

В.М.Лагутін, В.Ц.Зелинський
О.Б.Бурикін

Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах

Навчальний посібник



ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

В.М.Лагутін, В.Ц.Зелінський, О.Б.Бурикін

**ВИПРОБУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І
ТРАНСФОРМАТОРІВ
В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМАХ**



Навчальний посібник

*(для підготовки інженерів-електриків за спеціальністю
„Електричні станції" і "Електричні системи та мережі".)*

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.311
ББК 31.261.я73
Л49

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №11 від 01.07.09 р.)

Рецензенти:

В. В. Назаров, доктор технічних наук, професор

Б. С. Рогальський, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Лагутін, В. М.

Л49 Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах : навчальний посібник / В. М. Лагутін, В. Ц. Зелінський, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 115 с.

У посібнику розглядаються питання випробувань електричних машин і трансформаторів до 750 кВ. Наведено обсяг і норми випробувань. Описані методика й технологія окремих видів випробувань обладнання під час пусконаладжувальних робіт. Розглянуті принципи побудови й особливості схем електричних випробувань обладнання високої напруги. Дано короткий опис конструкцій ряду приладів і пристроїв. Наведені відомості про основні апарати і прилади, що використовуються під час налагодження та експлуатації електричних машин і трансформаторів. Посібник призначений для студентів електротехнічних спеціальностей "Електричні станції" і "Електричні системи та мережі".

УДК 621.311
ББК 31.261.я73

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Загальні положення.....	6
1.1 Види та характеристики випробувань	6
1.2 Метрологічне забезпечення випробувань	8
1.3 Автоматизація випробувань.....	9
Контрольні запитання.....	12
2 Випробування з визначення електричних величин.....	13
2.1 Вимірювання струму, активного опору обмоток та електричної потужності.....	13
2.2 Вимірювання опору ізоляції та випробування її на електричну міцність.....	17
2.3 Методи визначення коефіцієнта корисної дії	22
2.4 Визначення ступеня іскріння колекторних машин	28
Контрольні запитання.....	30
3 Випробування з визначення неелектричних величин	31
3.1 Вимірювання температури.....	31
3.1.1 Особливості вимірювання температури обертових частин електричних машин.....	35
3.1.2 Вимірювання температури в трансформаторах.....	36
3.2 Вимірювання ковзання машин змінного струму	37
3.3 Вимірювання рівня шуму та вібрації під час випробувань електричних машин і трансформаторів	39
3.3.1 Вимірювання вібрації	42
3.3.2 Методи вимірювання рівня шуму та вібрації електричних машин.....	43
3.3.3 Особливості вимірювання рівня шуму трансформаторів.....	46
Контрольні запитання.....	48
4 Випробування трансформаторного масла	49
4.1 Види випробувань трансформаторного масла.....	49
4.2 Визначення пробивної напруги масла при частоті 50 Гц	51
4.3 Визначення тангенса кута діелектричних втрат	55
4.4 Фізико-хімічне оцінювання стану трансформаторного масла ...	60
Контрольні запитання.....	62
5 Види навантаження при випробуваннях електричних машин та трансформаторів.....	63
5.1 Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів без видачі енергії в мережу.....	63
5.2 Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів з видачею енергії в мережу	64
5.3 Метод взаємного навантаження електричних машин і трансформаторів.....	67

5.4 Метод непрямого навантаження електричних машин	74
Контрольні запитання	77
6 Особливості випробувань трансформаторів і окремих видів електричних машин	78
6.1 Випробування трансформаторів на стійкість під час раптового короткого замикання	78
6.2 Визначення зони безіскрової роботи машин постійного струму	82
6.3 Визначення індуктивних опорів та постійних часу обмоток синхронних машин	84
6.4 Випробування на короточасне перевантаження й методи визначення максимального обертового моменту асинхронних двигунів	93
6.5 Загальна характеристика випробувань на надійність	95
Контрольні запитання	101
Література	102
Додаток А	104
Програма випробувань електричних машин і трансформаторів ...	104
Додаток Б	108
Випробувальні напруги для електричних машин і трансформаторів	108
Додаток В	110
Допустимі значення рівнів шуму та вібрації для електричних машин і трансформаторів	110
Додаток Г	112
Словник найбільш використовуваних термінів	112

ВСТУП

В усіх галузях народного господарства України використовують електродвигуни, синхронні генератори, зварювальні генератори і перетворювачі, пускові і захисні апарати, а також інші типи електрообладнання. Нове та діюче електрообладнання в електроустановках енергосистем та промислових підприємств перевіряється та випробовується відповідно до діючих державних та галузевих стандартів.

Державні стандарти випускаються центральними органами стандартизації і обов'язкові для використання усіма відомствами. Система стандартів охоплює основні види електричних машин та трансформаторів, які виготовляються підприємствами електротехнічної промисловості.

Відповідність сучасним стандартам і нормам, включаючи основні характеристики, електричні показники, рівні шуму і вібрацій (*vibration*), а також показники надійності (*reliability*) є задачею підвищення конкурентної спроможності продукції електротехнічної промисловості пов'язані з її якістю, яка перевіряється під час випробувань (*test, testing*).

Якісний ремонт та використання сучасних методів експлуатації (*operation*), які базуються на діагностиці (*maintenance diagnosis*) технічного стану електричних машин (*electric machine*) і трансформаторів (*transformer*), дозволяють забезпечити безперебійну роботу виробничих механізмів, зменшити витрати на їхню експлуатацію та збільшити термін служби.

Як видно з досвіду експлуатації, робота електричних машин і трансформаторів залежить від знання експлуатуючим персоналом їх конструкцій, правильного регулювання окремих частин, а також проведення необхідних профілактичних випробувань. Під час випробувань не завжди виконується повний об'єм необхідних досліджень та перевірок, що у подальшому призводить до аварій з електричними машинами.

Для персоналу, який зайнятий випробуваннями електричних машин та трансформаторів, потрібно вважати обов'язковим детальне знайомство з вимогами діючих на даний момент стандартів, які мають загальний характер, а потім стандартів на машини і трансформатори тих видів, які підлягають випробуванням цим персоналом.

