

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Кафедра електроенергетики, електротехніки
та електромеханіки**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до проведення практичних занять
з дисципліни**

***«ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕРС»***

Харків – 2016

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 1 вересня 2016 р., протокол №1.

Рекомендуються для бакалаврів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електричний транспорт» денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доц. Н.П. Карпенко,
старш. викл. В.П. Нерубацький

Рецензент

доц. С.І. Яцько

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до проведення практичних занять
з дисципліни

*«ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕРС»*

Відповідальний за випуск Нерубацький В.П.

Редактор Решетилова В.В.

Підписано до друку 21.09.16 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 3,5. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідчення суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1	
Обсяг досліджень електричних машин. Схеми безпосереднього навантаження.....	5
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2	
Обсяг досліджень електричних машин. Схеми взаємного навантаження з бустером та схеми з рекуперацією енергії в мережу.....	10
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3	
Вимірювання опорів ізоляції та обмоток.....	17
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4	
Установлення щіток у нейтральне положення.....	30
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5	
Вимірювання вібрацій і биття.....	33
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6	
Вимірювання обертового моменту.....	37
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7	
Випробування на нагрівання.....	50
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8	
Вимірювання температури.....	61
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	74

ВСТУП

Забезпечення експлуатаційної надійності, економічної ефективності використання електричного транспорту та безпеки руху поїздів є важливим завданням роботи Міністерства інфраструктури України, заводів-виробників, ремонтних підприємств і експлуатаційників. Пристрої залізничного транспорту, система технічного обслуговування та ремонту, надаючи послуги, повинні забезпечувати безпеку перевезень пасажирів і вантажів.

Експлуатація електричного транспорту, організація його технічного обслуговування та ремонту, необхідність його модернізації, відновлення після аварій і руйнувань, а також ушкодження в результаті займань вимагають спеціальних знань з прогресивних енергозберігаючих технологій виготовлення окремих вузлів і деталей електричного транспорту.

Метою практичних занять, перелік яких подано у цих методичних вказівках, є допомога студентам у поглибленні знань з теоретичних питань та в освоєнні тем, призначених для самостійного вивчення. Проведення практичних занять сприятиме кращому засвоєнню матеріалу лекцій з дисципліни «Технологія виробництва електрообладнання ЕРС».

Іншими словами, під час вивчення дисципліни студенти повинні отримати знання з типових технологічних процесів і документів, що застосовуються на заводах-виробниках, та навчитися розробляти власні варіанти технологічних процесів, виходячи з експлуатаційних особливостей роботи електричного і технічного обладнання та його технічного обслуговування та ремонту.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

ОБСЯГ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН. СХЕМИ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Кожна виготовлена або відремонтована машина підлягає електричним дослідженням для перевірки відповідності її параметрів встановленим нормам.

Згідно з ГОСТ 2582-81 передбачено п'ять *видів випробувань*: кваліфікаційні, приймально-здавальні, періодичні, типові та ресурсні. Випробування необхідно проводити тим струмом, для якого призначена електрична машина.

Відповідно до стандартів машини підлягають різним видам випробувань. Найбільш повні – *кваліфікаційні дослідження*, які проводяться на головних зразках машин нової серії або тягових електричних машинах.

Кожна електрична машина підлягає *приймально-здавальним дослідженням*, до складу яких входить: 1) вимірювання опору обмоток постійному струму в холодному стані; 2) дослідження на нагрівання протягом однієї години; 3) перевірка номінальної частоти обертання при номінальному струмі, напрузі і збудженні; 4) дослідження на підвищену частоту обертання; 5) дослідження електричної міцності міжвиткової ізоляції обмоток; 6) перевірка биття колектора; 7) перевірка комутації; 8) вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками; 9) дослідження електричної міцності ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками; 10) перевірка рівня вібрації.

Обсяг і методи досліджень регламентуються стандартом на тягові електричні машини – ГОСТ 2582-81 «Машины электрические вращающиеся тяговые».

Залежно від потужності для проведення випробувань електричних машин застосовуються різні схеми навантаження: схеми з безпосереднім навантаженням та схеми зі взаємним навантаженням.

Найбільш простими, але найменш економічними є *схеми безпосереднього навантаження* електричних машин, які застосовуються для генераторів (рисунок 1.1) і двигунів малої потужності (рисунок 1.2) порядку декількох кіловат.

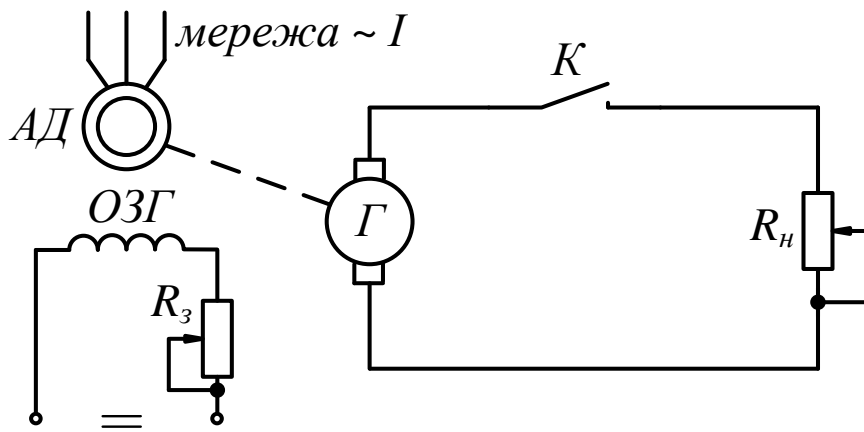


Рисунок 1.1 – Схема безпосереднього навантаження для генератора

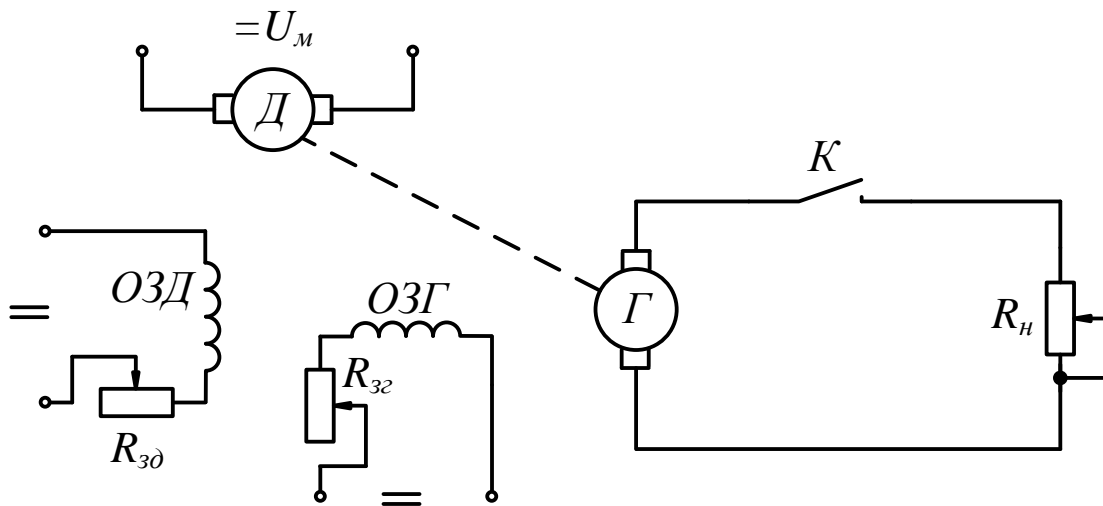


Рисунок 1.2 – Схема безпосереднього навантаження для двигуна

Випробовуваний двигун вмикають до джерела електричної енергії з напругою U_m , а його вал спеціальною муфтою з'єднують із валом іншої електричної машини Γ , що працює в генераторному режимі і навантажує випробовуваний двигун.

При цьому вироблена генератором електрична енергія гаситься в навантажувальному резисторі R_n . Номінальні значення P , M , n навантажувального генератора не повинні бути менше відповідних параметрів випробовуваного двигуна.

Зміну режиму роботи випробовуваного двигуна Δ здійснюють регулюванням опору і струму збудження Γ .

У схемах взаємного навантаження дві однотипні машини навантажуються одна на одну. Вали машин з'єднуються механічно. Одна машина працює двигуном, друга – генератором. Із зовнішньої мережі забирається потужність, необхідна для покриття втрат потужності працюючих машин. Схеми можуть бути з трьома механічно зв'язаними машинами (третя є привідним двигуном, рисунок 1.3) або з двома механічно зв'язаними машинами (рисунок 1.4).

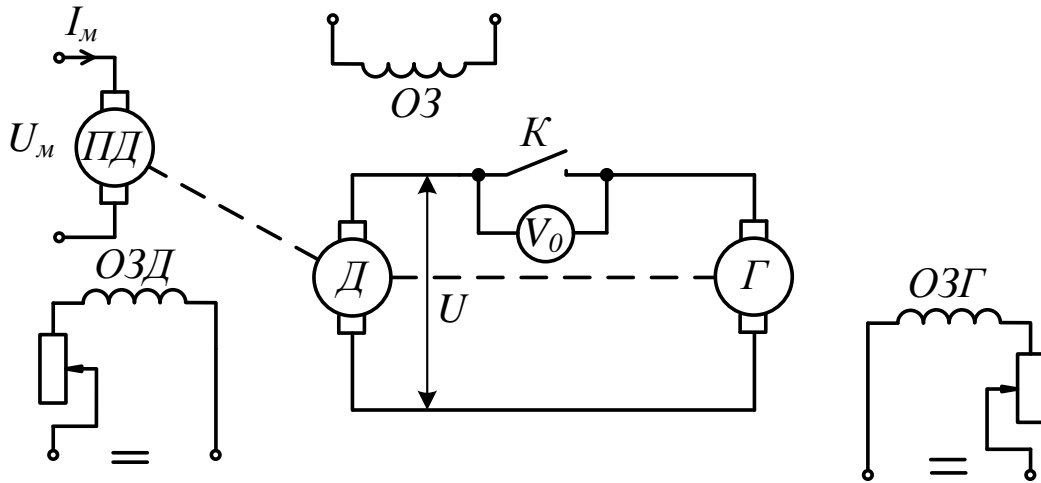


Рисунок 1.3 – Схема взаємного навантаження з трьома механічно зв'язаними машинами

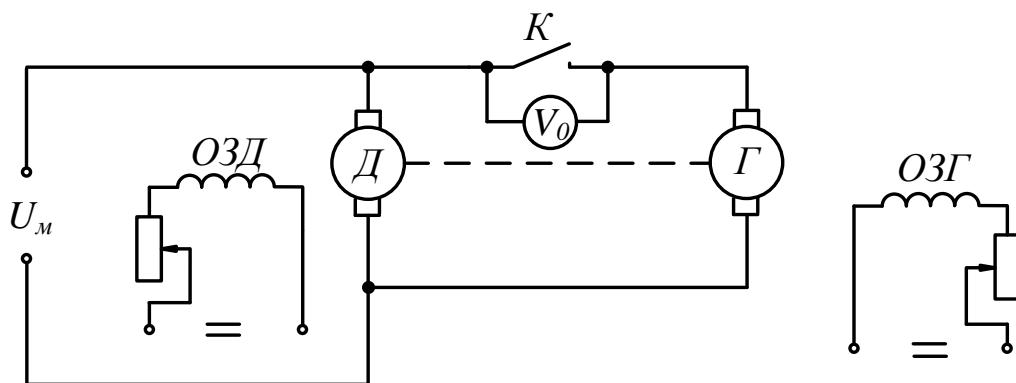


Рисунок 1.4 – Схема взаємного навантаження з двома механічно зв'язаними машинами

Такі схеми застосовуються для досліджень машин незалежного збудження. Струм у колі випробовуваних машин визначається так:

$$I = \frac{E_2 - E_0}{2 \cdot R_a} \quad (1.1)$$

Випробовувані машини приводяться в рух привідним двигуном. Подається збудження на *ОЗД* і *ОЗГ*. ЕРС, що розвиваються в обмотках якорів, повинні бути зустрічно направлені. Це фіксується вольтметром на контактах *K*. Напруга (ЕРС) випробовуваних машин збільшується до номінального значення. Контакт *K* залишається розімкненим. Замикається *K* тоді, коли показання нульового вольтметра V_0 відсутні. Далі збільшується струм збудження тієї машини, яка буде працювати генератором (або зменшується струм збудження двигуна). В якірних колах з'являється струм навантаження, який буде збігатися з направленням більшої ЕРС, тобто з ЕРС генератора. В іншій машині напрям струму буде проти її ЕРС – режим двигуна. На валах машин з'являється момент навантаження.

При відсутності привідного двигуна агрегат приводиться в обертання від однієї з випробовуваних машин, яка при розгоні працює двигуном у режимі холостого ходу. Для створення навантаження на другу машину подається збудження. Напруга цієї машини повинна бути зустрічна напрузі першої машини або напрузі мережі. Це реєструється V_0 . Якщо цієї умови не дотримуються, то змінюють полярність *ОЗГ*. У момент відсутності показань V_0 замикається *K* і далі здійснюється навантаження машин збільшенням струму *ОЗГ*.

У схемі з **вольтододатною машиною** в коло однієї з машин послідовно вмикається бустер *B* (вольтододатний генератор), що має самостійний привід. *B* повинен володіти номінальним струмом не меншим ніж номінальні струми машин основної пари, проте його номінальна напруга може скласти лише незначну частину номінальної напруги останньої.

ТЕД послідовного збудження випробовується за схемою взаємного навантаження з вольтододатною машиною (рисунок 1.5).

Для приведення схеми в дію достатньо подати обом машинам основної пари незалежне збудження, яке приблизно відповідає номінальній напрузі при холостому ході з номінальною швидкістю обертання, скласти замкнене коло з трьох машин,

привести в рух *Б*, поступовим підйомом його збудження змусити обертатися його основну пару і довести її до номінальної швидкості обертання. Після цього залишається підвищенням збудження машини, призначеної працювати *Г*, зниженням збудження машини, призначеної працювати *Д*, і відповідним регулюванням *Б* установити заданий режим роботи, тобто досягти значень відповідних до швидкості обертання, напруги на затискачах випробовуваної машини і струму навантаження.

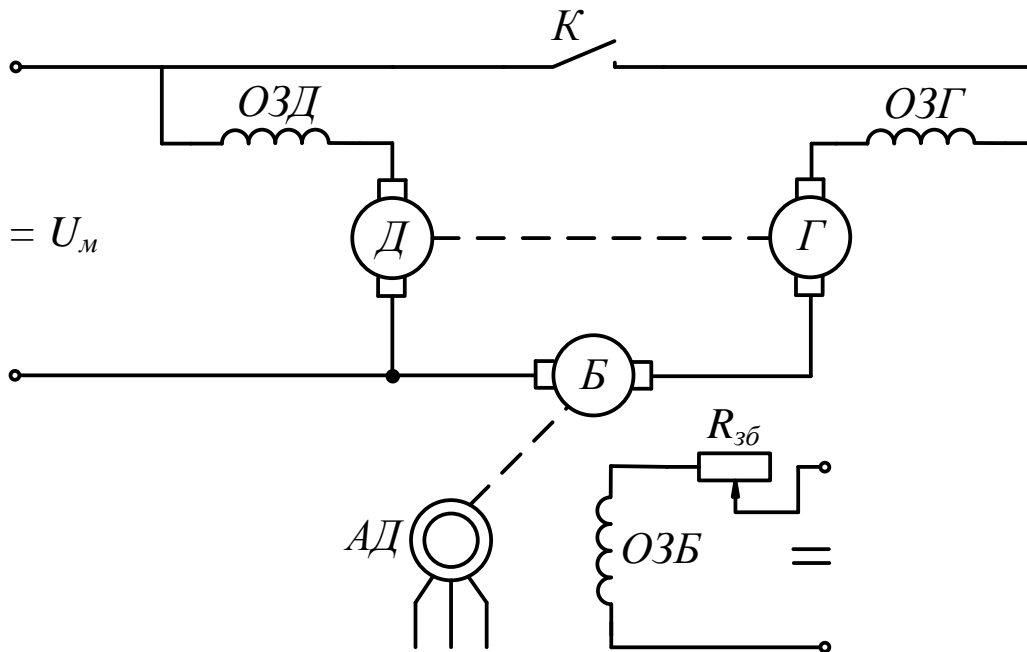


Рисунок 1.5 – Схема взаємного навантаження з вольтододатною машиною

Питання для самоконтролю

- 1 Які види випробувань електричних машин передбачені згідно з ГОСТ 2582-81?
- 2 Які дослідження називають кваліфікаційними?
- 3 Які операції входять до складу приймально-здавальних досліджень електричних машин?
- 4 Які схеми навантаження застосовуються для проведення випробувань електричних машин?
- 5 Охарактеризуйте призначення та принцип дії схеми безпосереднього навантаження.

6 Охарактеризуйте призначення та принцип дії схеми взаємного навантаження.

7 Охарактеризуйте призначення та принцип дії схеми взаємного навантаження з вольтододатною машиною.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

ОБСЯГ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН. СХЕМИ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З БУСТЕРОМ ТА СХЕМИ З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖУ

Розглянемо детальніше наведені на попередньому занятті схеми навантаження машин постійного струму, зокрема схеми взаємного навантаження і схеми з рекуперацією енергії в мережу як найбільш придатні для випробовування ТЕД електровозів і електропоїздів постійного струму.

