоту обертання двигуна (регулюванням струму збудження).

Зняття характеристики неробочого ходу здійснюють для трьох частот обертання якоря: $n = 0.8n_H$; $n = n_H$; $n = 1.2n_H$.

Результати вимірювань записати в таблицю 8.1.

Таблиця 8.1

№ п/п	Напруга			Струм збудження			Струм якоря			Частота обертання n , об/хв
	Ділення	Ціна поділки	U_a , В	Ділення	Ціна поділки	i_b , А	Ділення	Ціна поділки	I_a , А	
1										

8.2.2 Для зняття робочих характеристик зібрати схему по рисунку 8.2.

Таблиця 8.2

№ п/п	Напруга			Струм якоря двигуна			Струм збудження двигуна			Частота обертання
	поділки	Ціна по- ділки	U_a , В	поділки	Ціна поділки	I_a , А	поділки	Ціна по- ділки	i_e , А	n , об/хв
1										

8.2.3 Зняття регульовальної характеристики двигуна здійснюється в режимі неробочого ходу при регулюванні струму збудження від точки $n = n_{ном}$ до $n = 1.3n_{ном}$. Результати вимірювань записати в таблицю 8.3

Таблиця 8.3

Струм збудження i_e , А				
Частота обертання n , об/хв				

8.3 Методичні вказівки по обробці результатів дослідів

8.3.1 За дослідними даними побудувати в абсолютних одиницях характеристики неробочого ходу $E_{ao} = f(i_b)$ для трьох швидкостей обертання. ЕРС двигуна розрахувати по формулі

$$E_{ao} = U_{ao} - I_{ao} R_a - 2\Delta U_{щ},$$

де U_{ao} - напруга, що підводиться до якоря від мережі, В; I_{ao} - струм в якірному ланцюзі, А; R_a - приведений до робочої температури опір якірного кола, Ом; $2\Delta U_{щ} = 2 B$ - падіння напруги в щітковому контакті.

Щоб розділити в досліді неробочого ходу механічні втрати, не залежні від ЕРС, від втрат в сталі p_c , пропорційних E_a , треба побудувати залежність $P_{ao} = f(E_{ao}^2)$. Графічно така залежність є прямою лінією. Для трьох частот обертання можна побудувати три прямих (рисунок 8.3). Продовживши кожную з них до перетину з віссю ординат, одержують на осі ординат відрізки, які в масш-

табі потужності дадуть механічні втрати P_{MX} для трьох швидкостей обертання. Далі побудувати залежність $P_{MX}=f(n)$ (рисунок 8.3). Втрати в двигуні слід прийняти рівними половині загальних механічних втрат в двигуні і генераторі. Побудувати на цьому ж графіці залежність $P_{MXДВ}=f(n)$, яка використовується при розрахунку робочих характеристик двигуна. Різниця між потужністю $P_{ao} = U_{ao} I_a$ і потужністю механічних втрат P_{MX} являє собою втрати в сталі якоря p_c при даній ЕРС:

8.3.2 Для побудови робочих характеристик двигуна необхідно розрахувати.

1 Споживану двигуном потужність, Вт:

$$P_1 = U_a I_1, \text{ де } I_1 = I_a + I_e .$$

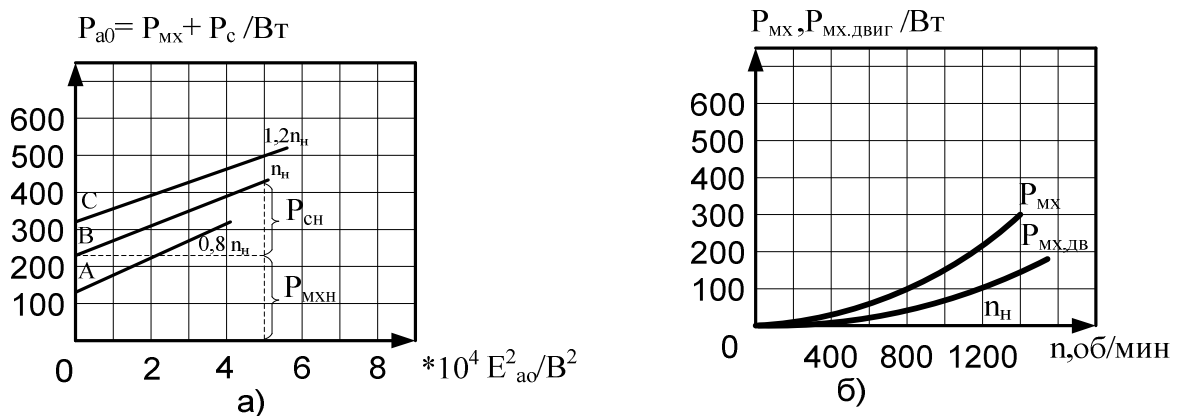


Рисунок 8.3 – Розподіл втрат: а) загальні втрати; б) втрати механічні

2 Механічні втрати $P_{MXДВ}$ (визначають з графіка розподілення втрат), Вт.