У посібнику наведено об'єми, норми, методи досліджень та перевірок електричних машин і трансформаторів відповідно до вимог вищевказаних правил і стандартів.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Випробування є підсумковою частиною виробництва електричних машин, які проводяться з метою перевірити придатність їх до роботи.

Для проведення випробувань необхідно, щоб машина, яка випробовується, була відомою (тип машини або трансформатора та їх паспортні дані), апаратура та обладнання, за допомогою яких проводяться випробування, відповідали потрібній точності та межам вимірювань, була розроблена програма та визначена мета випробувань.

Отже, промислові випробування проводяться з метою підтвердження встановлених стандартами, нормами та технічними умовами характеристик електричних машин, непрямого контролю за правильним веденням технологічного процесу виготовлення електричної машини та експериментального визначення її кількісних показників надійності.

Крім випробувань готових електричних машин та трансформаторів здійснюється також оперативний контроль з метою перевірки якості виготовлення окремих вузлів машини у процесі її виготовлення, а також профілактичні випробування в умовах експлуатації з метою раннього виявлення погіршення якості машини та запобігання можливому її виходу з ладу (відмови).

У процесі проектування, розроблення та виготовлення нових електричних машин, а також під час удосконалення існуючих вирішують такі задачі [16, 17, 18]:

- усвідомлення фізичних процесів (електромагнітних, теплових, механічних тощо), які проходять в електричній машині;
- складання математичних та фізичних моделей процесів – створення розрахункової методики;
- розроблення конструкції, технологічного процесу виготовлення машини.

Рішення вказаних задач отримують у процесі дослідних випробувань, метою яких є:

- уточнення усвідомлень про фізичні процеси, які проходять в електричних машинах та корегування розрахункових методик;
- перевірка адекватності математичних та фізичних моделей і галузей їх використання;
- створення на базі математичних моделей автоматизованих систем управління виробництвом електричних машин.

1.1 Види та характеристики випробувань

Згідно з [1, 11] електричні машини підлягають приймальним, приймально-здавальним, періодичним та типовим випробуванням, а трансформатори – приймально-здавальним, типовим та періодичним. Електродвигуни (*electric motor*) малої потужності підлягають приймально-

здавальним, кваліфікаційним, періодичним та типовим випробуванням.

Приймальні випробування (*acceptance test; approval test*) повинні проводитись на дослідному зразку електричної машини, тому об'єм цих випробувань досить великий. Так для машин постійного струму (*direct current*) програма приймальних випробувань має 17 пунктів, для синхронних машин (*synchronous machine*) – 22 пункти, для асинхронних двигунів 16 пунктів.

У програму випробувань входять: випробування на нагрів, вимірювання шумів та вібрацій, перевірка якості ізоляції, визначення перевантажувальної здатності, визначення окремих характеристик та параметрів машин (додаток А).

Для трансформаторів аналогом приймальних випробувань є типові випробування, яким підлягають головні партії трансформаторів до початку їх серійного виготовлення. Для електродвигунів малої потужності – кваліфікаційні випробування (за програмою приймально-здавальних та періодичних випробувань), які проводяться після виготовлення встановлювальної серії двигунів. Відповідні програми випробувань трансформаторів та електродвигунів малої потужності наведені в додатку А.

Приймально-здавальним випробуванням підлягає кожна електрична машина та трансформатор, тому об'єм таких випробувань повинен бути обмеженим, але водночас повинен забезпечувати гарантії відповідності електричної машини її паспортним даним.

Програма приймально-здавальних випробувань асинхронних двигунів загального використання має 7 пунктів, синхронних машин – 9 пунктів та машин постійного струму – 7 пунктів (додаток А).

Періодичні випробування (*periodic test; sampling test*) проводяться з метою перевірки відповідності якості машин та трансформаторів у процесі виробництва їх приймальним випробуванням.

Типові випробування (*standard test; type test*) проводяться під час зміни конструкції, матеріалів або технології виготовлення, якщо ці зміни можуть вплинути на характеристики машин або трансформаторів і, як правило, включають у себе перевірку відповідних параметрів за програмою приймальних випробувань. Такі випробування мають на меті встановлення відповідності фактичних даних, що характеризують конструкцію машин, тим даним, які закладені під час проектування або отримані в результаті дослідно-конструкторських експериментів. Типові випробування (сумісно з приймальними) дають можливість оцінити машину щодо правильності вибору матеріалів та отримати детальну інформацію про роботу машини.

Випробування на надійність передбачають отримання кількісних показників надійності електричних машин – ймовірність безвідмовної роботи, напрацювання на відмову, законів розподілу відмов тощо. Як правило, такі випробування надто тривалі та призводять до відмови

більшості випробовуваних машин. Тому їм підлягає лише мала частина випущених машин.

Крім вказаних промислових випробувань можуть проводитись дослідні випробування з метою отримання необхідних експериментальних даних для розроблення нових або удосконалення існуючих машин. Останні роки широкого розвитку набули випробування на математичних моделях з використанням ЕОМ, тобто без виготовлення електричної машини.

У процесі виробництва електричної машини передбачаються випробування її окремих відповідальних вузлів: перевірка електричної міцності та опору ізоляції обмоток (*dielectric resistance; insulation resistance*), форми та якості поверхні колектора, перевірка відсутності міжламельних замикань, чистоти каналів охолодження при безпосередньому охолодженні обмотки, а також перевірка правильності схеми охолодження, випробування окремих механічних частин машини на міцність (випробування механічної міцності роторів (*rotor*) турбогенераторів і бандажів).