Як відомо, *взаємне навантаження* – це робота двох електричних машин, з'єднаних електрично і механічно між собою так, що одна з них, працюючи в режимі генератора, віддає всю вироблену електричну енергію другій машині, яка працює в режимі двигуна і витрачає всю виділену нею механічну енергію на обертання першої машини. Приплив енергії ззовні необхідний при цьому лише для покриття суми всіх втрат в обох машинах. Цей приплив може здійснюватися електричним або механічним способами, або одночасно цими способами.

Перевагою взаємного навантаження є те, що маючи джерело живлення обмеженої потужності, можна здійснити значне навантаження машин більшої потужності.

Для машин постійного струму можливі три **основні способи підведення енергії на покриття втрат** у схемі взаємного навантаження.

1 **Спосіб паралельного ввімкнення джерела живлення.** Цей спосіб полягає в тому, що дві машини з'єднуються безпосередньо між собою і до них підводиться живлення від джерела постійного струму з тією самою напругою.

Недолік даного способу полягає в тому, що якщо дві машини однакові, то машина, яка працює в режимі двигуна, є

навантаженою більше, ніж машина, яка працює в режимі генератора. Генератор споживає таку потужність:

$$P_1 = \frac{U \cdot I_2}{\eta_2}, \quad (2.1)$$

а двигун віддає потужність

$$P_\partial = U \cdot I_\partial \cdot \eta_\partial. \quad (2.2)$$

Отже,

$$\frac{U \cdot I_2}{\eta_2} = U \cdot I_\partial \cdot \eta_\partial; \quad (2.3)$$

$$\frac{I_\partial}{I_2} = \frac{1}{\eta_2 \cdot \eta_\partial} > 1. \quad (2.4)$$

Таким чином, якщо випробовувана машина є двигуном, то ідентична з нею машина може бути для неї навантажувальним генератором, але якщо випробовувана машина є генератором, то парна машина може виявитися нездатною бути її приводним двигуном.

Ще одним недоліком схеми з паралельним вмиканням джерела живлення є те, що номінальна напруга джерела живлення повинна бути не нижче за номінальну напругу живильної пари. Цей недолік виявляється при випробовуванні великих машин, які мають номінальну напругу від 750 В і вище.

2 Спосіб послідовного вмикання джерела живлення (спосіб вольтододатного генератора). Цей спосіб полягає в послідовному ввімкненні в коло машин основної пари вольтододатного генератора, який має самостійний привод. Цей генератор повинен мати номінальний струм не менше ніж номінальні струми машин основної пари, але його номінальна напруга може складати лише незначну частину номінальної напруги машин основної пари.

Одним із недоліків цієї схеми є те, що заданий режим роботи незавжди можна реалізувати. Саме тому така схема більш

придатна для незмінних режимів, зокрема, для випробовування на нагрів при тривалому навантаженні, ніж для змінних режимів, наприклад для визначення характеристик.

Номінальна напруга вольтододатного генератора U'_n повинна бути не менше розрахованої за формулою

$$U'_n \geq (1 - \eta_e \cdot \eta_d) \cdot U_n \approx \frac{\sum P}{I_n}, \quad (2.5)$$

де U_n – номінальна напруга випробовуваної машини;

I_n – її номінальний струм;

$\sum P$ – повні втрати в схемі.

Значення ККД генераторного режиму η_e і режиму двигуна η_d можуть бути підраховані за розрахованими або дослідними даними про втрати в машинах пари.

3 Спосіб механічного покриття втрат. Цей спосіб полягає в тому, що на спільному валу з основною парою з'єднується ще допоміжний двигун, потужність якого не менша суми всіх втрат у цій парі, а швидкість обертання така сама.

Цей спосіб особливо придатний для випробовування генераторів найбільших потужностей, які, як правило, випускаються в багатомашинних агрегатах із синхронними або асинхронними двигунами, що виступають при цьому допоміжними. Такий спосіб використовується і для випробовування найбільш потужних двигунів постійного струму, які випускаються в багатоякірному виконанні, коли кількість якорів більше двох. При цьому якір, який працює в режимі генератора, навантажений за напругою більше, ніж якір, який працює в режимі двигуна, унаслідок чого обмотка збудження його магнітної системи може перегріватися через підвищення струму збудження за номінальне значення. Якщо така небезпека існує, необхідно проводити дослідження в режимі генератора, підібравши струм так, щоб ЕРС відповідала режиму двигуна.

Зіставлення особливостей трьох перерахованих способів взаємного навантаження наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Особливості способів взаємного навантаження

Спосіб покриття втрат	Машина в режимі генератора	Машина в режимі двигуна
Паралельним живленням	Номінальне навантаження. Недовантаження по струму	Перенавантаження по струму. Номінальне навантаження
Послідовним живленням	Номінальне навантаження. Недовантаження по струму	Перенавантаження по струму. Номінальне навантаження
Механічним способом	Номінальне навантаження. Перенавантаження по струму	Недовантаження по струму. Номінальне навантаження

Зворотна робота машин постійного струму. Дія схем зворотної роботи базується на послідовному багаторазовому перетворенні енергій з електричної в механічну і навпаки.

Усі схеми зворотної роботи, зазначені нижче, мають властивість зворотності, згідно з якою кожен генератор може бути переведений у режим двигуна і навпаки – кожен двигун у режим генератора. Це дає можливість здійснювати навантаження випробовуваної машини в обох режимах роботи без зміни складу схеми завдяки тільки зміні напрямку потоку енергії в схемі.

Склад схем зворотної роботи для навантаження машини постійного струму залежить від потреби регулювання швидкості обертання машини, яка випробовується в режимі генератора, а також від зміни швидкості обертання машини, випробовуваної в режимі двигуна.

Якщо машині, випробовуваній у режимі генератора, потрібно забезпечити постійність швидкості обертання, при чому остання рівна одній із синхронних швидкостей обертання при номінальній частоті, то як приводний найбільш доцільно застосувати синхронний двигун, який живиться з розподільної мережі.

Також, якщо машині, що випробовується в режимі двигуна, потрібна робота при постійній швидкості обертання, то як навантажувальний повинен бути застосований синхронний генератор, що працює на розподільну мережу.

Розглянемо схеми зворотної роботи генератора та двигуна (рисунок 2.1).

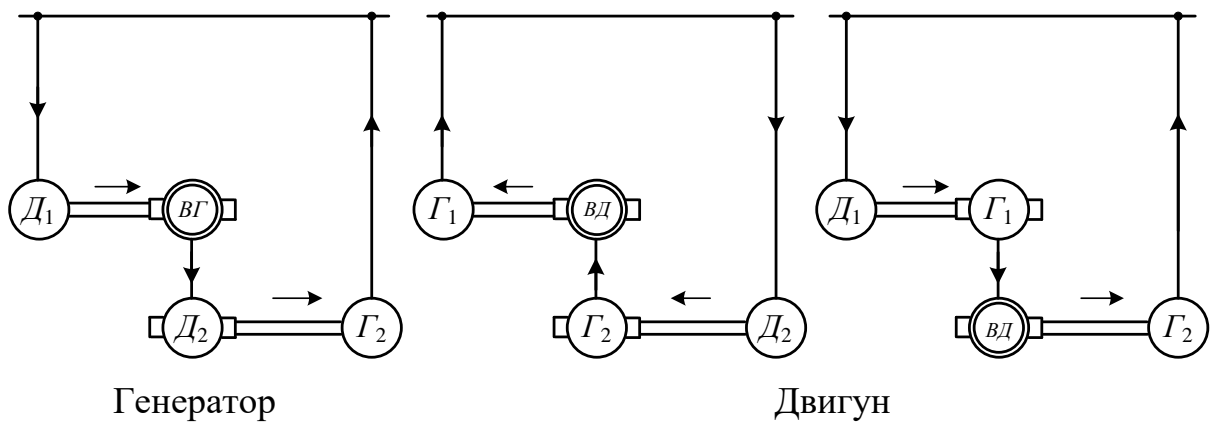


Рисунок 2.1 – Схеми зворотної роботи генератора та двигуна

У схемі зворотної роботи для навантаження генератора приводним двигуном є синхронний двигун $Д_1$. Випробовуваний генератор постійного струму $ВГ$ передає вироблену ним енергію навантажувальному двигуну постійного струму $Д_2$, поєднаному з синхронним генератором $Г_2$, який повертає частину отриманої ним енергії назад у мережу змінного струму, що живить приводний двигун $Д_1$, чим і завершує кругообіг енергії. Мережа тільки покриває втрати у всіх машинах, що беруть участь у цій схемі, а також у всіх з'єднувальних між ними провідниках.

Керування напругою і навантаженням випробовуваного генератора здійснюється за допомогою одночасного вимірювання збудження обох машин постійного струму. Таке керування здійснюється швидше і точніше, якщо обидві машини мають незалежне збудження.

Ця ж схема застосовується і для навантаження випробовуваної машини в режимі двигуна. Унаслідок зміни збудження або обох машин $ВГ$ і $Д_2$, або навіть тільки однієї з них напрям потоку енергії в схемі може бути змінено на зворотний.

Також ця схема придатна для того, щоб перенести випробовування з генератора $ВГ$ на двигун $Д_2$ без зміни початкового напрямку потоку енергії. Якщо випробовуваний генератор потребує регулювання швидкості обертання, то як приводний двигун повинен бути застосований двигун постійного струму $Д_2$, для живлення якого в схему вводиться генератор постійного струму $Г_1$ із двигуном змінного струму $Д_1$.

Схеми зворотної роботи генератора і двигуна з регулюванням швидкості обертання подано на рисунку 2.2.

Для дослідження машин постійного струму в режимі двигуна приводний двигун D_2 замінюють на випробовуваний двигун $ВД$, а генератор $ВГ$ на навантажувальний генератор Γ_2 , зберігаючи напрям потоку енергії і режим роботи всіх інших машин.

Якщо при випробовуваннях машин постійного струму немає агрегатів із машинами змінного струму відповідної потужності, то можна застосувати схеми зворотної роботи з машинами змінного струму меншої потужності. При цьому необхідно мати, крім пари, що складається з випробовуваної машини і поєднаної з нею допоміжної машини, ще одну пару машин постійного струму не меншої потужності, поєднаних між собою.

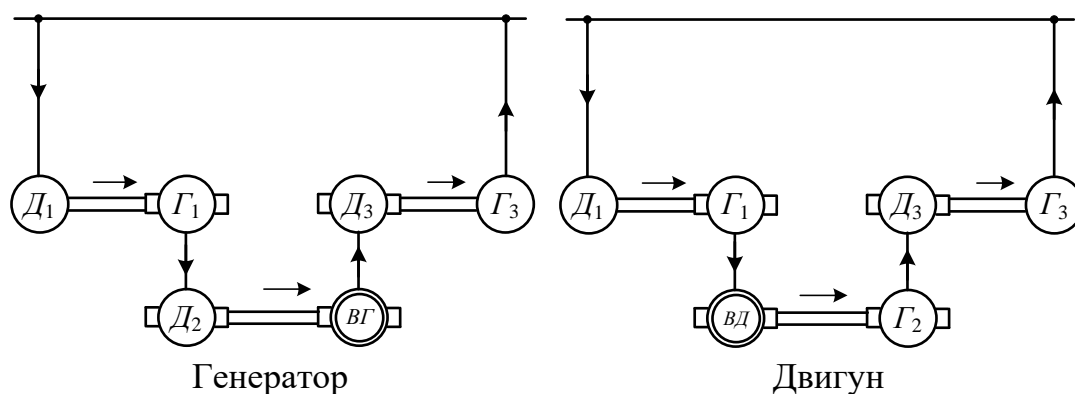


Рисунок 2.2 – Схеми зворотної роботи генератора і двигуна з регулюванням швидкості обертання

Схеми зворотної роботи генератора і двигуна з покриттям втрат електричним способом подані на рисунку 2.3.

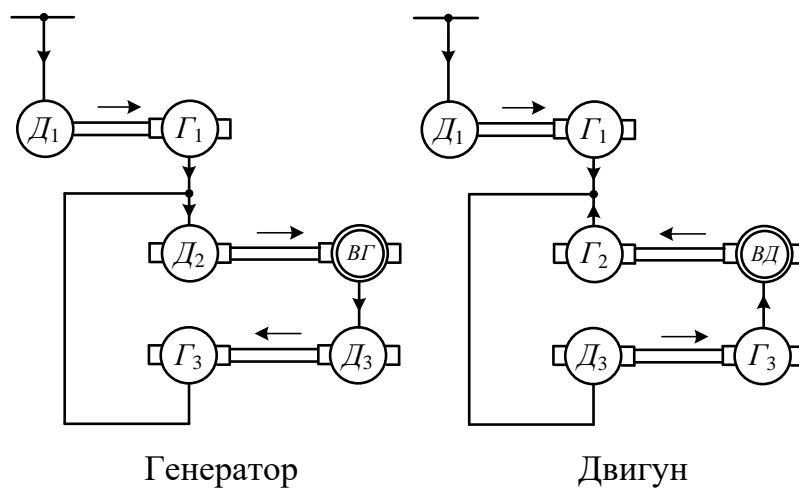


Рисунок 2.3 – Схеми зворотної роботи генератора і двигуна з покриттям втрат електричним способом

При цьому необхідно, щоб у всіх чотирьох машин напруги були однакові або щоб напруга кожної з машин однієї пари відповідала напрузі однієї з машин другої пари.

Маючи агрегат значно меншої потужності, ніж машини цих двох пар, у складі двигуна змінного струму D_1 і генератора постійного струму Γ_1 , можна подати від Γ_1 живлення приводному двигуну D_2 , який обертає випробовуваний генератор $B\Gamma$, а енергію генератора Γ_3 , який обертається навантажувальним двигуном D_3 , повернути в лінію, яка з'єднує генератор Γ_1 з двигуном D_2 . Таким чином кругообіг енергії замикається всередині чотирикутника, складеного з машин D_2 , $B\Gamma$, D_3 , Γ_3 . Від генератора Γ_1 необхідно лише покрити втрати у всіх цих чотирьох машинах.

Змінивши напрям потоку енергії всередині чотирикутника, можна перевести випробовувану машину в режим двигуна.

Покриття втрат може проводитись і не електричним способом, а механічним, якщо з допоміжною парою машин поєднаний додатковий двигун. Схема зворотної роботи генератора з покриттям втрат механічним способом наведена на рисунку 2.4.

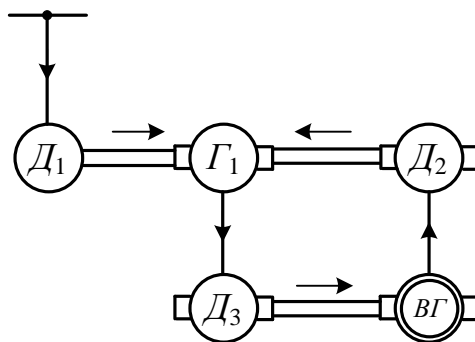


Рисунок 2.4 – Схеми зворотної роботи генератора з покриттям втрат механічним способом

Питання для самоконтролю

1 Назвіть основні способи підведення енергії на покриття втрат в схемі взаємного навантаження.

2 Охарактеризуйте спосіб паралельного вмикання джерела живлення?

3 Охарактеризуйте спосіб послідовного вмикання джерела живлення.

4 Охарактеризуйте спосіб механічного покриття втрат.

5 Охарактеризуйте принцип дії схеми зворотної роботи генератора та двигуна з покриттям втрат електричним способом.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ТА ОБМОТОК

3.1 Вимірювання опору ізоляції

Інструментом для вимірювання опору ізоляції є *мегомметр*. Вимір опору ізоляції з номінальною напругою до 500 В включно проводиться мегомметром із напругою 500 В, а обмоток із номінальною напругою вище 500 В – мегомметром з напругою 1000 В.

Затискач мегомметра, призначений для з'єднання з землею, підводиться до корпусу машини, а протилежний затискач по чергово з'єднується з виводами всіх обмоток, опір ізоляції яких підлягає вимірюванню. Усі інші обмотки при цьому повинні бути з'єднані з корпусом машини.

Тільки великі синхронні машини – турбо- і гідрогенератори – перевіряються мегомметром на 2500 В.

Для вимірювання опору ізоляції високої напруги великих машин, у яких ємність обмоток по відношенню до корпусу дуже значна, застосовують мегометри з моторним приводом або з випрямними пристроями, що живляться від мережі змінного струму; таке вимірювання можна вважати закінченим тільки тоді, коли показання мегомметра не будуть змінюватися (іноді на це необхідно декілька хвилин).

Опір ізоляції обмотки при робочій температурі машини повинен бути не менше розрахованого за формулою

$$r = \frac{U}{1000 + 0,01 \cdot P}, \text{ МОм}, \quad (3.1)$$

де U – номінальна напруга даної обмотки, В;

P – номінальна потужність машини, кВ·А (для машин постійного струму – кВт).

При цьому мінімальне значення опору ізоляції повинно бути не менше 0,5 МОм, для ТЕД – опір ізоляції складає 2,5 МОм (ГОСТ 2582-81). Ізоляція в нагрітому стані повинна бути не менше 1 МОм на 1 кВ робочої напруги. Якщо опір ізоляції вимірюється не при робочій температурі, то значення, розраховане за формулою (3.1), потрібно подвоювати на кожні 20 °С (повні або неповні) різниці між робочою температурою обмотки і температурою, при якій проводиться вимірювання, оскільки в більшості випадків виміряти опір ізоляції при робочій температурі машини через сильну залежність опору ізоляції від температури виявляється неможливим.