3 Втрати в сталі p_c (визначають з графіка розподілення втрат), Вт.

4 Основні втрати в колі якоря, Вт, $p_a = I_a^2 R_a$.

5 Втрати на збудження, Вт, $p_e = U_a I_e$.

6 Втрати в щітковому контакті, Вт, $p_{щ} = 2\Delta U_{щ} I_a$, де $2\Delta U_{щ} = 2B$ - падіння напруги в щітковому контакті.

7 Додаткові втрати, Вт, $P_{доб} = 0.01 P_{1H}$ (1% від потужності, споживаної в номінальному режимі); при навантаженні, відмінному від номінального

$$P_{доб} = 0.01 P_{1H} \left(\frac{I_a}{I_n} \right)^2,$$

де $P_{1H} = U_n I_n$; U_n ; I_n - номінальні (паспортні) значення відповідно напруги і струму якоря.

8 Сума всіх втрат в двигуні, Вт,

$$\Sigma p = p_a + p_e + p_{щ} + p_c + p_{мех.дв} + p_{доб}$$

9 Корисна потужність, Вт, $P_2 = P_1 - \Sigma p$.

10 ККД, %,

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P_1} \right) 100.$$

11 Момент на валу двигуна, $H \cdot м$,

$$M_2 = \frac{60 P_2}{2 \pi n},$$

де P_2 - у ватах; n - в оборотах за хвилину.

Розрахунки провести за експериментальними даними для двох схем збудження двигуна. Результати записати в таблицю 8.4.

Таблиця 8.4

№ п/п	P_1 , Вт	P_{MX} ДВ, Вт	p_c , Вт	p_a , Вт	p_e , Вт	$p_{щ}$, Вт	$p_{доб}$, Вт	Σp , Вт	P_2 , Вт	η , %	M_2 , $H \cdot м$	n , об/хв	I_a , А
1													

8.3.3 За дослідними даними побудувати у відносних одиницях регулювальну характеристику двигуна з паралельним збудженням $n = f(i_e)$ при $U = U_n = const$, $M_2 = 0$.

Питання для самоконтролю

- 1 Пояснити конструкцію і принцип дії двигуна постійного струму.
- 2 Як здійснюють пуски двигунів постійного струму?
- 3 Що відбувається з двигуном при обриві його кола збудження?
- 4 Як зняти робочі характеристики двигуна постійного струму? Який їх вигляд?
- 5 Як проводиться дослід неробочого ходу? Який вид характеристики неробочого ходу?
- 6 Пояснити вид робочих характеристик двигуна з паралельним збудженням.
- 7 Пояснити вид регульовальної характеристики.
- 8 Перерахувати види втрат потужності в двигуні. Як визначити втрати в сталі і механічні?
- 9 Яку роль відіграє послідовна обмотка збудження в двигуні постійного струму змішаного збудження? Порівняти робочі характеристики двигунів з паралельним і змішаним збудженням.
- 10 Як змінити напрям обертання і регулювати швидкість обертання двигунів постійного струму?
- 11 Напишіть основні співвідношення, що характеризують роботу двигуна постійного струму.
- 12 Задана полярність основних полюсів, визначити полярність додаткових полюсів.
- 13 Поясните фізичні процеси при пуску двигуна.
- 14 Поясните фізично, які явища відбуваються в двигуні постійного струму при обриві кола збудження.
- 15 Чому, на відміну від синхронних двигунів, в двигунах постійного струму зміною струму збудження можна регулювати частоту обертання?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.
3. Синхронные машины. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Электрические машины» для студентов электротехнических специальностей / Сост. А.М. Галиновский, В.Е.Гурин. – К.: КПИ, 1966. – 72 с.
4. Лабораторные работы по курсу: «Машины постоянного тока (Исследование генераторов)»./Сост. А.И.Вишникин, Н.А.Оленин, Н.И.Орлов. – К.: КПИ, 1974. – 69 с.
5. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электрические машины». Двигатели постоянного тока и трансформаторы / Сост. Н.Г.Анпилогов, Ю.М.Богославский. – К.: КПИ, 1986. – 56 с.