1.2 Метрологічне забезпечення випробувань

Дослідження нових типів електричних машин та трансформаторів, пошук нових більш досконалих та економних способів їх створення, вивчення властивостей речовин і матеріалів, які використовуються в електромашинобудуванні, оцінювання якості виробів, які випускаються, неможливі без оцінювання кількісних співвідношень досліджуваних явищ. Зараз використовуються різні прилади та методи вимірювання фізичних величин. При цьому повинна забезпечуватись цілісність вимірювань, тобто вірогідність та порівнянність результатів вимірювань однієї й тієї ж фізичної величини із заданою точністю незалежно від того, коли, яким методом і якими засобами проводяться вимірювання. Це положення дозволяє організувати виробництво складних виробів з деталей, які виготовлені на багатьох підприємствах, порівняти та об'єктивно оцінити результати наукових досліджень різних інститутів і заводів.

Точність результатів вимірювань у державі та їх порівнянність досягається державною системою метрологічного забезпечення. Основою цієї системи є еталонна база держави.

Еталони поділяються на первинні (*primary standard*) (забезпечують найвищу точність відтворення даної величини), вторинні (*secondary standard*) і робочі (*working standard*) (використовуються для збереження та передавання розміру одиниці зразковим засобам вимірювань). Засоби вимірювання поділяються на зразкові та робочі, останні з яких передбачені для проведення безпосередніх вимірювань в усіх галузях виробництва та споживання. Основні державні первинні еталони: метр, кілограм та секунда – похибка вимірювання яких складає $5 \cdot 10^{-9}$, $7 \cdot 10^{-9}$ та 10^{-13} , відповідно. Основою системи вимірювання електричних величин є еталон

сили струму – ампер (А) та похідні від нього одиниці – ом (Ом), генрі (Гн), вольт (В), фарад (Ф). Похибка відтворювання ампера складає 10^{-5} , фарада – $(5\div 7)\cdot 10^{-7}$, генрі – $5\cdot 10^{-7}$, ома – 10^{-7} і вольт – 10^{-8} .

Під час випробувань зазвичай нормують класи точності вимірювальних приладів, але не вказують виду їх похибки. Оцінювання похибки результатів вимірювань може проводитись у детермінованому та імовірному варіантах.

Інструментальна (прикладна) похибка має основну й додаткову складові. Основна складова визначається класом точності й відповідає нормальним умовам експлуатації (заданий виробником діапазон робочих температур, вологості тощо). Додаткова складова визначається відхиленням умов експлуатації від нормальних та нормується підприємством-виробником. Потрібно зауважити, що за відхилення умов експлуатації вимірювального приладу від нормальних, його додаткова похибка може перевищувати основну.

1.3 Автоматизація випробувань

Автоматизація випробувань електричних машин здійснюється з метою зменшення трудомісткості та вартості випробувань, підвищення точності й вірогідності їх результатів, покращення умов праці, забезпечення можливості дистанційного проведення випробувань, швидкої зміни їх програми та зменшення часу отримання результатів. Випробувальні стенди та лінії, як правило, вбудовуються в технологічні дільниці виробництва окремих вузлів та в дільниці складання й узгоджуються з ними за продуктивністю.

З технологічної точки зору процес автоматизації випробування готових електричних машин включає в себе:

- автоматичне керування, встановлення, увімкнення та вимкнення електричних машин;
- автоматичне встановлення режимів випробувань відповідно до заданої програми;
- автоматичний збір, передавання й збереження, отриманих в процесі випробувань величин;
- автоматичне оброблення вимірних величин;
- подання результатів випробувань (протоколу) в потрібному вигляді.

Процес автоматизації випробувань реалізується тільки за допомогою цифрової техніки. Під час випробувань вимірюється велика кількість електричних та неелектричних величин за допомогою закладених або вбудованих в машину на час випробувань давачів (*measuring element, sensor*). Давачі можуть складатися з одного елементу (наприклад, термопари) або багатьох складних блоків багатофункціонального перетворення. Більшість сучасних давачів належить до останнього типу й бувають цифровими або дискретними. Вони складаються з первинного перетворювача (перетворюють безперервний вхідний сигнал, який відповідає фізичній величині, що вимірюється, в безперервний вихідний

сигнал, як правило, електричний), нормувального перетворювача (для подальшого його оброблення), компенсатора (лінеаризує характеристики первинного перетворювача, компенсуючи вплив температури навколишнього середовища тощо) та аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Швидкодія АЦП складає в наш час до 10^6 точок в секунду, що дозволяє записувати з високою точністю (порядку 0,1%) практично всі перехідні процеси в режимі реального часу. Одночасно з записом показів давачів у пам'яті ЕОМ їх, звичайно, виводять і на прилади для здійснення візуального контролю за перебігом випробувань.

Зараз розроблена велика кількість програмно-інформаційних засобів на базі мікропроцесорних стандартів РХІ і VХІ. Для проведення дослідницьких та промислових випробувань використовуються практично однакові програмно-інформаційні засоби і форма подання їх результатів. Крім того, використання Інтернету дозволяє здійснювати дистанційні випробування за заданою програмою без наявності на місці випробувань персоналу для обслуговування.

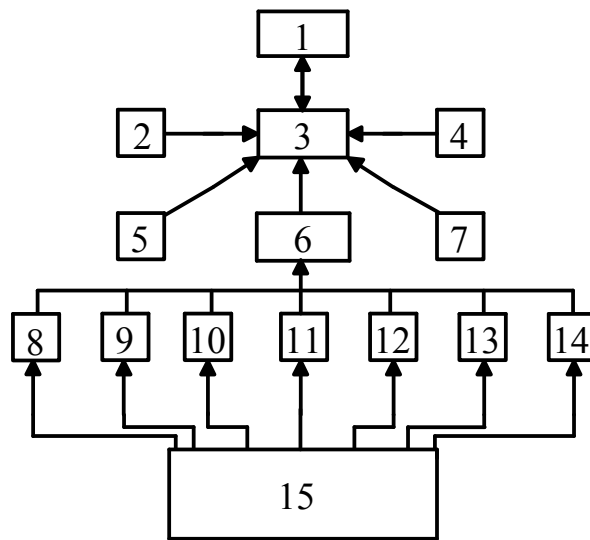
Складність програми обробки залежить від поставленої задачі. Поряд з простими обчисленнями, наприклад, ККД та коефіцієнта потужності, розроблена велика кількість складних та трудомістких програм з визначення параметрів синхронної машини з досліду короткого замикання, параметрів та робочих характеристик асинхронного двигуна за результатами дослідів холостого ходу та короткого замикання.