Розглянемо приклад. Турбогенератор трифазного струму потужністю 60000 кВт, 75000000 кВ·А при $\cos \varphi = 0,8$ має напругу U_n обмотки статора 10500 В, а $U_{noz} = 280$ В. Необхідно визначити опір ізоляції обмоток при $t_{nc} = 25$ °С.

$$r_e = \frac{U_n}{1000 + 0,01 \cdot P} = \frac{10500}{1000 + 0,01 \cdot 75000} = 6 \text{ МОм.}$$

Згідно зі стандартом робоча температура обмотки статора складає $t_c = 105$ °С, отже $t_c - t_{nc} = 105 - 25 = 80$ °С, тобто в 4 рази більше 20 °С. Звідси

$$r_3 = \frac{U_n}{1000 + 0,01 \cdot P} = \frac{280}{1000 + 0,01 \cdot 75000} = 0,16 \text{ МОм.}$$

Однак це значення менше зазначеного мінімуму 0,5 МОм, який і потрібно взяти як шукане значення.

$t_{oz} = 130$ °С, тому $t_{oz} - t_{nc} = 130 - 25 = 105$ °С, тобто в 5,25 разів більше 20 °С. Звідси

$$r_{ozn} = 2^6 \cdot 0,5 = 32 \text{ МОм.}$$

Опір ізоляції обмотки безпосередньо залежить від вмісту в ній вологи і від ступеня запиленості відкритих поверхонь обмоток, а також від складу цього пилу.

Тривалість визначення показань мегомметра при вимірюванні опору ізоляції обмотки тим більша, чим менше вміст вологи в

ізоляції (при інших однакових умовах). Ступінь вологості встановлюють методом абсорбції на основі визначення швидкості встановлення показань мегомметра при його безперервному обертанні. Для високовольтних машин швидкість встановлення показань мегомметра при його неперервному рівномірному обертанні визначається *коефіцієнтом абсорбції* (ізоляція залишається сухою, якщо відношення $\geq 1,3$)

$$K = \frac{r_{60}}{r_{15}} \geq 1,3, \quad (3.2)$$

де r_{60} – показання мегомметра через 60 с після початку обертання;

r_{15} – показання мегомметра через 15 с після початку обертання;

1,3 – прийняте нормоване значення K .

Якщо в результаті вимірювання опору ізоляції встановлено, що причиною його низького рівня є вологість ізоляції, то необхідно провести сушку ізоляції можливими для цього способами. Якщо виявлено, що причиною є запиленість, то проводять продувку машини стисненим повітрям, а при наявності на обмотках нальоту масла – протирання або навіть промивання внутрішньої поверхні машин розчинниками (за необхідності покриття обмотки відновлюється покривними лаками).

3.2 Вимірювання опору обмоток

Розглянемо вимірювання опору обмоток при постійному струмі в практично холодному стані.

Практично холодним станом електричної машини називається такий стан, при якому температура будь-якої її частини відрізняється від температури охолоджуючого середовища не більше ніж на ± 3 °С.

При промислових випробуваннях електричних машин можуть застосовуватись тільки ті способи вимірювання опору, які задовольняють такі вимоги:

1) *достатня точність вимірювання.* Прийнятий спосіб повинен забезпечувати похибку вимірювання опору обмотки, яка не перевищує ту похибку, з якої проводяться вимірювання її температури:

- при типових дослідженнях $\pm 4\%$;
- при контрольних дослідженнях $\pm 1\%$;

2) *швидкість виконання вимірювання.* Момент вимірювань повинен бути чітко скоординований у часі. Проте виявляється неможливим, якщо вимірювання потребує кропітких операцій;

3) *рухливість вимірювального пристрою.* Пристрій повинен допускати легку переноску, після якої не потрібно жодного налаштування і регулювання.

З відомих способів вимірювання опору найбільш повно задовольняє всі висунуті вимоги **спосіб вольтметра і амперметра**. Вимір опору обмоток постійного струму проводиться при встановленій температурі. Термометр розташовують у середину машини, в якій вимірюється опір. Схема для вимірювання показана на рисунку 3.1.

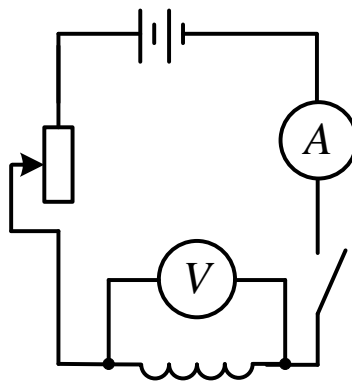


Рисунок 3.1 – Схема для вимірювання

Для забезпечення достовірності показань необхідно дотримуватися таких умов:

1) вольтметр повинен підводитися безпосередньо до затискачів вимірювального опору (як правило, застосовують подвійні щупи);

2) кількість рознімних контактів у схемі повинна бути найменш можливою, а нерознімні контакти бути надійно припаяними;

3) джерелом постійного струму повинна бути добре заряджена батарея акумуляторів (при дуже великих струмах – окремий генератор постійного струму з незалежним збудженням);

4) відліки на двох приладах повинні проводитися одночасно двома спостерігачами за вказівкою спостерігача на вольтметрі, тому що його показання менш стійкі внаслідок помітної індуктивності обмоток;

5) кожний опір вимірюється при трьох значеннях струму, кожного наступного разу зменшуючи це значення. При випробовуваннях підвищеної точності слід брати не менше п'яти значень. При контрольних випробовуваннях машин до 100 кВт допускається однократне вимірювання. За дійсний опір приймається середнє арифметичне всіх вимірювань;

6) при вимірюванні одного і того ж опору необхідно по можливості не змінювати межі вимірювання приладів;

7) при вимірюваннях підвищеної точності необхідно враховувати повірочні поправки приладів відповідно до їх свідоцтв;

8) щоб запобігти нагріванню обмотки вимірювальним струмом, його значення не повинно перевищувати 20 % номінального струму обмотки, а тривалість вимірювання не повинна бути більше 1 хв;

9) підрахунок результатів вимірювання повинен проводитися відразу після його закінчення.

Вимірювання повинно бути від 1/3 до 2/3 шкали (бажано).

Якщо опір кола вольтметра дуже великий порівняно з вимірюваним опором і споживанням струму в вольтметрі можна знехтувати, то

$$r = \frac{U}{I} = \frac{C_{\epsilon}}{C_a} \cdot \frac{V}{a}, \text{ Ом}, \quad (3.3)$$

де U – виміряна напруга;

I – виміряний струм;

$\frac{C_{\epsilon}}{C_a}$ – ціна поділки;

$\frac{V}{a}$ – відхилення в поділках.

Якщо опір кола вольтметра недостатньо великий і споживанням струму в вольтметрі знехтувати не можна, то

$$r = \frac{U}{I - \frac{U}{r_g}} = \frac{C_g \cdot V}{C_a \cdot a - \frac{C_g \cdot V}{r_g}}, \text{ Ом}, \quad (3.4)$$

або

$$r = \frac{C_g \cdot V}{C_a \cdot a - \frac{C_a \cdot C_g \cdot V}{C_a \cdot r_g}} = \frac{C_g}{C_a} \cdot \frac{V}{a - K \cdot V}, \text{ Ом}, \quad (3.5)$$

де

$$K = \frac{C_g}{C_a} \cdot \frac{1}{r_g}. \quad (3.6)$$

Застосування поправки є обов'язковим, якщо опір вольтметра перевищує вимірний опір менше, ніж у 100 раз.

Насамперед необхідно замкнути коло струму, а потім приєднати вольтметр. При вимкненні навпаки – першим від'єднується вольтметр, оскільки при обриві струму вольтметр може бути пошкоджений перенапругою від розриву індуктивностей. Також вольтметр від'єднується при переході вимірювального струму з вищого ступеня на нижчий.

Вимірний опір у холодному стані треба привести до температури +15 °С для того, щоб його можна було порівняти з розрахунком або з іншими аналоговими об'єктами.

Приведення опору обмотки до 15 °С здійснюється за формулою

$$r_{15} = \frac{r_v}{1 + \alpha \cdot (v - 15)}, \quad (3.7)$$

де v – температура вимірювання;

α – температурний коефіцієнт: для міді $\alpha = 0,004$; для алюмінію $\alpha = 0,00385$.

Вимірювання опору обмоток необхідно здійснювати безпосередньо на виводах обмоток. Найбільш складним є вимірювання опору обмотки якоря. Опір обмотки якоря можна визначити за допомогою розрахункового опору, який визначається з виразу:

$$r = \frac{K}{(2 \cdot a)^2} \cdot r_c, \quad (3.8)$$

де K – число секцій обмотки, рівне числу пластин колектора;

r_c – опір однієї секції;

$(2 \cdot a)^2$ – число паралельних гілок по відношенню до струму навантаження.

Правильне значення розрахункового опору може бути отримано з вимірюного опору завдяки введеним поправкам, оснований на припущеннях, або потребує застосування інших способів вимірювання, ніж звичайні.

Причина значної похибки вимірювання полягає в тому, що розподілення вимірювального струму по обмотці відрізняється від розподілення струму навантаження. Розглянемо способи вимірювання для різних *видів обмоток*.

1 Прості хвильові обмотки

У таких обмотках число паралельних гілок – $2 \cdot a = 2$. Загальне число секцій, рівне числу пластин колектора K , може бути або непарним, або парним. З огляду на це можна підібрати такі дві точки на колекторі, які ділили б обмотку на дві гілки, рівні (при парному K) або нерівні на одну секцію (при непарному K).

Згідно зі стандартом вимірювання опору простої хвильової обмотки здійснюється між пластинами колектора, що відстають на $K/2 \cdot p$ поділок колектора з округленням до найближчого цілого числа. При цьому числа секцій у двох паралельних гілках будуть відрізнятися не більше ніж на число пар полюсів p , тобто $\left(\frac{K}{2} + \frac{p}{2}\right)$

і $\left(\frac{K}{2} - \frac{p}{2}\right)$. Тоді опори гілок визначаються так:

$$r_1 = \frac{p}{2} \cdot \left(\frac{K}{p} + 1 \right) \cdot r_c \quad \text{і} \quad r_2 = \frac{p}{2} \cdot \left(\frac{K}{p} - 1 \right) \cdot r_c. \quad (3.9)$$

Вимірюваний опір дорівнює

$$r_e = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{\left(\frac{K}{p} \right)^2 - 1}{\frac{4 \cdot K}{p^2}} \cdot r_c. \quad (3.10)$$

Для даної обмотки розрахунковий опір дорівнює

$$r = \frac{K}{(2 \cdot a)^2} \cdot r_c = \frac{K}{4} \cdot r_c, \quad (3.11)$$

а відношення розрахункового опору до вимірюваного буде дорівнювати

$$\frac{r}{r_e} = \frac{K}{4} \cdot \frac{\frac{4 \cdot K}{p^2}}{\left(\frac{K}{p} \right)^2 - 1} = \frac{\left(\frac{K}{p} \right)^2}{\left(\frac{K}{p} \right)^2 - 1}. \quad (3.12)$$

При числі секцій на одну пару полюсів $K/\delta = 10$ похибка складає 1 %, в реальних електричних машинах число секцій на пару полюсів набагато більше, а тому менша похибка вимірювання.

2 Прості петльові обмотки без зрівняльних з'єднань

Вимірювання можна проводити як між пластинами колектора, що відстають на $K/2 \cdot p$ поділок, так і будь-якими іншими методами.

У першому випадку обмотка буде складатися з двох паралельних гілок, одна з яких містить $K/2 \cdot p$ секцій, а друга – інші секції, тому вимірюваний опір дорівнює

$$r_g = \left(\frac{1}{\frac{2 \cdot p}{K} + \frac{2 \cdot p}{(2 \cdot p - 1) \cdot K}} \right) \cdot r_c \quad (3.13)$$

або

$$r_g = \frac{K \cdot (2 \cdot p - 1)}{4 \cdot p^2} \cdot r_c. \quad (3.14)$$

Число паралельних гілок із простою петльовою обмоткою дорівнює $2 \cdot a = 2 \cdot p$, а розрахунковий опір

$$r = \frac{K}{(2 \cdot p)^2} \cdot r_c, \quad (3.15)$$

тоді відношення r до r_g дорівнює

$$\frac{r}{r_g} = \frac{1}{2 \cdot p - 1}, \quad (3.16)$$

тобто ізоляційний опір більший за розрахунковий у $2 \cdot p - 1$ раз.

3 Прості петльові обмотки з повним числом зрівняльних з'єднань.

Такий тип обмотки є розповсюдженим для великих машин. Згідно зі стандартом вимірювання опорів такої обмотки здійснюється між пластинами, що відстають на $K/2 \cdot p$ поділок.

Результати такого вимірювання будуть залежати від того, де розміщені зрівняльні з'єднання, зокрема:

- з боку колектора;
- з боку, протилежного колектору;
- у «півниках», де вони є одночасно зрівняльними з'єднаннями.

Похибка вимірювання, яка вноситься перетіканням струмів по зрівняльних з'єднаннях, може бути зменшена приблизно втричі, якщо проводити вимірювання між пластинами, розміщеними при непарних числах пар полюсів діаметрально протилежних одна

одній, а при парних числах пар полюсів, що відстають на $(p \pm 1) \cdot K/2 \cdot p$ поділок.

При великій кількості пар полюсів похибка все ж залишається значною, тому переходять до **спеціальних способів вимірювання**:

1) *вимірювання з підведенням вимірювального струму через щітковий апарат.* Цим способом (рисунок 3.2) можна користуватися тоді, коли не все коло колектора доступне для вимірювання.

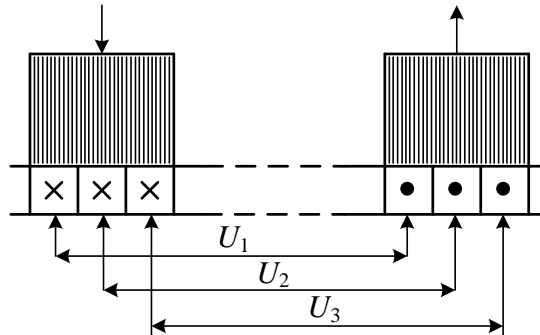


Рисунок 3.2 – Спосіб вимірювання з підведенням вимірювального струму через щітковий апарат

Вольтметр приєднується голковими щупами до перекритих щітками пластин колектора, що відстають на $K/2 \cdot p$ поділок, при чому спочатку зі збігаючих країв щіток, потім всередині щіток, і, на кінець, з набігаючих країв щіток. З огляду на те, що число пластин колектора петльової обмотки з повним числом зрівняльних з'єднань обов'язково ділиться на число пар полюсів, але може не ділитися на число полюсів, то результат ділення $K/2 \cdot p$, може бути заокруглений як у більший, так і в менший бік. Рекомендується проводити вимірювання декілька разів поспіль під різними щітками, а за дійсне значення брати середнє арифметичне зі всіх вимірювань;

2) *вимірювання з окремим підведенням вимірювального струму голковими щупами.* Підведення вимірювального струму здійснюється голковими щупами до пластин, що відстають на одне з чисел ділення:

$$\frac{K}{2 \cdot p}; \frac{3 \cdot K}{2 \cdot p}; \frac{5 \cdot K}{2 \cdot p}; \dots \frac{(2 \cdot p - 3) \cdot K}{2 \cdot p}; \frac{(2 \cdot p - 1) \cdot K}{2 \cdot p},$$

з округленням до найближчого цілого, якщо результат ділення дробовий. Вимірювання проводиться при піднятих щупах.

Вимірювання падіння напруги здійснюється між пластинами, що відстають на $K/2 \cdot p$ поділок, з округленням до цілого почергово в більший і в менший бік, починаючи з однієї з точок підведення струму по всьому колу колектора до другої точки підведення струму і знову до першої (рисунок 3.3). Усього повинно бути проведено $2 \cdot p$ вимірювань. За дійсне значення беруть середнє арифметичне з усіх вимірювань.

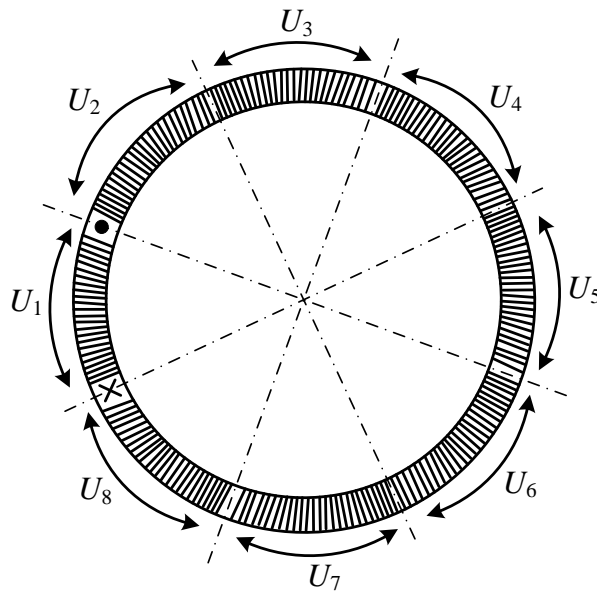


Рисунок 3.3 – Спосіб вимірювання з окремим підведенням вимірювального струму голковими щупами

Застосування цього способу обмежено машинами з доступними колекторами;

3) *вимірювання частини розрахункового опору*. Підведення вимірювального струму здійснюється голковими щупами з пластинами, що відстають на $K/2 \cdot p$ поділок, а вимірювання падіння напруги – між пластинами в проміжку між точками підведення вимірювального струму, що відстають від цих останніх на число поділок, рівне числу пар полюсів у припущенні, що на таких відстанях від точок підведення вимірювального струму розподілення його по паралельних гілках уже практично завершено і зрівняльні з'єднання всередині проміжку, який залишився, не несуть струмів (рисунок 3.4).