За ідеального варіанта автоматизованих випробувань замовник одразу після закінчення випробувань отримує готовий протокол випробувань, який вміщує поряд зі стандартною текстовою частиною цифрову й графічну, яка відображає результати випробувань.

Автоматизовані промислові випробування можуть бути суттєво спрощені, оскільки під час їх проведення часто немає необхідності отримувати точне значення вимірюваних величин. Достатньо лише отримати відповідь на запитання, задовольняють чи ні вимірювані величини відповідні вимоги. Так, під час вимірювання опору ізоляції важливо, щоб він був не менший мінімально нормованого. Інші контрольовані величини мають обмеження зверху (втрати, струм холостого ходу й короткого замикання, опір обмоток (*coil resistance*; *winding resistance*) на постійному струмі тощо). Тому під час проведення, наприклад, приймально-здавальних випробувань електричних машин необхідно лише відокремити придатні машини від бракованих та виявити причину несправності (за яким параметром машина не задовольняє вимог). У протоколі випробувань, у такому випадку, може бути лише дата випробувань, заводський номер машини та відмітка про її приймання відділом технічного контролю (ВТК).

Промислові випробування можна проводити на установках двох типів. Установки першого типу дозволяють проводити всі необхідні випробування на одному робочому місці. Установки другого типу мають робоче місце (позицію) на кожне випробування, але на кожній позиції проводиться лише одне конкретне випробування. На рисунку 1.1, як приклад, наведена блок-

схема промислової автоматизованої станції першого типу для випробування асинхронних двигунів потужністю $(0,5 \div 5,5)$ кВт (без системи керування режимами двигуна, що випробовується).



- 1) диспетчерський пункт;
- 2) дисплей;
- 3) ЕОМ;
- 4) принтер;
- 5) пристрій введення інформації;
- 6) пристрій з'єднання з об'єктом;
- 7) графопобудовник;
- 8) давач змінної напруги (*ac voltage; alternating voltage*);
- 9) давач постійної напруги (*dc voltage; direct voltage*);
- 10) давач напруги змінного струму (*alternating current*);
- 11) давач активної потужності;
- 12) давач реактивної потужності;
- 13) давач частоти (*frequency; rate*);
- 14) давач швидкості;
- 15) випробуваний двигун.

Рисунок 1.1 – Блок-схема автоматизованої станції для типових, приймальних і періодичних випробувань асинхронних двигунів потужністю $(0,5 \div 5,5)$ кВт

Використання установок того чи іншого типу обумовлено їх продуктивністю, яка повинна відповідати продуктивності ділянки складання електричних машин. Оскільки продуктивність установок другого типу залежить від тривалості найбільш тривалого випробування, повинні вживатись заходи з узгодження тривалості окремих випробувань.

Під час приймально-здавальних випробувань асинхронних двигунів найбільш тривалою є перевірка ізоляції на електричну міцність, оскільки підвищена напруга повинна прикладатись протягом 1 хв. Тому стандарт для масового виробництва передбачає прискорення випробувань завдяки

зменшенню часу прикладання випробувальної напруги з 1 хв. до 1 с. за одночасного збільшення випробувальної напруги на 20% понад встановлене значення. Крім того, вимірювання опору ізоляції та опору обмоток, визначення струму й втрат короткого замикання допускається виконувати вибірково. Це дозволяє суттєво скоротити час проведення випробувань і кількість персоналу обслуговування. Скорочення часу випробувань можна досягти й завдяки поєднанню деяких випробувань, наприклад, випробування ізоляції на електричну міцність та випробування міжвиткової ізоляції (*minor insulation*).

Контрольні запитання

1. Види випробувань електричних машин та їх призначення.
2. Промислові випробування електричних машин.
3. Промислові випробування трансформаторів.
4. Порівнянність вимірювань та їх забезпечення.
5. Складові інструментальної похибки.
6. Нормування класу точності засобів вимірювання.
7. Основна мета автоматизації вимірювань.
8. Дайте характеристику двох типів автоматизованих установок для промислових випробувань.
9. Основні задачі, які вирішуються у процесі проектування, розроблення та виготовлення нових електричних машин, а також під час удосконалення існуючих.
10. Приймальні випробування електричних машин.
11. Періодичні випробування періодичних машин.
12. Типові випробування трансформаторів.
13. Періодичні випробування трансформаторів.
14. Програма приймально-здавальних випробувань асинхронних двигунів загального використання.
15. Програма приймально-здавальних випробувань синхронних двигунів.
16. Програма приймально-здавальних випробувань машин постійного струму.

2 ВИПРОБУВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

2.1 Вимірювання струму, активного опору обмоток та електричної потужності

Вимірювання струму здійснюється безпосереднім або непрямим методом. У першому випадку амперметр вмикається безпосередньо в розрив електричного кола. У деяких випадках струми, які протікають по обмотках електричних машин і трансформаторів, контролювати безпосередньо вимірювальними приладами неможливо через їхні великі значення (сотні та тисячі ампер). У цих випадках використовують непрямий метод вимірювання струму, при якому між обладнанням та вимірювальними приладами вмикається проміжний давач струму, який перетворює струми в електричний сигнал, доступний для безпосереднього контролю вимірювальними приладами.

Як давачі струму можуть використовуватись вимірювальні шунти (*instrument shunt*), давачі Хола й трансформатори струму. Стационарні трансформатори струму мають 5 класів точності: 0,2; 0,5; 1; 3; 10; лабораторні – 4 класи: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2. Їх кутова похибка складає від 10 до 120 кутових мінут.

Шкала первинних струмів вітчизняних трансформаторів включає: 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000, 25000, 28000, 30000, 32000, 35000, 40000 А.

Шкала вторинних струмів – 1 або 5 А.

Вимірювання опору обмоток електричних машин і трансформаторів постійному струму рекомендується проводити:

- методом вольтметра та амперметра (*voltmeter-ammeter method*);
- методом одинарного (Уїнстона) (*Wheatstone bridge; resistance bridge; electric balance*) або подвійного (Томсона) містка (*double bridge; Thomson bridge*);
- методом омметра логометричної системи (*method of resistance meter*).

Для вимірювання опорів обмоток трансформаторів використовують перші два методи.

Під час проведення вимірювань обмотки повинні знаходитись в практично холодному стані, коли їх окремі частини мають близькі температури, які відрізняються від температури навколишнього середовища не більше ніж на 3°C. У нерухомих обмотках вимірювання проводять безпосередньо на їхніх виводах, а в обмотках, які обертаються – на колекторі або контактних кільцях, без опору ковзного контакту.

Схеми вимірювання опору методом вольтметра та амперметра наведені на рисунку 2.1.

Кожний опір обмоток повинен бути виміряний не менше трьох разів

за різних значень струму. Результати вимірювань не повинні відрізнятись від середнього значення більше, ніж на 0,5%.

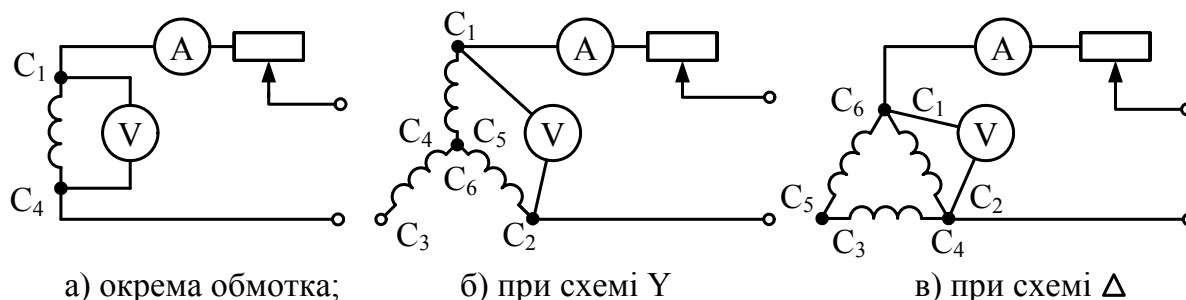


Рисунок 2.1 – Схеми вимірювання опору обмоток методом вольтметра та амперметра

Якщо опір вольтметра відрізняється від вимірюваного опору менше, ніж в 100 разів, то для виключення методичної похибки значення опору розраховується за формулою:

$$r_b = \frac{U}{\left(I - \frac{U}{r_{bx}} \right)}, \quad (2.1)$$

де U – виміряний спад напруги, В;

I – виміряний струм, А;

r_{bx} – вхідний опір вольтметра, Ом.

Вимірювання опору багатозначних обмоток за наявності виводів початку й кінця фаз виконується пофазно, а за наявності окремих виводів від частин фаз – окремо для кожної частини.

Якщо виводи початку та кінця фаз відсутні, то опір потрібно вимірювати між кожною парою лінійних виводів. При з'єднанні фаз у "зірку" (рисунок 2.1, б), опір фази r_1 між виводом C_1 і середньою точкою визначається за формулою:

$$r_1 = \frac{r_{31} + r_{12} + r_{23}}{2}, \quad (2.2)$$

де r_{31}, r_{12}, r_{23} – опори, які виміряні відповідно між виводами C_3 і C_1 , C_1 і C_2 , C_2 і C_3 , Ом.

За з'єднання фаз у "трикутник" (рисунок 2.1, в) опір фази r_1 між виводами C_1 й C_2 визначається за формулою:

$$r_1 = \frac{2r_{12} \cdot r_{23}}{r_{12} + r_{23} - r_{31}} - \frac{r_{12} + r_{23} - r_{31}}{2}. \quad (2.3)$$

За аналогічними формулами з круговою перестановкою відповідних індексів розраховуються опори інших фаз.

Якщо розходження вимірних значень опорів r_{12} , r_{23} та r_{31} не перевищує 2% для з'єднання фаз у “зірку” або 1,5% для з'єднання фаз у “трикутник”, то опір фази рекомендується визначити за спрощеними формулами [16]:

- для з'єднання фаз у “зірку”:

$$r_1 = \frac{r_B}{2}; \quad (2.4)$$

- для з'єднання фаз у “трикутник”:

$$r_1 = \frac{3r_B}{2}, \quad (2.5)$$

де r_B – середнє арифметичне значення трьох опорів, які виміряні між лінійними виводами, Ом.

Як джерело живлення вимірювальної схеми використовують батареї акумуляторів чи гальванічних елементів, окремий генератор (*generator*) постійного струму, мережу постійного струму незмінної напруги або статичний випрямляч, який живиться від мережі змінного струму.

Величина постійного струму вибирається так, щоб адіабатне підвищення температури обмотки, яка перевіряється, за час випробувань не перевищувала 1°C. Швидкість адіабатного підвищення напруги:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\gamma^2}{k}, \quad (2.6)$$

де γ – густина струму в обмотці під час вимірювання опору, А/мм²;
 $k = 200$ (86) для обмоток з міді (алюмінію).

Якщо переріз проводу обмотки невідомий, то значення вимірюваного струму не повинно перевищувати (15÷20)% від номінального, а час вимірювань – 1 хв.

Оскільки обмотки електричних машин мають індуктивність, струм під час вимірювань коливається в момент подання напруги. Тому відлік показів приладів потрібно виконувати тільки після закінчення перехідного процесу, про що свідчить припинення зміни показів амперметра або

містка. Якщо обмотка має велику постійну часу, то використовують схеми з формуванням струму.

За використання для вимірювань одинарного містка до опору обмоток додається опір контактів та з'єднувальних проводів, в зв'язку з цим одинарний місток рекомендується використовувати під час вимірювання опорів, які перевищують 1 Ом. Використання подвійного містка забезпечує максимальну точність вимірювань опору. Якщо тепловий стан різних частин обмотки контролюється за допомогою давачів температури, які встановлені на обмотку, то за температуру обмотки приймають середнє арифметичне значення показів давачів, якщо ці покази змінюються не більше ніж на 1°C за годину та відрізняються від середнього значення не більше ніж на 2°C.