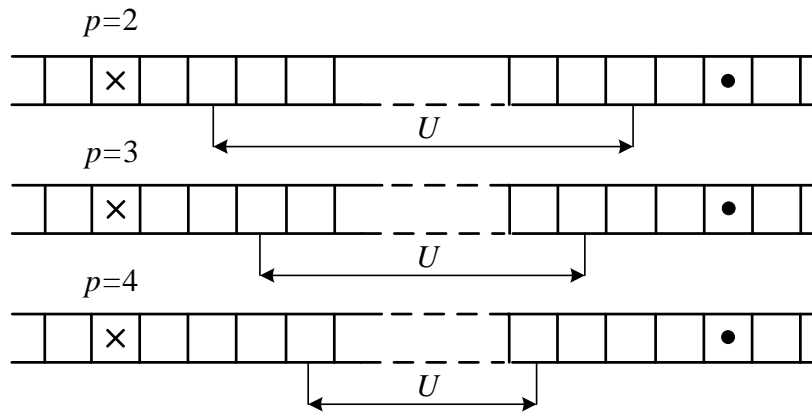


Рисунок 3.4 – Спосіб вимірювання частини розрахункового опору

Результат вимірювання підлягає перерахунку за формулою:

$$r_g = \frac{K}{K - (2 \cdot p)^2} \cdot r_g, \quad (3.17)$$

де r_g – виміряний опір.

4 Прості петльові обмотки з неповним числом зрівняльних з'єднань.

В обмотках цього типу число виконаних зрівняльних з'єднань q по відношенню до повного їх числа K/p для великих машин, як правило, дорівнює від $1/3$ до $1/2$. Якщо зрівняльні з'єднання розміщені з боку колектора, то можна припустити, що колектор складається тільки з тих пластин, до яких підведені зрівняльні з'єднання, а інші пластини взагалі не існують; тоді даний випадок повертає до попереднього, але з числом секцій і пластин колектора $K' = p \cdot q$. Якщо q парне, то $K''/2 \cdot p = q/2$ є цілим числом; якщо q – не парне, то результат вимірювання потрібно подати множителем

$$K = \frac{q^2}{q^2 + 1}. \quad (3.18)$$

Питання для самоконтролю

- 1 Як називається інструмент для вимірювання опору ізоляції?
- 2 За допомогою чого здійснюють вимірювання опору ізоляції високої напруги великих машин, у яких ємність обмоток по відношенню до корпусу дуже велика?
- 3 Яким чином можна визначити опір ізоляції обмотки при робочій температурі машини?
- 4 Яким чином можна визначити опір ізоляції обмотки не при робочій температурі машини?
- 5 Від яких чинників залежить опір ізоляції обмотки?
- 6 Що називають коефіцієнтом абсорбції?
- 7 Який стан називається практично холодним станом електричної машини?
- 8 Які вимоги повинні задовольняти існуючі способи вимірювання опору при промислових випробуваннях електричних машин?
- 9 Яких умов слід дотримуватися при застосуванні способу вольтметра і амперметра?
- 10 Яким чином здійснюється вимірювання опору простої хвильової обмотки?
- 11 Яким чином здійснюється вимірювання опору простої петльової обмотки без зрівняльних з'єднань?
- 12 Яким чином здійснюється вимірювання опору простої петльової обмотки з повним числом зрівняльних з'єднань?
- 13 Охарактеризуйте спосіб вимірювання опору обмотки з підведенням вимірювального струму через щітковий апарат.
- 14 Охарактеризуйте спосіб вимірювання опору обмотки з окремим підведенням вимірювального струму голковими щупами.
- 15 Охарактеризуйте спосіб вимірювання частини розрахункового опору обмотки.
- 16 Яким чином здійснюється вимірювання опору простої петльової обмотки з неповним числом зрівняльних з'єднань?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

УСТАНОВЛЕННЯ ЩІТОК У НЕЙТРАЛЬНЕ ПОЛОЖЕННЯ

Під *нейтральним положенням* у машинах постійного струму розуміється таке розташування щіток, при якому ЕРС. ненавантаженого якоря досягає найбільшої величини. На цьому ґрунтується найпростіший спосіб установлення щіток у нейтральне положення, який полягає в тому, що машина приводиться в рух з постійною швидкістю за допомогою якого-небудь двигуна і при підтримці постійного струму збудження, який подається від постійного джерела, встановлюється таке положення щіток, при якому напруга стає максимальною.

Однак чутливість цього способу незадовільна; напруга на щітках поблизу від нейтрального положення практично не залежить від невеликих зміщень від нього, у результаті чого дуже складно точно встановити найбільше значення напруги.

У зв'язку з цим доцільно використовувати спосіб, заснований на тому, що при нейтральному положенні щіток ЕРС. трансформації між обмотками головних полюсів і нерухомого якоря повинні дорівнювати нулю, оскільки це свідчить про повну врівноваженість усіх частин обмоток якоря по відношенню до нуля головних полюсів, при якій зменшуючий вплив зустрічно діючих ЕРС у якорі, що обертається, зведено до мінімуму. З огляду на це, якщо до щіток приєднати чутливий магнітоелектричний прилад, а в обмотку головних полюсів подавати поштовхами живлення від стороннього джерела постійного струму, при нейтральному положенні щіток прилад не повинен засвідчувати відхилення.

Схема установлення щіток у нейтральне положення подана на рисунку 4.1. Будь-яке зміщення щіток із нейтрального положення буде спричинювати відхилення приладу при увімкненні живлення в один бік, а при вимиканні – в інший (відхилення буде тим більше, чим більше це зміщення).

Відхилення приладу при відключеному живленні є більш чітким, тому зручно враховувати відхилення саме при вимкненні. Напрямок цих відхилень залежить від того, в який бік зміщені щітки з нейтрального положення.

Поставивши щітки попередньо проти середини головних полюсів, необхідно закріпити траверсу в цьому положенні і, визначивши напрям відхилення приладу, запам'ятати їх величину. Після чого необхідно трохи пересунути щітки в який-небудь бік і знову визначити напрям відхилення приладу. Якщо напрям залишився незмінним, а величина відхилення стала меншою, необхідно продовжити пересувати щітки в тому ж напрямі до того часу, поки відхилення приладу не перервуться. В іншому випадку треба обережно переміщувати щітки в іншому напрямі.

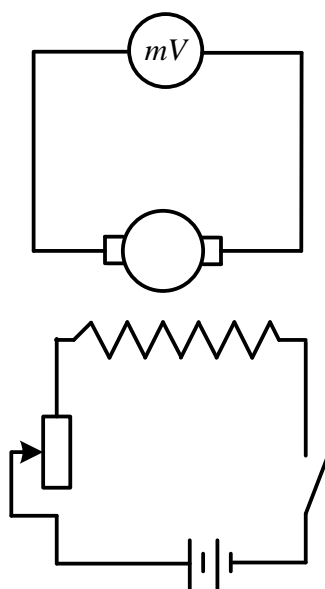


Рисунок 4.1 - Схема установа щіток у нейтральне положення

Недоліки способу:

- неприпрацьованість щіток спричинює торкання до поверхні колектора в одній-двох точках, розміщення яких абсолютно випадково змінюється при найменшому переміщенні траверси або колектора;

- неможливо встановити таке положення щіток, при якому відхилення приладу були б відсутні незалежно від положення колектора (задовольняються приблизно однаковими відхиленнями у два боки від нуля).

У зв'язку з цим після остаточного закріплення траверси необхідно декілька разів перевірити відхилення приладу, ставлячи колектор у різні положення. При цьому обертати колектор необхідно в один бік, щоб запобігти перекиданню щіток навколо точок їх дотику з поверхнею колектора.

Після хорошого припрацювання контактної поверхні щіток найдене положення ще раз перевіряється, а потім відзначається найдене нейтральне положення.

Напругу джерела постійного струму для живлення обмоток головних полюсів достатньо мати таку, при якій струм у ній складає 5÷10 % від його значення при холостому ході з номінальною напругою і номінальною швидкістю обертання.

При повертанні якоря рекомендується розмикати коло приладу, щоб запобігти його пошкодженню за рахунок ЕРС від залишкового намагнічування машини.

Точне установлення траверси в нейтральне положення досягається при заміні двох щіток різних полярностей мідними брусками, опиленими за формою щіток, але такими, що мають на нижній поверхні долотоподібний виступ точно по середині ширини. Усі інші щітки при цьому повинні бути піднятими.

Хороші результати при сповна припрацьованих щітках засвідчує обертання в двох протилежних напрямках у режимі двигуна під навантаженням з чітко незмінними збудженням, струмом навантаження і швидкістю обертання. Щітки розташовані правильно в нейтральному положенні, якщо напруга, прикладена до якоря, при цьому залишається також незмінною. Цей спосіб придатний для машин як із паралельним або незалежним збудженням, так і з послідовним збудженням, за умови, що щіткотримачі мають конструкцію, для якої напрям обертання неважливий.

Питання для самоконтролю

1 Яке розташування щіток електричних машин розуміється під нейтральним положенням?

2 Яким чином працює схема установлення щіток в нейтральне положення?

3 Що відноситься до недоліків застосування розглянутого способу установлення щіток в нейтральне положення?

4 Яким чином досягається дуже точне установлення траверси в нейтральне положення?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

ВИМІРЮВАННЯ ВІБРАЦІЙ І БИТТЯ

Як правило, причиною вібрації підшипників неспряженої машини є недостатньо повна врівноваженість її обертальної частини. Частота цієї вібрації дорівнює

$$f = \frac{n}{60}, \quad (5.1)$$

де n – швидкість обертання, об/хв.

У машинах, спряжених з іншими машинами або механізмами, накладається ще вібрація від неврівноваженості цих машин або механізмів та від неправильної прицентровки. Частота таких вібрацій дорівнює f . Вібрації також виникають і з інших причин.

Найпростішим методом вимірювання вібрації є застосування *індикатора годинникового типу*, наконечник якого впирається в ту точку і тому напрямі, в яких потрібно провести вимірювання вібрацій, а корпус кріпиться на основі, що не піддається вібрації. При цьому стрілка індикатора коливається з частотою вимірюваної вібрації в межах більш-менш стійкого кута, величина якого і оцінюється за шкалою індикатора в сотих частках міліметра.

Цей спосіб придатний при частоті вібрації не більше $10 \div 12$ Гц, що відповідає швидкості обертання $600 \div 750$ об/хв.

Складність при використанні цього методу полягає в знаходженні нерухомої основи для застосування індикатора, оскільки вібрація машини передається навколишнім предметам.

Таку складність можна усунути застосуванням індикатора до важкої маси, підвішеної на крані, але необхідність переміщення крана з подальшою повною зупинкою катання маси для кожного нового вимірювання дуже ускладнює і затягує процес вимірювання.

Компромісне вирішення цієї проблеми полягає в прикріпленні корпуса індикатора до маси, яка утримується в руках: чим більша ця маса, тим надійніший результат вимірювання. Однак разом із цим тим складніше отримати результат, особливо для вимірювання вібрації в вертикальному напрямі.

Спеціальними інструментами для вимірювання вібрації є **віброметри** – показуючі прилади – або **вібрографи** – записуючі прилади. Їх можна поділити на дві групи: прилади, які для вимірювання вібрації повинні повністю встановлюватися або прикріплюватися на вібруючому предметі, і прилади, які мають окрему частину або датчик, який приймає вібрацію і передає її основному приладу, який перетворює отриманий сигнал в об’єктивний відлік або запис.

Найбільш досконалі сучасні віброметри і вібрографи належать до другої групи приладів. Вібровимірювальний пристрій дозволяє швидко проводити чергове вимірювання вібрацій одного і того ж об’єкта в різних напрямках і переносити вимірювання з одного об’єкта на інший. Перевагами якісного вібровимірювального приладу є широта діапазону частот, для яких придатний прилад, незалежність показань від частоти та достатня точність вимірювання (похибка не перевищує $\pm 5\%$ вимірюваної величини).

При вимірюванні вібрації підшипників горизонтальних валів підлягають визначенню складові вібрації за трьома взаємно перпендикулярними напрямками – поперечному, повздовжньому і вертикальному, при чому перші два – на рівні осі вала.

Для підшипників вертикальних валів повинні визначатися складові за першими двома взаємно перпендикулярними напрямками в горизонтальній площині та вертикальна складова.

Мірою вібрації є подвійна її амплітуда (або розмах), яка вимірюється в сотих частках міліметра або в мікронах. На потужних електромашинобудівних заводах існують норми для допустимої величини вібрації від швидкості обертання (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Норми для допустимої величини вібрації від швидкості обертання

Швидкість обертання, об/хв	500	600	750	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
Допустима вібрація, мкм	160	140	120	100	85	70	60	50	40	30

Перевага у застосуванні вібрографів перед віброметрами полягає в тому, що вони дозволяють встановити не тільки величину вібрації, але і її частоту, що дає можливість визначити причину вібрації.

Загальним недоліком усіх методів є те, що вони не дають можливості вимірювання вібрацій безпосередньо самих обертальних частин, що було б набагато доцільніше при з'ясуванні їх причин.

Вимірювання биття обертальних частин певною мірою зводиться до вимірювання вібрацій, але відрізняється тим, що здійснюється при дуже повільному обертанні, коли динамічні явища не можуть мати місце. Практично вимірювання биття проводиться на поверхні колекторів, контактних кілець і вільних кінців валів або насаджених на них напівмуфт.

Найбільш розповсюдженим інструментом для вимірювання биття є *індикатор*. При вимірюванні биття гладких поверхонь наконечник індикатора упирається безпосередньо в них; але для вимірювання биття переривчатої поверхні колектора приходиться користуватися притертою до неї щіткою.

Якщо обертальна частина закріплена на підшипниках кочення, то місце розміщення індикатора не має значення. Проте при підшипниках ковзання індикатор необхідно розміщувати або зверху, або знизу, оскільки покачування шийок вала у вкладишах, які мають масляний проміжок, що перевищує величину можливого биття, може цілковито спотворити результати вимірювання при розміщенні індикатора збоку.

Якщо повертання обертальної частини здійснюється на своєму ходу, то поверхня колектора виявляється під напругою. Для того, щоб уникнути можливості замикання на землю через індикатор, його обов'язково потрібно надійно ізолювати від корпусу машини або застосувати нарощування вимірювального стержня індикатора насадкою з твердого ізолюючого матеріала, наприклад з кістки.

При вимірюванні биття важливо правильно встановити штатив індикатора. Для уникнення покачування штатива його можна прикріпити струбцинами до поряд розташованих нерухомих частин машини.

Вимірювання биття колектора машин здійснюється як у холодному, так і в нагрітому стані з метою перевірки їх монолітності. При цьому треба обов'язково провести вимірювання безпосередньо після дослідження при підвищеній швидкості обертання в нагрітому стані.

При вимірюванні биття колектора необхідно брати до уваги не тільки загальну величину биття, але і його характер. Плавний рух стрілки індикатора свідчить про достатню циліндричність поверхні колектора. Навпаки, хаотичне посмикування стрілки і стрибкоподібна зміна її положення вказують на місцеві порушення її циліндричності, особливо небезпечні для роботи щіткового апарату, спричинені провалами або виступами окремих пластин або цілих груп пластин унаслідок неякісного формування колектора.

У випадку провертання колектора на невеликі кути можливо зняття розподілення биття по колу, після чого показання індикатора можуть бути графічно відкладені залежно від умов повороту, але ці вимірювання не відзначаються високою точністю.

На потужних електромашинобудівних заводах прийняті норми допустимого биття колектора (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Норми допустимого биття колектора

Діаметр колектора, мм	Швидкість обертання, об/хв	Биття, мм		Допустиме збільшення биття в гарячому стані порівняно з холодним, мм
		у холодному стані	у гарячому стані	
до 250	до 3000	0,02	0,04	0,02
250÷350	750÷2000	0,02	0,04	0,02
350÷600	600÷1250	0,03	0,05	0,03
600÷900	500÷850	0,03	0,06	0,04
900÷1500	450÷700	0,04	0,07	0,04
понад 1500	до 400	0,04	0,07	0,05

Вимірювання проводились при круговій швидкості не більше 1 м/с і до випадку рівномірного розподілення биття по колу виступання окремих пластин не допускається. Однак може виявитись, що задовільний результат вимірювання биття не гарантує нормальної роботи колектора при повній робочій швидкості, і навпаки, інколи спостерігається, що поверхня нормально працюючого при повній швидкості обертання має значне биття при малих швидкостях, що характерно для колекторів, у яких доводка поверхні виготовлена при повній швидкості обертання.