Визначення опору обмоток постійного струму в практично холодному стані передбачене програмою приймально-здавальних випробувань, хоча більшість електричних машин не комплектується давачами температури обмоток. У цьому випадку температури обмоток визначають такими способами:

- в електричній машині, яка обладнана давачами температури окремих її частин, за температуру обмотки приймають середнє арифметичне значення показів давачів, якщо воно не змінюється більше, ніж на 1°C за 4 години за зміни опору обмотки не більше ніж на 0,5%;

- в електричній машині, яка не обладнана давачами температури, температура обмотки приймається рівною температурі поверхні машини (корпуса або підшипникових блоків), якщо ця температура змінюється не більше ніж на 1°C за 8 годин зі зміною опору обмотки за цей же час не більше ніж на 0,5%;

- в електричній машині, яка не обладнана давачами температури, температура обмотки приймається рівною температурі навколишнього середовища під час вимірювань, якщо перед цим машина знаходилась в неробочому стані тривалий час, протягом якого температура навколишнього середовища змінилась не більше ніж на 5°C.

Зазначимо, що в розглянутих випадках напрям зміни температури й опору обмотки повинні збігатися. Використання останнього способу не завжди правомірне, оскільки постійна часу нагрівання (охолодження) електричних машин, як правило, складає декілька годин, в той же час добові коливання температури можуть суттєво перевищувати допустимі 5°C.

Вимірювання електричної потужності можна здійснювати двома способами: безпосереднім та непрямим. Під час використання першого способу межі вимірювань за струмом та напругою повинні перекривати діапазон змін струму та напруги навантаження. У випадку використання непрямого способу обмотки ватметра вмикають через трансформатори струму й (або) напруги, що призводить до збільшення похибки вимірюної

потужності. Стаціонарні трансформатори напруги мають 3 класи точності: 0,5; 1; 3, лабораторні – 4 класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5.

Вимірювання потужності трифазного струму здійснюється за допомогою одного однофазного ватметра, якщо навантаження симетричне й ватметр не впливає на розподіл її по фазах, за допомогою двох однофазних ватметрів, трьох однофазних ватметрів та одного трифазного ватметра під час вимірювання потужності до 100 кВт.

2.2 Вимірювання опору ізоляції та випробування її на електричну міцність

Опір ізоляції обмоток вимірюється відносно корпусу електричної машини та між обмотками. Вимірювання здійснюється мегомметром, який є малопотужним генератором постійного струму. Випускаються мегомметри класу напруги 500, 1000 та 2500 В. Крім того, промисловість також випускає електронні мегомметри типу Ф4101 на напругу 100, 500 та 1000 В.

Згідно з вимогами вимірювання опору ізоляції електричних машин, які обертаються, потрібно виконувати мегомметрами класу 500 В, якщо напруга обмотки до 500 В включно, і мегомметрами класу не нижче 1000 В, якщо номінальна напруга обмотки вища 500 В. Для вимірювання опору ізоляції обмоток трансформаторів використовуються мегомметри класу 1000 В для трансформаторів до 35 кВ і потужністю менше 16 МВА та класу 2500 В для інших трансформаторів.

Під час вимірювання опору ізоляції обмоток великих електричних машин та трансформаторів, які мають значну ємність (між обмотками та на корпус), потрібно використовувати електронні мегомметри або мегомметри з моторним приводом, оскільки час перехідного процесу, що визначається величиною ємності, може сягати декількох хвилин. Запис опору ізоляції потрібно виконувати двічі: через 15 та 60 с після появи напруги на обмотках. Вимірювання опору ізоляції здійснюється як в практично холодному, так і в нагрітому стані за температури обмоток, яка наближена до робочої, а також до й після випробувань ізоляції обмоток на електричну міцність. В результаті вимірювань, крім опору ізоляції, який відповідає вимірюванню через 60 с ($R_{60''}$), визначають коефіцієнт абсорбції:

$$K_{аб} = \frac{R_{60''}}{R_{15''}}. \quad (2.7)$$

Опір ізоляції відносно корпусу машини та між фазами потрібно вимірювати почергово для кожного кола, яке має окремі виводи, за електричного з'єднання усіх інших кіл з корпусом машини. Після

закінчення вимірювань опорів ізоляції кожного кола потрібно їх розрядити шляхом з'єднання з заземленим корпусом машини. Тривалість такого з'єднання для машин з обмотками на номінальну напругу 3000 В та вище складає 15 с або 1 хв для машин потужністю до 1 МВт чи більше 1 МВт, відповідно. Під час використання мегомметра (*megohm meter; high-resistance ohmmeter*) класу 2500 В тривалість з'єднання обмоток з корпусом складає не менше 3 хв.

Під час вимірювання опору ізоляції обмоток електричних машин відносно корпусу (рисунк 2.2, а) нульовий вивід мегомметра з'єднується з заземленим корпусом машини (через болт заземлення), а високовольтний вивід – з одним із виводів обмотки. Обмотки фаз, опір яких не вимірюється, заземлюються. При вимірюванні опору ізоляції між обмотками (рисунк 2.2, б) порядок приєднання виводів мегомметра до виводів обмотки будь-який. Аналогічна схема використовується для вимірювання опору ізоляції трансформаторів.