Питання для самоконтролю

- 1 Яким чином визначається частота вібрації підшипників неспряженої машини?
- 2 Яким чином працює індикатор годинникового типу?
- 3 У чому полягає головна складність застосування індикатора годинникового типу?
- 4 Які прилади відносяться до спеціального інструменту вимірювання вібрації?
- 5 На які групи можна розділити існуючі віброметри та вібрографи?
- 6 Що відноситься до переваг якісного вібровимірювального приладу?
- 7 Що є мірою вібрації?
- 8 У чому полягає перевага вібрографів перед віброметрами?
- 9 Який інструмент є найбільш розповсюдженим для вимірювання биття?
- 10 На що повинна бути звернена особлива увага в усіх випадках вимірювання биття?
- 11 Яким чином здійснюється вимірювання биття колектора?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

ВИМІРЮВАННЯ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ

Необхідно розрізняти три випадки вимірювання обертального моменту:

1) *при нерухомій машині* – може проводитися вимірювання початкового пускового обертального моменту;

2) *при обертанні машини з незмінною швидкістю* – може проводитися вимірювання обертального моменту при навантаженні і перевантаженні в тих межах, у яких робота машини є стійкою;

3) *при обертанні машини зі змінною швидкістю* – може проводитися вимірювання обертального моменту в будь-якому режимі роботи від зрушення з місця до повного холостого ходу.

Для вимірювання обертового моменту використовуються різні способи.

1 **Спосіб гальма** застосовується в перших двох випадках. Він полягає в тому, що на вал досліджуваного двигуна насаджується гальмо: механічне, гідравлічне або електричне. Важіль гальма з визначеним плечем навантажується гирями або спирається на платформу пружинних вагів. При цьому гальмівний момент, що створюється гальмом, визначається з рівняння

$$M = G \cdot l, \text{ кг} \cdot \text{м}, \quad (6.1)$$

де G – зусилля, докладене до гальма, кг;
 l – плече гальма, м.

Значення моменту будуть визначені правильно в тому випадку, якщо гальмо буде врівноваженим і не буде торкатися упорів обмежувача.

Застосування гальма в другому випадку є зручним тому, що дозволяє безпосередньо визначати потужність, яка розвивається на валу двигуна, за формулою

$$P = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{n}{1000} \cdot M \cdot g = 1,027 \cdot M \cdot \frac{n}{1000}, \text{ кВт}, \quad (6.2)$$

де g – прискорення сили тяжіння, рівне $9,81 \text{ м/с}^2$;
 n – швидкість обертання, об/хв.

$$\text{При } l = \frac{1}{1,027} = 0,974 \text{ м, отримаємо } P = G \cdot \frac{n}{1000}, \text{ кВт.}$$

При глухому заклинюванні вала випробовуваної машини в гальмі може здійснюватися вимірювання початкового пускового обертового моменту. Якщо не потрібно проводити вимірювання моменту при обертанні двигуна, то замість гальма застосовується тільки врівноважений важіль, надійно закріплений на валу.

2 **Спосіб тарованого генератора** полягає в тому, що випробовуваний двигун спрягається з тарованим генератором, у якого коефіцієнт корисної дії попередньо ретельно визначений для всіх можливих режимів роботи. Даний спосіб придатний тільки

для другого випадку вимірювання моменту. Шуканий вимірювальний момент дорівнює

$$M = \frac{6 \cdot 1000 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \eta \cdot g} \approx 975 \cdot \frac{P}{n \cdot \eta}, \text{ кг}\cdot\text{м}, \quad (6.3)$$

де P – потужність, що виділяється тарованим генератором, кВт;
 η – ККД генератора в даному режимі роботи;
 n – швидкість обертання, об/хв.

Спряження генератора і випробовуваного двигуна повинно бути безпосереднє (тобто на одному валу).

3 Спосіб уніполярного генератора постійного струму полягає в тому, що з випробовуванням двигуном наглухо, за допомогою жорсткої муфти, з'єднується уніполярний генератор з незалежним збудженням або з постійними муфтами. Напруга його в будь-який момент пропорційна швидкості обертання. Якщо генератор з'єднати з батареєю конденсаторів, то струм, який заряджає батарею, буде пропорційний швидкості зміни напруги або прискоренню випробовуваного двигуна (цей струм може бути записаний за допомогою осцилографа). Застосування уніполярної машини зумовлено тим, що вона не має пазних і колекторних пульсацій напруги.

Найбільшою складністю при застосуванні цього методу є непостійність швидкості відновлення щіткового контакту, яка також є джерелом сильних пульсацій зарядного струму, а також вібрації, нерівномірності проміжку в литих частинах тахометричного генератора.

4 Спосіб торсіометра (крутильного динамометра) дозволяє безпосередньо вимірювати момент обертання.

Торсіометр – це прилад для вимірювання кута закручування вала, який може слугувати мірою обертального моменту, прикладеного до цього вала. Складність приладу перешкоджає його активному застосуванню при випробовуванні електричних машин.

5 Спосіб тензометрів заснований на явищі збільшення електричного опору металів при розтягуванні і зменшення при стисненні (рисунок 6.1).

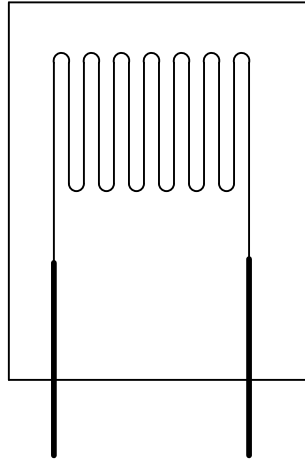


Рисунок 6.1 – Збільшення (зменшення) електричного опору металів при розтягуванні (стисненні)

Тензометр є плоским папером, на який розчином чистого без кольору целулоїду в ацетоні наклеєний тонкий дріт у вигляді дуже щільного зигзага. Традиційні розміри площадки, покритої зигзагом, не перевищують 10×20 мм, але за необхідності можуть бути зроблені і меншими. Тензометр наклеюється таким же розчином на поверхню, на якій необхідно виміряти механічні напруження, у напрямі дії цих напружень, і вмикається як плече моста. Другим плечем моста є, як правило, другий тензометр, який має в ненапруженому стані такий самий опір і наклеєний у такому ж місці, температура якого дорівнює температурі місця наклеювання першого тензометра. Призначення другого тензометра полягає в тому, щоб компенсувати зміну опору першого тензометра від температури.

При вимірюванні напруги на поверхнях деталей, які підлягають розтягу, стисненню або згину, другий тензометр наклеюється на спеціально ненапружений брусок (рисунок 6.2). Однак при вимірюванні напружень на поверхні скручуваного циліндричного вала береться до уваги той факт, що найбільші напруження розтягу і стиснення, а тому і відповідні їм деформації, рівні, взаємно перпендикулярні і направлені під кутом у 45° до осі вала; два тензометри наклеюються на поверхню вала поряд під цими кутами.

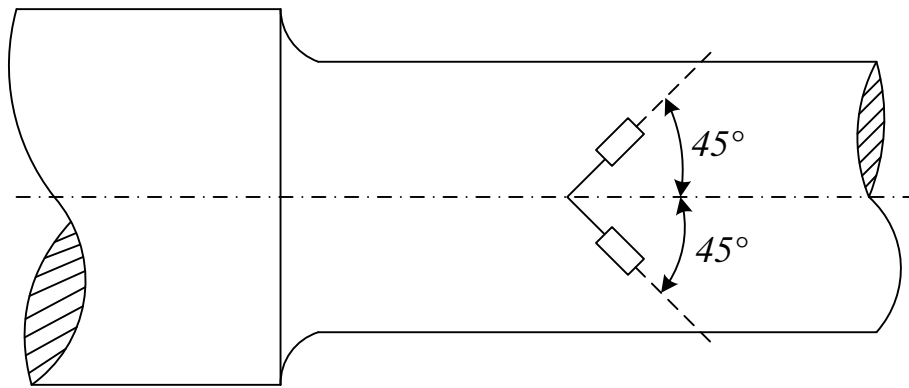


Рисунок 6.2 – Схема розташування тензометрів

Якщо вимірювання моменту здійснюється при нерухомій машині, то наклеєні тензометри безпосередньо поєднуються з іншою частиною схеми моста. При вимірюваннях, які здійснюються на ходу машини, з'єднання повинно відбуватися за допомогою ковзальних контактів. У зв'язку з цим активно даний метод не застосовується, оскільки установлення контактних кілець на досліджуваній машині ускладнена. З огляду на це бажано проводити спряження випробовуваної машини з допоміжною машиною через проміжний валик із заздалегідь обладнаним на ньому контактним пристроєм.

За наявності осевого свердління вала випробовуваної машини можливе застосування окремого контактної пристрою, який приєднується до кінця вала за допомогою гнучкого порожнистого валика, усередину якого пропускаються з'єднувальні провідники. Практика засвідчує, що правильно виконаний контактний пристрій не вносить значних похибок у вимірювання. Проте найбільш простим і надійним вирішенням цього питання є застосування цільних провідників без контактної пристрою для вимірювань при пуску (провідникам дається необхідний запас довжини для навертання на вал, після чого вони обриваються). При цьому дуже важливо, щоб першим розривався провідник у колі вимірювального пристрою для запобігання його пошкодженню при порушенні рівноваги моста від розриву його плечей.

При вимірюванні моменту в нерухомому стані живлення моста може здійснюватися постійним струмом, а вимірювання – або методом врівноваженого моста шляхом підбору опорів інших двох

його плечем, або методом неврівноваженого моста шляхом вимірювання струму у вимірювальній діагоналі моста (що швидше, але менш точно).

Однак при вимірюванні моменту на ходу, коли його значення постійно і швидко змінюється, необхідно живити міст змінним струмом у зв'язку з тим, що

- струм у вимірювальній діагоналі моста досить слабкий, щоб його можна було безпосередньо, без підсилення, подавати на вібратор осцилографа;

- ковзний контакт може бути джерелом термоелектрорушійних сил, які спотворюють вимірювання;

- в обертальній машині можливі різноманітні завади від ЕРС, що наводяться, які при живленні схеми змінним струмом можуть бути повністю усунуті гострим налаштуванням схеми на частоту живлення.

З огляду на вищезазначені причини живлення моста, як правило, здійснюється від окремого лампового генератора звукової частоти.

Якщо відомі механічні властивості матеріалу, з якого виготовлений вал, то за вимірюною деформацією на основі законів опору матеріалів не становить труднощів визначити напругу на поверхні скручування вала, звідки потім визначається скручуваний момент

$$M_k = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot \tau}{1600} \approx 975 \cdot \frac{P}{n \cdot \eta}, \text{ кг} \cdot \text{м}, \quad (6.4)$$

де d – діаметр вала, см;

τ – сколююча напруга на поверхні вала, кг/см².

При нерухомому двигуні, загальмованому через кінець вала, виміряний момент, який скручує вал, рівний моменту, що розвиває двигун, за вирахуванням моменту початкового тертя в підшипниках, яким у випадку підшипників ковзання нехтувати не можна.

Коли двигун пускається вхолосту, його вал не підлягає скручуванню, якщо не брати до уваги момент тертя в підшипниках на ходу, відносно мізерного в нормальних умовах. Для того, щоб

при пуску відбулось скручування вала, необхідно з'єднати його з якою-небудь маховою масою. Як правило, такою масою слугує оберտальна частина другої електричної машини.

Якщо позначити через M_k – виміряний скручуваний момент; через J_∂ – момент інерції оберտальної частини двигуна, а через J_m – момент інерції спряженої з двигуном маси, то обертальний момент M , який розвивається двигуном при пуску, буде дорівнювати

$$M = M_k \cdot \frac{J_m + J_\partial}{J_m} = M_k \cdot \left(1 + \frac{J_\partial}{J_m} \right). \quad (6.5)$$

Якщо випробовуваний двигун спряжений з іншим таким самим двигуном, то

$$J_m = J_\partial; \quad M = 2 \cdot M_k. \quad (6.6)$$

При обертанні з незмінною швидкістю, незалежно від співвідношення махових моментів обертальних частин двигуна і приводної машини, виміряний скручуваний момент рівний обертальному моменту, який передається двигуном приводної машини.

Вимірювання швидкості обертання і ковзання. Переважна більшість випробувань електричних машин на ходу потребує вимірювання швидкості обертання.

Розглянемо способи.

1 Спосіб лічильника обертів. Цей спосіб застосовують, коли вимірювана швидкість обертання сповна стійка. Він полягає в тому, що за допомогою секундоміра визначається проміжок часу T у секундах, необхідних для здійснення валом машини N обертів. Шукана швидкість обертання тоді буде дорівнювати

$$n = \frac{60 \cdot N}{T}, \text{ об/хв.} \quad (6.7)$$

Існують конструкції лічильників обертів, які автоматично вказують середню швидкість обертання за деякий невеликий проміжок часу (наприклад 3 с), називані *тахосконами*.

2 Спосіб центробіжного тахометра – цей спосіб набуває широкого застосування, його перевагою є швидкість вимірювань і можливість здійснювати їх як при незмінній, так і при змінній швидкості обертання.

Головним його недоліком є невисока точність і складність градування тахометрів. Крім того цей спосіб не може застосовуватись при випробовуваннях малопотужних машин, для яких втрати на тертя всередині механізму тахометра становлять помітне навантаження.

3 Стробоскопічний спосіб із застосуванням тахометра. Цей спосіб призначений для тих випадків, коли вал випробовуваної машини недоступний, хоча обертальні частини знаходяться на видному місці. Для даного способу потрібен невеликий універсальний колекторний двигун, бажано з двома вільними кінцями вала, до одного з яких приєднується тахометр, а на інший насаджується зачорнений диск з вузькою прорізю. Регулюючи швидкість обертання двигуна, можна добитися того, що обертальна частина об'єкта випробовування, яка розглядається через прорізь обертального диска, буде здаватися нерухомою. Відлік за тахометром, з'єднаним з двигуном, дає в цей момент шукану швидкість обертання або величину, яка знаходиться в ній в простому співвідношенні. Для підсилення ефекту необхідно забезпечити обертальну частину ярко помітною міткою, а також освітлювати її можливо більш сильним джерелом світла, що виявляється корисним навіть при денному освітленні.

4 Стробоскопічний спосіб без застосування тахометра. Даний спосіб полягає в тому, що вал випробовуваної машини освітлюється газорозрядною лампою, яка живиться ламповим генератором регульованої частоти, радіатор якого градуйований прямо в числах обертів за хвилину. Відлік за лімбом варіатора береться в той момент, коли вал випробовуваної машини в світлі спалахів лампи уявляється нерухомим.

При низьких швидкостях руху до торця вала кріпиться білий диск з декількома секторами, або ж на поверхню вала наклеюється смуга білого паперу з декількома рівно відстаючими одна від одної чорними мітками. Відрахунок за лімбом варіатора ділиться при цьому на число чорних секторів або міток. Цей спосіб є одним з найбільш комфортних і набуває широкого застосування.

5 Спосіб частотометра. Цей спосіб полягає в тому, що з випробовуваною машиною з'єднується невеликий генератор змінного струму, напруга якого подається на вібраційний частотометр. Якщо f – частота, що вимірюється частотометром, p – число пар генератора, то шукана швидкість обертання дорівнює

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \text{ об/хв.} \quad (6.8)$$

За відсутності відповідного генератора цей спосіб можна видозмінити: на вал випробовуваної машини насаджується переривач, який складається з почергово ізолюючих і провідних пластин; до його поверхні притискаються дві щітки, розміщені поряд, але ізольовані одна від іншої, до яких вмикається коло, яке складається з джерела постійного струму і вібраційного частотометра. При обертанні вала провідні пластини переривача почергово замикають щітки, тим самим посилають в частотометр імпульси струму від джерела, під дією яких частотометр дає показання. Швидкість обертання визначається за формулою (6.8), якщо в ній за p прийняти число провідних пластин переривача. Напруга джерела постійного струму підбирається такою, щоб частотометр давав якісні помітні показання.

Перевага цього різновиду способу не тільки в легкості його здійснення, але і в придатності для вимірювання скільки завгодно малих швидкостей обертання, які потребують лише збільшення кількості пластин переривача до такої, щоб частота імпульсів струму виявилася в границях вимірювання частотометра.

6 Спосіб тахометричного генератора з вольтметром. Такий спосіб особливо придатний, коли швидкість обертання змінюється в дуже широких границях. З випробовуваною машиною з'єднується невелика машина постійного струму з незалежним збудженням.

Ще кращі результати дає застосування спеціальних тахометричних генераторів з постійними магнітами. Напруга якоря подається на точний магнітно-електричний вольтметр, показання якого при незмінному збудженні пропорційні швидкості обертання. Цей спосіб досить точний за умови, що

вольтметр добре проградуїований на оберти за хвилину, для чого достатньо однієї точки, для якої швидкість обертання вимірюється ще яким-небудь способом; від правильності останнього вимірювання залежить абсолютна точність даного способу.

7 Спосіб резонансу. Цей спосіб полягає в тому, що на випробовувану машину або поряд з нею навішують або ставлять вібраційний частотометр, язички якого приходять в резонанс з вібрацією машини. Зустрічаються вібраційні тахометри, прямо градуїовані на число обертів за хвилину. Спосіб цей придатний головним чином для вимірювання великих швидкостей обертання. При його застосуванні необхідно застерігатися вібрацій від машин, що працюють по сусідству.

Різновидом вимірювання швидкості обертання є вимірювання **ковзання асинхронних двигунів**, під яким розуміється виражена, як правило, у відсотковому відношенні різниця між швидкістю обертання обертального поля n_o , або синхронною швидкістю, і дійсною швидкістю обертання двигуна n , до синхронної швидкості

$$S = \frac{n_o - n}{n_o} \cdot 100, \% \quad (6.9)$$

Так як ковзання при навантаженнях, близьких до номінального, зазвичай не перевищує декількох відсотків, визначення його за допомогою вимірювання швидкості обертання n цілковито неприйнятно. Тому приходиться застосовувати способи, які дозволяють визначити безпосередньо різницю $n_o - n$.

1 Спосіб амперметра постійного струму. Даний спосіб може бути застосовано тільки при випробовуванні двигуна з фазним ротором і постійно налягаючими щітками. В одну з фаз кола ротора вводиться шунт магнітоелектричного амперметра на струм, не менший ніж амплітуда очікуваного струму в обмотці ротора; бажано, щоб прилад мав нуль в середині шкали.

Так як при невеликих ковзаннях частота струму в обмотці ротора f_2 невелика, то стрілка амперметра здійснює покочування з цією частотою. Якщо за допомогою секундоміра визначити проміжок часу T в секундах, потрібний на здійснення N повних покочувань, то частота їх буде дорівнювати

$$f_2 = \frac{N}{T}, \text{ Гц.} \quad (6.10)$$

З огляду на те, що між частотою f_2 і ковзанням S існує залежність

$$S = \frac{f_2}{f_1} \cdot 100, \%, \quad (6.11)$$

де f_1 – частота струму, що створює оберতальне магнітне поле, то

$$S = \frac{N}{T \cdot f_1} \cdot 100, \%, \quad (6.12)$$

а при $f_1 = 50$ Гц

$$S = \frac{2 \cdot N}{T}, \%. \quad (6.13)$$

Для практичних цілей достатньо обмежитися відліком $N = 20$ повних покочувань, тоді

$$S = \frac{40}{T}, \%. \quad (6.14)$$

2 Спосіб індукційної котушки. Цей спосіб є видозміненням попереднього, придатним для застосування до будь-яких асинхронних двигунів – як з фазними, так і з короткозамкненими роторами. Він полягає в тому, що поблизу від кінця вала випробовуваного двигуна розміщується котушка з великою кількістю витків з сердечником, з'єднана з чутливим магнітоелектричним гальванометром з нулем в сердечнику шкали. Потoki розсіювання обмотки ротора індукують в котушці ЕРС, яка приводить гальванометр в дію. У всьому іншому цей спосіб не відрізняється від попереднього.

Недоліком вказаних двох способів є те, що при малих ковзаннях, коли струми в обмотці ротора і їх поля розсіювання дуже слабкі, відхилення рухомої системи застосовуваного

приладу стають наскільки малими, що їх відлік являє великі складнощі, а при великих ковзаннях відносно важка рухома система приладу перестає встигати реагувати на зміну струму, що протікає по ній.

3 Стробоскопічний спосіб з застосуванням синхронного двигуна. При застосуванні даного способу на вал невеликого двополюсного реактивного синхронного двигуна, який живиться напругою тієї ж частоти, що і випробовувана машина, насаджується зачорнений диск з прорізю, через яку проглядається обертальна частина машини. Якщо б випробовувана машина була також двополюсною та оберталася синхронно, то через прорізь вона здавалася б нерухомою. Але коли випробовувана машина обертається зі швидкістю, меншою синхронної, маючи деяке ковзання, то за кожний повний оберт диска її ротор встигає повернутись дещо менше, ніж на повний оберт, тому якщо дивитися через прорізь, буде здаватися, що він обертається у бік, протилежний дійсному напрямку обертання. Очевидно, що за один період струмів в роторі випробовуваної машини ротор повинен відстати від синхронно обертального поля на один повний оберт, відповідно, якщо визначити час T , потрібний на відставання ротора на N обертів, то застосовуючи формулу (6.14), можна визначити ковзання S .

Якщо випробовувана машина має p пар полюсів, то при синхронному обертанні її ротор за кожний оберт диска встигав би повернутися тільки на $1/p$ частину оберта, мітка на валу випробовуваної машини, поставлена для полегшення відліку його навантажуючих обертів, буде при цьому уявлятися помноженою в p раз. Для того щоб зображення зберегло попередню яскравість, необхідно закріпити на торці вала випробовуваного двигуна диск з p -чорними секторами на білому фоні. При цьому необхідно рахувати за N уже не число обертів, а число проходження чорних секторів вздовж якої-небудь нерухомої точки.

Якщо синхронний реактивний двигун має p' пар полюсів, то в диску необхідно зробити не один, а p' прорізів.

Останнім часом з застосуванням електронної та напівпровідникової техніки з'явилися прилади, що працюють на принципі порівняння числа обертів за визначений проміжок часу або парного йому числа імпульсів з числом періодів або

каліброваного генератора. Вони подібні до тахометрів або джерел живлення випробовуваної машини, і працюють як вимірювачі ковзання, причому результат виміру видається у вигляді цифрового відліку.

Питання для самоконтролю

- 1 Які існують випадки вимірювання обертального моменту?
- 2 Які способи використовуються для вимірювання обертального моменту?
- 3 Охарактеризуйте спосіб гальма для вимірювання обертального моменту.
- 4 Охарактеризуйте спосіб тарованого генератора для вимірювання обертального моменту.
- 5 Охарактеризуйте спосіб уніполярного генератора постійного струму для вимірювання обертального моменту.
- 6 Що являє собою торсіометр?
- 7 Охарактеризуйте спосіб тензометрів для вимірювання обертального моменту.
- 8 Що являє собою тензометр?
- 9 Яка обставина є найбільш великою перепорою для широкого застосування способу тензометрів?
- 10 З яких причин необхідно живити міст змінним струмом при вимірюванні моменту на ходу, коли його значення постійно і швидко змінюється?
- 11 За допомогою яких способів здійснюється вимірювання швидкості обертання під час випробувань електричних машин?
- 12 Охарактеризуйте спосіб вимірювання швидкості обертання за допомогою лічильника обертів.
- 13 Що являє собою тахоскон?
- 14 Охарактеризуйте спосіб вимірювання швидкості обертання за допомогою центробіжного тахометра.
- 15 Охарактеризуйте стробоскопічний спосіб вимірювання швидкості обертання із застосуванням тахометра.
- 16 Охарактеризуйте стробоскопічний спосіб вимірювання швидкості обертання без застосування тахометра.

17 Охарактеризуйте спосіб вимірювання швидкості обертання за допомогою частотометра.

18 Охарактеризуйте спосіб вимірювання швидкості обертання за допомогою тахометричного генератора з вольтметром.

19 Охарактеризуйте спосіб вимірювання швидкості обертання за допомогою резонанса.

20 Що розуміється під ковзанням асинхронних двигунів?

21 За яких обставин застосовується і у чому полягає спосіб амперметра постійного струму?

22 За яких обставин застосовується і у чому полягає спосіб індукційної котушки?

23 Що є основним недоліком застосування способів амперметра постійного струму та індукційної котушки?

24 Охарактеризуйте стробоскопічний спосіб з застосуванням синхронного двигуна.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7

ВИПРОБУВАННЯ НА НАГРІВАННЯ

Випробування на нагрівання зводиться до визначення підвищень температури різних частин машини, під якими розуміються різниці між температурою цих частин і температурою охолоджуючого середовища, отримані в результаті роботи машини в номінальному або заданому режимі.

Найбільш природним є фактичне здійснення даного режиму роботи, тобто створення відповідного йому режиму машини, що випробовується. Таке випробування носить назву *випробування на нагрівання при безпосередньому навантаженні*. Проте чим більше потужність випробовуваної машини, тим важче здійснюється її безпосереднє навантаження, коли не завжди вдається здійснювати і підтримувати задані режими роботи протягом необхідного часу. Тому дуже часто доводиться замінювати заданий режим роботи яким-небудь іншим, легше здійснюваним, при якому склад втрат, які нагрівають окремі частини машини, був би по - можливості близький до заданого режиму роботи. Таке випробування називається *випробуванням*

на нагрівання при штучному навантаженні. Звичайно результати його потребують введення деяких поправок, визначених за допомогою допоміжних випробувань.

Якщо підібрати відповідний режим роботи не вдається, то доводиться звертатися до ряду випробувань, в яких нагрівання різних частин машини проводиться по черзі різними видами втрат, існуючих при заданому режимі роботи одночасно, а потім визначати необхідне перевищення температури цих частин на підставі отриманих результатів. Це випробування називається **випробуванням на нагрівання непрямым методом.**

Відповідно до різних видів номінальних режимів роботи випробування можуть бути **тривалими, короткочасними, повторно-короткочасними і перемежованими.** Всього розрізняють вісім номінальних режимів роботи.

Тривалим номінальним режимом роботи (S1) електричної машини називається режим роботи при незмінному номінальному навантаженні, яке триває стільки часу, що перевищення температури всіх частин машини при незмінній температурі охолоджуючого середовища досягає практично сталих значень.

Під **практично сталою температурою** будь-якої частини машини розуміється температура, зміна якої не перевищує $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом однієї години за умови, що навантаження машини і температура охолоджуючого середовища залишаються практично незмінними.

Практично незмінною температурою охолоджуючого середовища вважається температура, яка змінюється не більше ніж на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за одну годину для газоподібного охолоджуючого середовища і не більше ніж на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за одну годину для рідкого охолоджуючого середовища, а **практично незмінним навантаженням** таке навантаження, при якому відхилення напруги тільки головного кола і потужності від заданих значень складають не більше $\pm 3\%$, а струму збудження і частоти – не більше $\pm 1\%$.

Проте на практиці при випробуванні електричної машини вважають, що усталений тепловий стан досягається тільки тоді, коли останні три відліки за всіма застосовуваними вимірюваннями дають в основному повторювані результати.

Тривалість випробування на нагрівання в тривалому режимі роботи, якщо воно почато від практично холодного стану машини, при інших рівних умовах залежить від номінальної потужності машини – зростає зі збільшенням потужності, але ще в більшому ступені вона залежить від інтенсивності охолодження машини.

Чим інтенсивніше охолодження, тим швидше встановлюється температура всіх частин машини; тому тривалість випробування на нагрівання менше для швидкохідних добре охолоджуваних машин і більше для машин тихохідних і слабо охолоджуваних, а тим більш закритих або герметичних, у яких тепловіддача здійснюється тільки з зовнішньою поверхнею корпусу.

Разом з тим неоднакова тривалість встановлення температури для різних частин однієї і тієї ж машини: вона тим менше, чим краще охолоджується дана частина. Температура обертальних частин загалом визначається швидше, ніж нерухомих, так як обертальні частини краще омиваються охолоджуючим середовищем. Таким чином, встановлення температури нерухомих частин, в більшості випадків більш доступних для вимірювання температури, може служити достатньою підставою вважати, що і температура обертальних частин встановилася.

Для скорочення часу випробування можна на початку його перевантажити машину в межах, які є допустимими з точки зору механічної та електричної міцності машини.

В інтенсивно охолоджуваних машинах замість перевантаження для прискорення випробування на його початку може застосовуватися навмисне погіршення охолодження.

Якщо машини призначені для декількох номінальних режимів, то допускається проведення випробувань на нагрівання в одному з них, де перевищення температури повинні бути найбільшими.

Якщо машина повинна піддаватися випробуванням на нагрівання в декількох тривалих режимах роботи, то доцільно вести ці випробування одне за іншим, не даючи машині сильно охолонути в проміжках між ними. Запис показань всіх застосовуваних вимірів температури рекомендується проводити в середньому через кожні 30 хвилин; тільки при випробуваннях великих і слабо охолоджених машин, що тривають більше восьми годин, інтервали між випробуваннями можна збільшити до однієї години. Навпаки, при випробуваннях швидкохідних і інтенсивно

охолоджуваних машин з тривалістю випробування до двох годин доцільно проводити відліки частіше, через 15÷20 хвилин.

Паралельно з відліками за всіма вимірюваннями температури слід проводити відліки і за всіма електровимірювальними і іншими приладами, що застосовуються для контролю встановленого режиму роботи.

Випробування на нагрівання в режимах навантаження. В процесі випробування може піддаватися безперервному контролю температура наступних частин машини.

1 Температура всіх нерухомих обмоток – за опором. Для цієї мети до затискачів кожної обмотки повинен бути підключений вольтметр з відповідною межею вимірювань. Оскільки опори всіх обмоток послідовного кола (послідовного збудження, додаткових полюсів) зазвичай малі, для їх вимірювання доводиться застосовувати вольтметри з дуже невеликими межами вимірювань, що мають малий внутрішній опір. На практиці для виключення впливу опору контактів провідників, що підмикаються, на показання вольтметра їх припаюють до виводів обмоток.

Перед початком випробування на нагрівання необхідно насамперед виміряти всі опори саме тими приладами, які будуть застосовані при випробуванні, для чого слід швидко підняти навантаження приблизно до номінального значення струму і провести два-три відліки при декількох відмінних один від одного значеннях, не даючи при цьому обмоткам скільки-небудь помітно нагрітися.

Однак якщо опір контактів всередині обмотки складає більшу частину всього його опору, як це нерідко буває в обмотках додаткових полюсів, обмотках послідовного збудження і особливо в компенсуючих обмотках, спосіб опору не дає правильного уявлення про температуру обмотки і повинен бути замінений способом термометра або вбудованих температурних індикаторів.

2 Температура підшипників ковзання (їх змащувального мастила) вимірюється термометрами або температурними індикаторами, зануреними в масло.

3 Температура вхідного і вихідного повітря в машинах зі штучною вентиляцією вимірюється переважно термометрами, які повинні бути розташовані у всіх отворах для входу та виходу повітря не менше ніж по два на кожний.

4 **Температура корпусу** в машинах закритого виконання вимірюється переважно термометрами у кількості не менш двох на машину.

5 **Температура щіток**, вимоги виміру якої висуваються в окремих випадках. Єдиним прийнятним для цього вимірювання можна визнати тільки **спосіб термопар**. Для закладки термопар треба висвердлити в тілі щітки невеликий отвір на глибину 3÷5 мм, в який помістити спай термопар за допомогою шматочка фольги.

По завершенні випробування на нагрівання після повної зупинки і відключення всіх обмоток від джерел живлення проводяться такі вимірювання температури:

1 **Температура обмотки якоря** може визначатися за способом опору з екстраполяцією на момент відключення; але якщо через малість опору і достатність контактів при цьому виникають труднощі, то застосовуються способи термометра або термопар. Для скорочення часу вимірювання термометри попередньо підігріваються найбільш нагрітими нерухомими частинами машини.

2 **Температура сталі осердя якоря** визначається за способами термометра або термопар так само, як і температура обмотки. Зазвичай мова може йти тільки про температуру зубців, оскільки проникнути до тіла якоря неможливо.

3 **Температура колектора** також визначається за способами термометра або термопар; але особливо можна рекомендувати застосування голчастих термопар, так як їх показання практично безінерційні.

4 **Температура бандажів на лобових частинах обмотки якоря** також визначається способами термометра або термопар.

Обсяг випробування на нагрівання вказується деякими зі стандартів на окремі види машин. Особливо докладно це питання розглянуто для тягових машин. Згідно зі стандартом при типовому випробуванні, наприклад, двигуна для магістральних електровозів, пропонується визначення цілої сітки кривих нагрівання і охолодження.

Визначення сітки здійснюється при номінальній напрузі і номінальній витраті охолоджуючого повітря при струмах від 40 до 160 % номінального.

Випробування на нагрівання непрямим методом. Для машин потужністю понад 100 кВт випробування на нагрівання допускається проводити *непрямим методом*. Випробування на нагрівання непрямим методом можна проводити стосовно тільки до тривалого режиму роботи.

Принцип випробування на нагрівання непрямим методом для машин постійного струму полягає в тому, що проводяться окремі випробування на нагрівання в режимах холостого ходу і короткого замикання генератора з метою визначення, якою мірою нагрівання кожної з частин машини залежить від навантаження струмом і від напруги на затискачах. На підставі отриманих результатів обчислюється тим чи іншим способом перевищення температури, які повинні мати всі ці частини при номінальному навантаженні.

У найпростішому випадку достатньо двох випробувань на нагрівання: в режимі короткого замикання при номінальному струмі і в режимі холостого ходу при номінальному магнітному потоці, в обох випадках при номінальній швидкості обертання.

У режимі короткого замикання якір машини завантажений усіма втратами, крім втрат в сталі: тому, якби вдалося встановити, в якій мірі ці останні беруть участь в його нагріванні, можна було б передбачити перевищення температури всіх його частин при номінальному навантаженні.

В режимі холостого ходу якір абсолютно не навантажений струмом, отже, його нагрівання визначається тільки втратами холостого ходу, тобто втратами в сталі і механічними втратами. Для виключення втрат на тертя щіток на колекторі їх підіймають під час досліду нагрівання в режимі холостого ходу.

Перевищення температури кожної частини якоря при номінальному навантаженні може бути після цього визначено як сума перевищень температури цієї частини при короткому замиканні і при холостому ході зі збудженням.

Короткочасним номінальним режимом роботи (S2) електричної машини називається такий режим роботи, при якому періоди незмінного номінального навантаження чергуються з періодами відключення машини, причому перші з них не настільки тривалі, щоб перевищення температури всіх частин машини при практично незмінній температурі охолоджуючого середовища могли досягти практично сталого значення, а другі

настільки тривалі, що всі її частини приходять в практично холодний стан. Нормальні **тривалості короткочасних режимів роботи** встановлені такі: 10, 30, 60 і 90 хвилин, але в технічних умовах на окремі машини або види машин нерідко вказуються і інші тривалості.