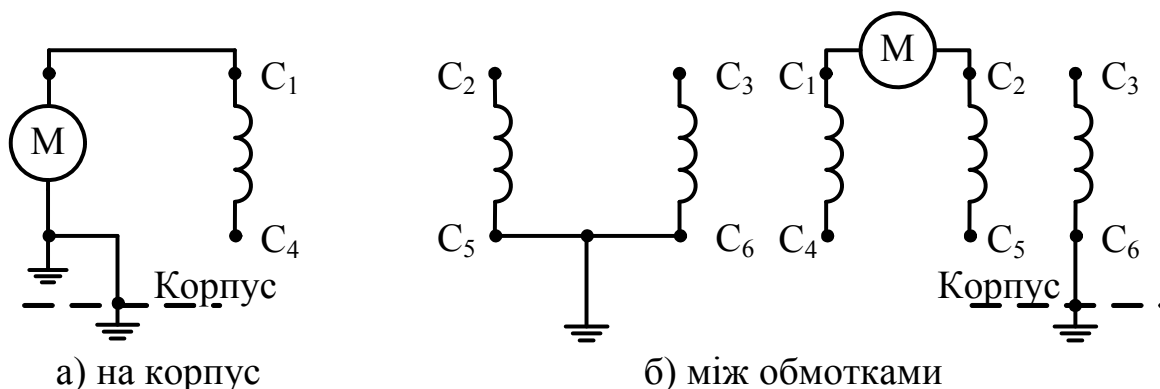


Рисунок 2.2 – Схеми вимірювання опору ізоляції обмоток електричних машин

Значення опору ізоляції обмоток (в МОм) для робочої температури t повинно бути не менше від значення, яке визначене за формулою [16]:

$$r = \frac{U}{1000 + 0,01 \cdot P}, \quad (2.8)$$

де U – номінальна напруга обмотки, В;

P – номінальна потужність (*rated power*) машини, кВА або кВт.

Якщо значення опору ізоляції, яке отримане за допомогою формули (2.8), не перевищує 0,5 МОм, то як мінімально допустиме приймаємо $r = 0,5$ МОм.

Оскільки вимірювання опору ізоляції при робочій температурі дуже складне, допускається проведення вимірювань за більш низької температури. У цьому випадку мінімально допустимий опір ізоляції для

температури $t < t_{\text{роб}}$ потрібно визначати за формулою:

$$r_v = r_{\min} \cdot 2^K, \quad (2.9)$$

де $K = \frac{t_{\text{роб}} - t}{20}$ з округленням до більшого цілого;

r_{\min} – мінімально допустимий опір ізоляції визначений за формулою (2.8), але не менший 0,5 МОм.

Приклад. Визначимо мінімально допустимий опір ізоляції обмотки статора (*stator*) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу 4АН280М2У3 потужністю 200 кВт, напругою 660 В, класом нагрівостійкості ізоляції обмотки ротора F. Вимірювання опору ізоляції здійснюється за температури 20°C.

Визначимо за формулою (2.8) мінімально допустимий опір ізоляції для робочої температури (для класу нагрівостійкості F розрахункова температура складає 115°C):

$$r_{\min} = \frac{660}{1000 + 0,01 \cdot 200} = 0,66 \text{ МОм.}$$

Визначимо мінімально допустимий опір ізоляції для температури 20°C:

$$K = \frac{115 - 20}{20} = 4,75 \approx 5.$$

$$r_{20^\circ\text{C}} = 0,66 \cdot 2^5 = 21,12 \text{ МОм.}$$

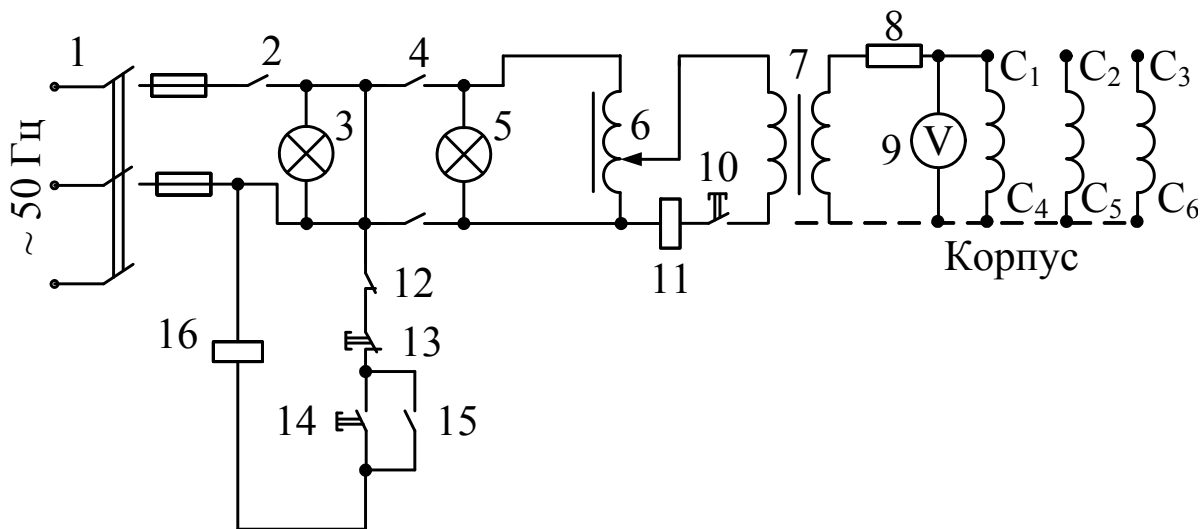
Отже, опір ізоляції асинхронного двигуна за температури 20°C повинен бути не менше 21,12 МОм.

Випробування ізоляції обмоток електричних машин на електричну міцність проводять для визначення кількісного показника електричної міцності ізоляції обмоток відносно корпусу машини, між обмотками та між вітками фаз. Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини та між фазами проводять змінною напругою частотою 50 Гц від випробувального трансформатора потужністю не менше 1 кВ·А на 1 кВ напруги випробування.

Регулювання напруги здійснюється плавно або ступенями, які не перевищують 5% від випробувального значення, на стороні первинної обмотки випробувального трансформатора. Випробування починають з напруги не вищої від 1/3 випробувальної. Час підвищення напруги від

половинного значення до випробувального має бути не менше 10 с; випробувальна напруга витримується протягом 1 хв. Після цього напруга плавно знижується до 1/3 від випробувальної та вимикається живлення трансформатора.