Випробування на нагрівання в короткочасному режимі роботи повинні починатися з практично холодного стану машини, так як будь-яке попереднє перевищення температури її частин буде спотворювати результати випробування тим більшою мірою, чим менше тривалість режиму роботи. Відліки за вимірювачами температури повинні бути зроблені бажано одночасно наприкінці робочого періоду; це не перешкоджає тому, щоб вони проводилися і впродовж всього цього періоду, причому чим частіше, тим краще, так як за наростанням температури можна контролювати правильність остаточних результатів.

Під **повторно-короткочасним номінальним режимом роботи** (S3) електричної машини розуміється такий режим роботи, при якому короткочасні періоди незмінного номінального навантаження (робочі періоди) чергуються з періодами відключення машини (паузами), причому як ті, так і інші не настільки тривалі, щоб перевищення температури окремих частин машини при практично незмінній температурі охолоджуючого середовища могли досягти практично сталих значень; проте періоди навантаження досить тривалі для того, щоб підвищені пускові втрати на початку кожного робочого періоду не могли значно впливати на перевищення температури в кінці його.

Повторно-короткочасний режим роботи характеризується **відносною тривалістю ввімкнення** (ТВ), яка виражена у відсотках і являє відношення тривалості робочого періоду до тривалості повного циклу, тобто суми робочого періоду і паузи.

Нормальними вважаються тривалості ввімкнення з $ТВ = 15, 25, 40, 60 \%$, причому тривалість одного циклу, якщо немає інших вказівок, повинна складати 10 хвилин.

Машини, призначені для повторно-короткочасного режиму роботи, на час паузи відключаються і зупиняються. Тільки обмотки збудження машин постійного струму можуть залишатися безперервно ввімкненими, якщо це передбачено характером роботи.

Нагрівання при повторно-короткочасному режимі роботи відрізняється від нагрівання в тривалому режимі роботи тим, що температура частин машини то збільшується протягом робочих періодів, то знижується протягом пауз. Тому замість поняття про практично сталу температуру введено поняття про практично повторювану температуру будь-якої частини машини при повторно-короткочасному режимі роботи. Під **практично повторюваною температурою** розуміється така температура цієї частини в моменти вимкнень (або ввімкнень), зміна якої від одного робочого періоду до іншого не перевищує 2 °С протягом однієї години за умови, що навантаження машини під час робочих циклів, тривалість увімкнення і температура охолоджуючого середовища залишаються практично незмінними.

Випробування на нагрівання при повторно-короткочасному режимі роботи може бути розпочато як з практично холодного, так і з нагрітого стану машини. З метою скорочення тривалості випробування на початку його може бути допущене або перевантаження, або навмисне погіршення охолодження, або з'єднання декількох робочих періодів в один без пауз.

Рекомендується автоматизувати процеси увімкнення і вимкнення машини переважно за допомогою монтажного пристрою, що приводиться в дію асинхронним або реактивним двигуном і попередньо добре перевірений за секундоміром.

Вимірювання температури необхідно проводити після закінчення половини останнього робочого періоду.

Під **перемежованим номінальним режимом роботи (S6)** електричної машини розуміється такий режим роботи, при якому короткочасні періоди незмінного номінального навантаження (робочі періоди) чергуються з періодами холостого ходу (паузами), причому як ті, так і інші не настільки тривалі, щоб перевищення температури окремих частин машини при практично незмінній температурі охолоджуючого середовища могли досягти практично сталих значень.

Перемежований режим роботи характеризується **відносною тривалістю навантаження (ТН)**, що виражається у відсотках і подається як відношення тривалості робочого періоду до тривалості повного циклу.

Нормальною вважають тривалість навантаження $T_H = 15, 25, 40$ і 60% , а тривалість одного циклу, якщо немає інших вказівок, повинна дорівнювати 10 хвилин.

З точки зору проведення досліду на нагрівання для перемежованого режиму роботи, може бути повністю застосовано все сказане вище для повторно-короткочасного режиму роботи.

Крім перерахованих основних режимів роботи розрізняють ще чотири додаткових.

Повторно-короткочасний номінальний режим роботи з частими пусками (S4), який відрізняється від основного повторно-короткочасного режиму роботи (S3) тим, що число повних циклів за одну годину при ньому значно більше. Встановлено такі числа пусків за годину: 30, 60, 120 і 240.

Внаслідок цього при даному режимі роботи вже не можна знехтувати впливом виділення тепла при пуску на перевищення температури частин машини. Значення відносної тривалості ввімкнення (ТВ) – 15, 25, 40 і 60 %.

Крім цього даний режим роботи характеризується ще так званим **коефіцієнтом інерції**, під яким розуміють відношення суми моментів інерції обертальної частини двигуна і приводного механізму до моменту інерції обертальної частини двигуна. Чим більше коефіцієнт інерції, тим більш затяжним при інших рівних умовах буде кожен пуск, отже, тим більший вплив на підвищення температури частин машин буде надавати виділення тепла в процесі кожного пуску. За нормальні значення коефіцієнта інерції прийняті: 1,2; 1,6; 2,5; і 4.

Повторно-короткочасний номінальний режим роботи з частими пусками і електричним гальмуванням (S5) відрізняється від попереднього тим, що кожен робочий період закінчується в ньому не просто відключенням машини, але ще і її електричним гальмуванням. Яким би із застосовуваних способів не здійснювалося це гальмування, воно неминуче пов'язане з додатковим виділенням тепла в машині, яке буде тим більше, чим вище значення коефіцієнта інерції.

Значення відносної тривалості ввімкнення, коефіцієнта інерції і кількості пусків за годину тут ті ж, що і в попередньому режимі роботи.

Порівняно з основним повторно-короткочасним режимом роботи останні два додаткових важче для здійснення при випробуванні, так як вимагають ще більш точного встановлення тривалості робочих періодів і пауз, та до того ж потребують підбору моменту інерції навантажувального пристрою у відповідно до заданого коефіцієнта інерції.

Перемежований номінальний режим роботи з частими реверсами і електричним гальмуванням (S7) відрізняється від основного перемежованого режиму роботи (S6) тим, що при ньому немає пауз – робочі періоди при тому і іншому напрямках обертання чергуються один за одним, кожен з них закінчується електричним гальмуванням, що переходить потім без перерви в пуск в зворотному напрямку, яким починається наступний робочий період.

Тому даний режим роботи може характеризуватися **числом реверсів за годину**, яке встановлено рівним 30, 60, 120 і 240, та коефіцієнтом інерції – 1,2; 1,6; 2,5; 4.

Ці три режими в основному призначені для двигунів; однак можна застосувати їх і для генераторів, які індивідуально живлять двигуни, що працюють в наступних режимах.

Перемежований номінальний режим роботи з двома і більш швидкостями обертання (S8) – складається з неперервно чергуючих циклів, кожен з яких, у свою чергу, складається з двох чи більше робочих періодів з різними швидкостями обертання та відповідними їм різними незмінними навантаженнями. При цьому кожен перехід від більшої швидкості обертання до меншої супроводжується втратами електричного гальмування, а від меншої швидкості до більшої – втратами розгону, які впливають на нагрівання частин машини.

Даний режим роботи характеризується числом повних циклів за годину, для яких встановлені нормальні значення 30, 60, 120 і 240, коефіцієнтом інерції: 1,2; 1,6; 2,5; 4 і тривалістю навантаження при кожній зі швидкостей обертання, яка не нормована і встановлюється за згодою між споживачем і постачальником.

Для всіх трьох перемежованих номінальних режимів роботи допускається проводити випробування на нагрівання в еквівалентному тривалому режимі роботи, струм якого дорівнює середньоквадратичному струму даного режиму роботи.

Питання для самоконтролю

1 У чому полягає випробування на нагрівання електричних машин?

2 Що називають випробуванням на нагрівання при безпосередньому навантаженні?

3 Що називають випробуванням на нагрівання при штучному навантаженні?

4 Що називають випробуванням на нагрівання непрямим методом?

5 Якими можуть бути випробування машин відповідно до різних видів номінальних режимів роботи?

6 Який режим роботи електричної машини називається тривалим номінальним режимом роботи?

7 Яка температура розуміється під практично сталою температурою будь-якої частини машини?

8 Що розуміється під практично незмінною температурою охолоджуючого середовища?

9 Що розуміється під практично незмінним навантаженням електричної машини?

10 Температура яких частин машини в процесі випробування на нагрівання в режимах навантаження може піддаватися безперервному контролю?

11 Яким чином здійснюється вимірювання температури всіх нерухомих обмоток в процесі випробування на нагрівання в режимах навантаження?

12 За допомогою якого способу здійснюється вимірювання температури щіток в процесі випробування на нагрівання в режимах навантаження?

13 Які вимірювання температури проводяться по завершенні випробування на нагрівання після повної зупинки і відключення всіх обмоток від джерел живлення?

14 Яким чином можна визначити температуру обмотки якоря по завершенні випробування на нагрівання?

15 За допомогою яких способів можна визначити температуру колектора по завершенні випробування на нагрівання?

16 Охарактеризуйте принцип випробування на нагрівання непрямим методом.

17 Що називається короткочасним номінальним режимом роботи електричної машини?

18 Скільки становлять нормальні тривалості короткочасних режимів роботи?

19 Що називається повторно-короткочасним номінальним режимом роботи електричної машини?

20 Яким параметром характеризується повторно-короткочасний номінальний режимом роботи електричної машини?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

З усіх вимірів, здійснюваних при випробуванні електричних машин на нагрівання, найбільш важливим є вимір температури ізольованих від корпусу обмоток, так як їх температура під час роботи визначає довговічність ізоляції.

З усіх існуючих методів вимірювання температури для основних вимірів передбачаються такі чотири методи:

- метод термометра;
- метод опору;
- метод закладених температурних індикаторів;
- метод вбудованих температурних індикаторів.

1 Метод термометра. Під терміном «термометр» розуміються як термометри розширення – ртутні і спиртові, так і будь-які інші вимірювачі температури, якщо вони прикладаються до доступних поверхонь частин складеної машини і, відповідно, дають температуру тільки поверхні тієї частини і саме в тій її точці, де вони прикладені.

Для поліпшення передачі тепла від нагрітої поверхні прикладеному до неї термометру розширювальний резервуар останнього слід обертати двома-трьома шарами тонкої олов'яної або алюмінієвої фольги, прагнучи обійняти її так, щоб вона добре прилягала до поверхні і щоб між її шарами не залишалося повітряних прошарків. Обгорнуту частину слід прикривати грудкою вати або сухою ганчіркою, щільно прив'язуючи або підпираючи розпірками до нагрітої поверхні.

У тих випадках, коли рідина термометра перебуває в змінному або рухомому магнітному полі, необхідно застосовувати спиртові термометри, так як в ртуті можуть індукувати вихрові струми, що нагрівають її і тим самим спотворюють показання термометра у бік їх збільшення.

З існуючих конструкцій термометрів найбільш придатними є *лабораторні термометри* зі шкальною пластиною всередині оболонки, з границею до $100\div 150$ °С, що мають діаметр $7\div 9$ мм, довжину $200\div 250$ мм і коротку нижню частину. Придатні так само *паличні термометри*, виготовлені з масивної скляної трубки діаметром $5,5\div 7,5$ мм з гравірованою на ній шкалою; однак остання зазвичай не досить чітка, що робить їх застосування дещо не зручним. *Технічні термометри*, що мають діаметр шкальної частини $17\div 20$ мм і більш або менш довгу нижню частину меншого діаметра ($7\div 10$ мм), не придатні для вимірювання температури на поверхні, так як вони градууються при зануренні всієї нижньої частини, а тому в цьому випадку дають зменшені показання. Проте вони підходять для вимірювання температури рідин і газів, якщо дотримано умову занурення всієї нижньої частини в це середовище.

Всі ці термометри мають зазвичай поділки через 1 °С, що в більшості випадків є цілком достатнім для вимірювання температури будь-яких частин машини; але для вимірювання температури рідин, а іноді і газів, коли потрібна особлива точність, доводиться застосовувати термометри з поділками через $0,1\div 0,2$ °С, забезпечені повірочними свідоцтвами з поправками.

Якщо рідина або газ знаходяться під тиском, який відрізняється від атмосферного, то термометри для вимірювання їх температури вставляються в запаяні з кінця трубки, ввернуті шляхом штуцерів або вварені у відповідні порожнини або трубопроводи; для поліпшення передачі тепла від стінок трубки до термометра вона заповнюється маслом або металевою тирсою. При вимірюванні температури вхідного або вихідного повітря в отворах корпусу машини, сполучених з навколишнім середовищем, термометри підвішуються на розтяжках; при цьому слід оберегати їх від впливу променевої теплоти, що випускається розташованими близько від них нагрівальними частинами машини, що особливо істотно при випробуванні невеликих машин, де всі відстані невеликі.

Термометри тиску, в яких температура вимірюється не зміною обсягу при вільному розширенні, а підвищенням тиску в замкнутому просторі, причому вимірювальним органом є чутливий манометр, застосовуються головним чином для вимірювання температури рідин, особливо масла в підшипниках; для випробувальних станцій вони мало придатні через складність монтажу і налаштування.

2 Метод опору. Цей метод застосовується для визначення температури обмоток. Він заснований на зміні опору металевого провідника в залежності від його температури. Якщо опір обмотки в практично холодному стані при температурі T_x позначити через r_x , а в нагрітому – через r_2 , то її температура T_2 може бути знайдена шляхом розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} r_x = r_{15} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_x - 15)], \\ r_2 = r_{15} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - 15)]. \end{cases} \quad (8.1)$$

$$\frac{r_2}{r_x} = \frac{1 + \alpha \cdot (T_2 - 15)}{1 + \alpha \cdot (T_x - 15)} = \frac{T_2 + \frac{1}{\alpha} - 15}{T_x + \frac{1}{\alpha} - 15}. \quad (8.2)$$

Тоді для мідних обмоток, при $\alpha = 0,004 = 1/250$ отримаємо

$$\frac{r_2}{r_x} = \frac{T_2 + 235}{T_x + 235}. \quad (8.3)$$

Звідки

$$T_2 = \frac{r_2}{r_x} \cdot (235 + T_x) - 235, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8.4)$$

Після перетворення цього виразу отримаємо

$$T_2 = \frac{r_2 - r_x}{r_x} \cdot (235 + T_x) + T_x, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8.5)$$

Якщо прийняти за опір обмотки в холодному стані його значення приведенне до $15 \text{ } ^\circ\text{C}$, тоді

$$T_2 = 250 \cdot \frac{r_2 - r_{15}}{r_{15}} + 15, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8.6)$$

а перевищення температури ΔT над температурою охолоджуючого середовища T_o буде

$$\Delta T = T_2 - T_o = 250 \cdot \frac{r_2 - r_{15}}{r_{15}} + 15 - T_o, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8.7)$$

Якими б точними приладами не було б виміряно опір обмотки в холодному стані, не рекомендується користуватися ними для визначення температури обмотки за опором, виміряним в нагрітому стані. Навпаки, при застосуванні одних і тих же приладів, хоча б навіть відносно невисокої точності, результат вимірювання виходить досить правильним, оскільки він залежить не від самих величин вимірюваних опорів, але від їх відношення, а похибка вимірювання опору як в холодному, так і в нагрітому стані приблизно одна і та сама. Тому *опори обмоток, температура яких підлягає визначенню, у всіх випадках застосування цього методу повинні бути виміряні в холодному стані тими приладами, якими вони будуть вимірюватися в нагрітому стані в процесі випробування, і до того ж приблизно з тими ж значеннями струмів.*

Це не завжди легко виконати, не наражаючись на ризик нагріти обмотки в процесі вимірювання. Однак, як показує розрахунок, при зазвичай застосовуваних щільностях струму швидкість підвищення температури настільки невелика, що цілком дозволяє провести вимірювання опору без суттєвої помилки.

Дійсно, підвищення температури ΔT обмотки з опором r при нагріванні її струмом i за одну секунду складає

$$\Delta T = \frac{0,24 \cdot i^2 \cdot r}{l \cdot q \cdot c \cdot \gamma}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8.8)$$

де l – довжина провідника обмотки, м;
 q – переріз провідника обмотки, мм²;
 c – питома теплоємність, кал/Г·°С;
 γ – щільність матеріалу провідника, г/см³.

Підставивши замість r його вираз

$$r = \frac{\rho \cdot l}{q}, \text{ Ом}, \quad (8.9)$$

де ρ – питомий опір матеріалу провідника, Ом·мм²/м,

і ввівши щільність струму

$$j = \frac{i}{q}, \text{ А/мм}^2, \quad (8.10)$$

отримаємо

$$\Delta T = \frac{0,24 \cdot i^2 \cdot \rho \cdot l}{l \cdot q^2 \cdot c \cdot \gamma} = \frac{0,24 \cdot j^2 \cdot \rho}{c \cdot \gamma}, \text{ град/с.}$$

Для провідникової міді при $\rho = 0,0175$ Ом·мм²/м,
 $c = 0,093$ кал/Г·°С, $\gamma = 8,9$ г/см³ отримаємо

$$\Delta T = \frac{0,24 \cdot j^2 \cdot 0,0175}{0,093 \cdot 8,9} = \frac{j^2}{197} = \frac{j^2}{200}, \text{ град/с.}$$

Цей вираз є наближеним, тому що не враховує збільшення опору провідника в міру зростання його температури; але оскільки тут може йти мова лише про невеликі підвищення температури, та й ті потрібні лише приблизно оцінити, точність його для цієї мети може вважатися цілком достатньою.

Основною особливістю методу опору є те, що він дає середню величину температури обмотки. Окремі ділянки обмотки можуть мати при цьому температуру, яка більш-менш сильно відрізняється від середньої, але ця обставина не враховується при вимірюванні.

Вимірювання температури за методом опору в процесі нагрівання можливо для всіх обмоток, що живляться постійним струмом – як нерухомих, так і обертальних; для перших достатньо, крім амперметра в колі струму, що їх живить, мати вольтметр, який підключається безпосередньо до затискачів обмотки.

Для обертальних обмоток, що живляться через контактні кільця, підключення вольтметра може здійснюватися шляхом металевих щіток (пластинчастих, сітчастих), укріплених на міцних ізолюючих рукоятках і таких, що притискаються до робочих поверхонь контактних кілець на час вимірювання. Застосування для цих цілей щіток, закладених в нормальні щіткотримачі, ізольовані від струмоведучих частин, не може бути рекомендовано, так як воно не забезпечує стійкого контакту між щітками і кільцями.

Опір обмоток, що живляться змінним струмом (в тому числі і якорів машин постійного струму), може вимірюватися в нагрітому стані нормально тільки після закінчення випробування у відключеній і цілком зупиненій машині. Але за час, що протікає між моментом відключення і моментом першого виміру, необхідний для зупинки машини, підключення вимірювальної схеми і приведення її в дію, температура обмотки може змінитися і результат вимірювання дасть неправильне її значення. Щоб уникнути цього, якщо вимірювання температури можливо не раніше 15÷20 секунд після відключення машини, необхідно екстраполювати криву охолодження обмотки на момент відключення в такий спосіб.

Опір обмотки вимірюється декілька разів через довільні проміжки часу; логарифми перевищень температури ΔT , обчислених для кожного вимірювання, відкладаються в залежності від часу t , який минув з моменту відключення. Через відкладені значення проводиться пряма, яка перетне вісь ординат в точці, що дає шукане перевищення температури обмотки в момент відключення.

Велике спрощення може бути досягнуто таким прийомом, що нерідко застосовується на практиці: опір вимірюється через невеликі проміжки часу протягом періоду, який не менше ніж у два рази перевищує проміжок часу між моментом відключення і моментом першого виміру (рисунок 8.1); залежність опору від часу, що має злегка спадний характер, графічно екстраполюється на момент відключення, і за екстрапольованим значенням обчислюється температура обмотки.

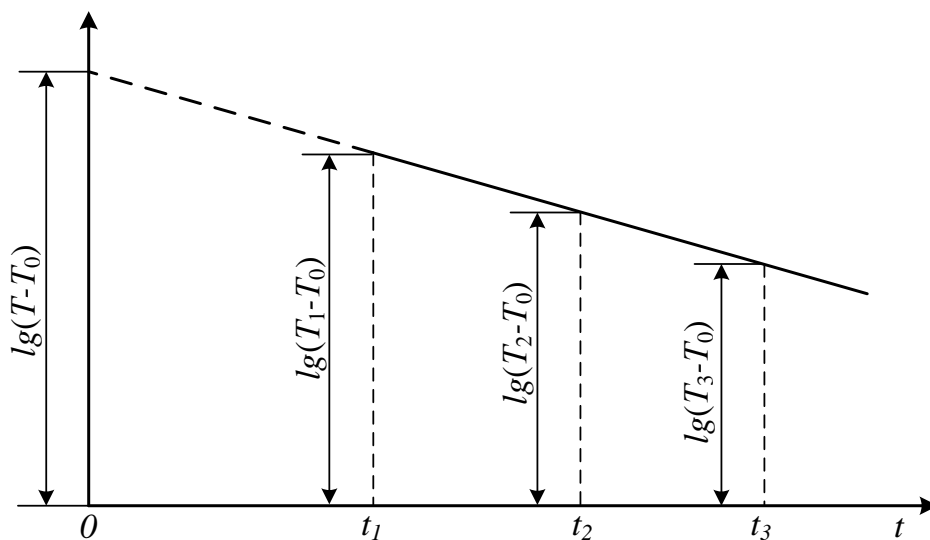


Рисунок 8.1 – Визначення перевищення температури обмотки в момент вимкнення

3 Метод закладених температурних індикаторів. Під *температурними індикаторами* розуміються термопари і термометри опору; вони вважаються закладеними в тому випадку, якщо при виготовленні машини розташовані в таких місцях, які в готовій машині є недоступними.

Згідно з вимогами стандарту, температурні індикатори повинні закладатися в кількості не менше шести рівномірно по колу машини, причому в таких точках обмотки (в осьовому напрямку), де очікуються найбільш високі значення температури.

Головною галуззю застосування закладених температурних індикаторів є вимір температури обмоток статорів машин змінного струму, а також їх осердь. Найвищі значення температури в цьому випадку можна очікувати на тих ділянках, які розташовані в найбільшому віддаленні від місць входу в машину струменів охолоджуючого середовища.

Індикатори розташовуються усередині пазів, причому вважається, що вони вимірюють температуру обмотки тільки в тому випадку, якщо закладені між активними сторонами секції; якщо ж вони укладені на дні паза, то їх показання приймаються за температуру сталі осердя. Таким чином, в машинах, що мають одношарові обмотки, закладені температурні індикатори можуть бути застосовані тільки для вимірювання температури сталі осердя.

Робляться спроби застосування закладених температурних індикаторів і для вимірювання температури обертальних частин машини, головним чином якорів машин постійного струму, як після зупинки, так і на ходу. У першому випадку індикатори виводяться до дошки затискачів, укріпленої на обертальній частині; після зупинки до неї швидко підключаються вимірювальні прилади. Такий спосіб допускає застосування екстраполяції на момент відключення, аналогічної описаній раніше при розгляді методу опору. У другому випадку індикатори виводяться до системи контактних кілець, через які і з'єднуються з вимірювальними приладами. Найбільшу складність в цьому випадку являє забезпечення надійного контакту між кільцями і прилеглими до них щітками; цей контакт повинен відрізнитися не тільки стійким, бажано дуже малим, опором, але і бути цілком вільним від контактних електрорухомих сил.

4 Метод вбудованих температурних індикаторів. Цей метод відрізняється від попереднього тим, що температурні індикатори (переважно термопари) вбудовуються в готову машину тільки на час її випробування, по закінченні якого видаляються. Вони можуть застосовуватися при вимірюванні яких завгодно нерухомих частин машини, як активних, так і неактивних, в першу чергу обмоток в лобових і пазових частинах, а також тіла і зубців осердь, в таких доступних точках, в яких можуть очікуватися найбільш високі зміни температури.

У лобові частини дротяних обмоток статорів машин змінного струму низької напруги індикатори вводяться на деяку глибину шляхом обережного розсунення провідників і надійно прив'язуються поблизу від цього місця.

У лобові частини обмоток з жорсткими секціями, а також в ізольовані котушки полюсів машин постійного струму індикатори

можуть бути вбудовані тільки шляхом приклеювання їх до зовнішньої поверхні або зміцнення бандажами зі стрічки; в цьому випадку вони вимірюють температуру на поверхні, до якої прикладені. У пазові частини обмоток індикатори можуть бути вбудовані шляхом укладання під клин, для чого на внутрішній його поверхні видовбуються відповідні поглиблення або канавки. До неізольованих поверхонь обмоток можна припаювати термопари, але за умови, що або ці обмотки заземлені, або термопари по всій довжині ізольовані на повну напругу кола, в яке ввімкнена обмотка.

У тіло і зубці осердь індикатори вводяться на глибину не менше 5 мм між окремими листами, що роздвигаются за допомогою шила або вістря ножа. Прокладення провідників від індикаторів, що вбудовуються в зубці, може здійснюватися або через радіальні канали, або через пази під клином. Особлива увага повинна бути звернена на вимірювання температури навколишнього середовища, яка для машин з незамкненим циклом вентиляції є одночасно температурою охолоджуючого середовища у всіх випадках, коли подача вентиляційного повітря в машину не здійснюється по спеціальних трубопроводах.

Ця температура повинна вимірюватися принаймні двома перевіреними термометрами, розставленими навколо випробовуваної машини на відстані від 1 до 2 м на рівні половини її висоти (тобто на рівні осі вала).

Термометри ці повинні бути захищені від впливу променевої енергії, що випускається як самою машиною, так і будь-якими оточуючими джерелами тепла, і від випадкових потоків повітря. Достатнім захистом є занурення їх нижніх частин в банки з жерсті, наповнені машинним або трансформаторним маслом і прикритими зверху жерстяними ж кришками; термометри вставляються в отвори цих кришок шляхом гумових або кордових пробок так, щоб резервуари для ртуті не торкалися дна банок. За температуру навколишнього повітря під час випробування приймається середнє арифметичне з показань усіх таких термометрів, взятих через довільні рівні проміжки часу протягом останньої години випробувань.

Температурні індикатори і позначки температури. З усіх температурних індикаторів при випробуванні електричних машин застосовуються головним чином термопари і термометри опору.

Термопари – володіють тією перевагою, що можуть бути вбудовані в найбільш важкодоступні місця, тому вони набувають найширшого застосування при випробуваннях електричних машин всіх розмірів. Нормалізованими термопарами для вимірювання значень температури є термометри хромель-алюмель і хромель-копель з електрорушійною силою: перша близько 0,04 мВ/град, друга – близько 0,07 мВ/град. Також поширення на практиці набула термопара мідь-константан; її електрорушійна сила складає близько 0,04 мВ/град. Діаметр провідників обирається не нижче 0,3÷0,35 мм з міркувань механічної міцності. Провідники злегка перевиваються та покриваються загальною ізолюючою обмоткою. Спай термопари здійснюється зачисткою ізоляції обох жил на довжині 3÷5 мм, скручуванням і просочуванням олов'яним припоєм без кислоти. Термопари вимірюють не температуру того місця, в яке закладено її спай, а перевищення цієї температури над температурою протилежного її кінця; останню необхідно вимірювати за допомогою термометра.

Особливий успіх має застосування голчастих термопар для вимірювання температури неізольованих металевих поверхонь, наприклад колекторів і контактних кілець. Така термопара має вигляд двох тонких голчастих щупів, які вколюються в поверхню металу. Ці термопари відрізняються дуже малою тепловою інерцією, тому що спай здійснюється самим нагрітим металом.

Термометри опору. Перевагами їх є більш висока точність вимірювань при менш суворих вимогах, що ставляться до вимірювального приладу, і незалежність показань від температури перемикача; термометри опорів вимірюють безпосередню температуру нагрітого місця, а не її перевищення над температурою приладу.

Термометри опору, що застосовуються в електричних машинах, діляться на пластинчасті і циліндричні.

Пластинчастий термометр опору – являє вузьку смужку твердого ізоляційного матеріалу, на яку намотано тонкий мідний ізольований дріт: все разом покривається оболонкою. Такі

термометри опору застосовуються майже виключно для укладання в пази – між шарами обмотки і на дно, а також для вимірювання температури твердих тіл.

У *циліндричному термометрі опору* мідний дріт намотується на металевий стрижень в герметично запаяному металевому футлярі; такі термометри придатні для вимірювання температури газів і рідин в трубопроводах, для чого вкручуються в останні за допомогою штуцерів.

Відмітники температури – до них належать теплочутливі барвники і легкоплавкі метали.

Під *теплочутливими барвниками* маються на увазі речовини, здатні помітним чином змінити свій колір при досягненні більш-менш певної температури. Ці барвники можуть бути двох видів: *оборотні*, які не змінюють хімічного складу і відновлюють свій первісний колір при охолодженні; і *незворотні*, у яких відновлення зміненого кольору при охолодженні не відбувається, так як при досягненні певної температури вони змінюють свій склад.

Теплочутливі барвники застосовуються у вигляді фарб або олівців. Барвники наносяться на поверхню, температура якої підлягає визначенню, або безпосередньо за допомогою кисті, або спочатку на площині паперу, який приклеюється до цієї поверхні клеєм, нейтральним по відношенню до барвника і здатним схопитися з цією поверхнею.

Недоліком барвників є те, що зміна їх кольору залежить не тільки від самої температури, але і від тривалості її дії.

Легкоплавкі сплави відзначають досягнуту температуру зі значно більшою надійністю. Вони застосовуються або у вигляді невеликих табличок правильної форми, які закладаються в місця, де планується визначити температуру, або у вигляді заклепок, що щільно забиваються в спеціально висвердлені невеликі отвори. Якщо сплави застосовуються на оберտальній частині, повинні бути вжиті заходи, щоб вони не могли бути вирвані відцентровими силами ще до розплавлення.

Межі допустимих перевищень температур. Випробування машин на нагрівання може відбуватися при різній температурі охолоджуючого середовища.

Вважається, що перевищення температури не залежить від температури охолоджуючого середовища, якщо остання не перевищує +35 °С, і тому в отриманні результати випробування не вимагається введення ніяких поправок, які залежали б від цієї температури. Залежно від величини граничної температури, що характеризує нагрівостійкість ізолюючих матеріалів, останні поділяються на класи.

Нагрівостійкість ізолюючих матеріалів тим вище, чим менше речовин органічного походження входить до їх складу. Сучасна ізоляційна техніка розрізняє **сім класів електроізоляційних матеріалів**. Розглянемо з них п'ять найпоширеніших.

Клас А з граничною нагрівостійкістю 105 °С: просочені або занурені в електроізоляційний матеріал волокнисті матеріали з целюлози або шовку. Сюди відносяться папір, картон, тканини з бавовняного паперу, штучного та натурального шовку, і більшість органічних емалей.

Клас Е з граничною нагрівостійкістю 120 °С: деякі синтетичні органічні плівки, теплостійкі емалі, пластмаси з органічним наповнювачем, термореактивні синтетичні смоли і компаунди.

Клас В з граничною нагрівостійкістю 130 °С: матеріали на основі слюди, азбесту та скловолокна, що застосовуються з органічними сполучними та просочувальними складами. Сюди відноситься міканіт з його модифікаціями, склалакотканини, азбестові папери та тканини.

Клас F з граничною нагрівостійкістю 155 °С: матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, що застосовуються в поєднанні з синтетичними сполучними і просочувальними складами.

Клас Н з граничною нагрівостійкістю 180 °С: матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, що застосовуються в поєднанні з кремнійорганічними просочувальними складами.

Встановлення граничних допустимих перевищень температури повинно також здійснюватися з урахуванням методів їх визначення, оскільки при розгляді різних методів вимірювання температури було з'ясовано, що метод опору дає середню температуру обмотки, окремі ділянки якої можуть бути нагріті вище цього середнього значення; метод закладених температурних індикаторів повинен давати значення, ближчі до

найбільших значень, а метод термометра – навпаки, до найменших значень.

Тому граничні виміряні перевищення температури можуть бути допущені при методі закладених температурних індикаторів більш високими, а при методі термометра – більш низькими, ніж при методі опору.

Граничні допустимі значення температури частин електричних машин також залежать від режиму роботи машини, місця установлення (якщо вище 1000 м над рівнем моря, то граничні значення температури знижуються на 1 °С на кожні 200 м понад 1000 м), граничної температури охолоджуючого середовища.

Питання для самоконтролю

1 Вкажіть методи, що застосовуються для основних вимірювань температури ізолюваних від корпусу обмоток.

2 Охарактеризуйте метод термометра.

3 Які термометри існуючих конструкцій є найбільш придатними до застосування?

4 Охарактеризуйте метод опору.

5 Що є основною особливістю методу опору?

6 Охарактеризуйте метод закладених температурних індикаторів.

7 Що є головною галуззю застосування закладених температурних індикаторів?

8 Охарактеризуйте метод вбудованих температурних індикаторів.

9 Якою перевагою володіють термопари?

10 У чому полягають переваги застосування термометрів опору?

11 Що являють собою пластинчастий і циліндричний термометри опору?

12 Яким чином в ролі відмітників температури використовуються теплочутливі барвники?

13 Що є основним недоліком теплочутливих барвників?

14 Яким чином в ролі відмітників температури використовуються легкоплавкі сплави?

- 15 Назвіть відомі Вам класи електроізоляційних матеріалів.
- 16 Охарактеризуйте клас А електроізоляційних матеріалів.
- 17 Охарактеризуйте клас Е електроізоляційних матеріалів.
- 18 Охарактеризуйте клас В електроізоляційних матеріалів.
- 19 Охарактеризуйте клас F електроізоляційних матеріалів.
- 20 Охарактеризуйте клас Н електроізоляційних матеріалів.
- 21 Від чого залежать граничні допустимі значення температури частин електричних машин?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Антонов, М. В. Технология производства электрических машин [Текст] / М. В. Антонов, Л. С. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.
- 2 Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин [Текст] / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
- 3 Кобозев, В. Н. Технологические основы конструирования и производства электрического подвижного состава железнодорожного транспорта [Текст]: учеб. пособие для вузов по специальности «Электрическая тяга и автоматизация тяговых устройств» / В. Н. Кобозев. – М.: Высшая школа, 1978. – 309 с.
- 4 Копылов, И. П. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин [и др.]. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.
- 5 Юхимчук, В. Д. Технологія виробництва електричних машин [Текст]: підручник / В. Д. Юхимчук. — Харків: Тім Пабліш Груп, 2012. — 750 с.
- 6 Магистральные электровозы. Технологические основы производства [Текст] / под общей ред. В. И. Бочарова и А. А. Сурувикова. – М.: Машиностроение, 1992. – 256 с.
- 7 ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 37 с.