Принципова схема установки для випробувань наведена на рисунку 2.3. Основною частиною установки є випробувальний високовольтний трансформатор 7, який отримує живлення від мережі через автотрансформатор для регулювання напруги 6. Автотрансформатор дозволяє плавно піднімати напругу від нуля на первинній обмотці трансформатора 7 і тим самим напругу на обмотці, яка випробовується. Під час пробою ізоляції збільшується струм в обмотках трансформатора 7. Для його обмеження використовується захисний опір 8. Вважається, що ізоляція пройшла випробування, якщо не виникло її пробою або перекриття ковзними розрядами.



- | | |
|---|---|
| 1 – рубильник; | 9 – вольтметр; |
| 2 – кінцевий вимикач; | 10 – кнопка; |
| 3, 5 – лампи; | 11 – обмотка реле максимального струму; |
| 4, 15 – основні та допоміжні контакти магнітного пускача; | 12 – контакт реле струму; |
| 6 – автотрансформатор для регулювання напруги; | 13 – кнопка “стоп”; |
| 7 – високовольтний трансформатор; | 14 – кнопка “пуск”; |
| 8 – захисний резистор; | 16 – магнітний пускач. |

Рисунок 2.3 – Принципова схема установки для випробування ізоляції електричних машин на електричну міцність

Для гарантування безпеки роботи високовольтний трансформатор, електрична машина, що випробовується, та всі струмоведучі частини, які знаходяться під час випробувань під високим потенціалом, захищені металевим заземленим огородженням. На дверях огородження встановлено кінцевий вимикач 2 з контактом, який розмикається під час

відкривання дверей та вимикає установку з мережі. Увімкнення установки можливе тільки з зачиненими дверима захисної конструкції й здійснюється рубильником 1. При цьому вмикається лампа 3, яка освітлює табло “Установка увімкнена” над дверима огорожі.

Після натискання кнопки “Пуск” 14 обмотка магнітного пускача 16 вмикається під напругу та замикаються його основні контакти 4, які підключають до мережі автотрансформатор 6. Одночасно з основними контактами замикається й допоміжний контакт 15, який засвічує на пульті червоний сигнал “Висока напруга подана”. Це означає, що під час натискання кнопки 10 висока напруга може бути подана на електричну машину, яка випробовується. Для увімкнення високовольтного трансформатора цю кнопку потрібно натиснути й утримувати рукою.

Випробувальний трансформатор (*test(ing) transformer*) приєднується до автотрансформатора через реле максимального струму, яке вимикає високовольтний трансформатор у момент пробою ізоляції обмотки машини, що випробовується. У момент пробою контакт 12 цього реле розмикається, коло управління магнітним пускачем залишається без живлення, всі контакти пускача розмикаються, гасне лампа 5 і автотрансформатор з випробувальним трансформатором вимикається з мережі. Контроль за значенням випробувальної напруги здійснюється за допомогою високовольтного вольтметра 9, який розташований за огорожею. Після закінчення випробувань вимикають рубильник 1 (напругу перед цим знижують до нуля), відчиняють двері огорожі, заземлюють вивід C_1 для розряду конденсатора “обмотка-корпус” та складають наступну схему.

Випробуванню ізоляції на електричну міцність відносно корпусу потрібно піддавати по черзі кожне коло, яке має окремі виводи. При цьому один вивід випробувального трансформатора 7 під’єднують до будь-якого з виводів обмотки, що випробовується (на рисунку 2.3 до виводу C_1), а інший вивід заземлюють та під’єднують до заземленого корпусу машини, з яким під час випробування обмотки $C_1 - C_4$ електрично з’єднують обмотки $C_2 - C_5$ та $C_3 - C_6$.

Випробування ізоляції обмотки суміжних витків двигуна, який працює на холостому ході, проводиться напругою $1,3 \cdot U_{\text{ном}}$ протягом 3 хв. Для гідрогенераторів ізоляція обмотки (*primary insulation*) суміжних витків повинна випробовуватись напругою $1,5 \cdot U_{\text{ном}}$ протягом 5 хв, для турбогенераторів напругою $1,3 \cdot U_{\text{ном}}$ – протягом 5 хв. Потрібне значення випробувальної напруги генераторів досягається збільшенням струму збудження. Під час випробувань машин постійного струму з кількістю полюсів більше чотирьох, напруга між суміжними колекторними пластинами не повинна перевищувати 24 В.

2.3 Методи визначення коефіцієнта корисної дії

Коефіцієнт корисної дії (*efficiency*) (ККД) електричної машини визначається відношенням корисної потужності до підведеної та виражається у відсотках:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100, \quad (2.10)$$

або

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} \cdot 100, \quad (2.11)$$

де P_1 – потужність, яка підводиться до електричної мережі;

P_2 – корисна потужність (*operating power; useful power*) електричної машини;

ΣP – сумарні втрати в електричній машині, які дорівнюють $P_1 - P_2$.

Оскільки під час випробувань завжди контролюється електрична потужність, то перший вираз у формулі (2.11) використовується для визначення ККД двигунів, а другий – ККД генераторів.

Машина під час визначення ККД не повинна мати вібрацій, недопустимих шумів; її підшипники, підп'ятники, колектор (або контактні кільця) і щітки повинні бути припрацьовані, а температура всіх частин машини дорівнювати робочій. Температура охолоджувального середовища не повинна перевищувати граничних значень, які встановлено стандартами.

Для визначення ККД електричної машини використовують два методи: безпосередній та непрямий.

Безпосередній метод визначення ККД із використанням формули (2.10) застосовується, як правило, для машин з ККД не більшим 85%.

У цьому випадку ККД визначають такими способами:

- спосіб вимірювання потужності (спосіб “двигун-генератор”), за використання якого потужність, яка підводиться та віддається, визначається за допомогою електровимірювальних приладів;

- спосіб гальмування, під час якого обертовий момент, що розвивається двигуном, та відповідну йому потужність, яка віддається, визначають за допомогою пристрою гальмування, а електричну потужність, яка підводиться, – за допомогою електровимірювальних приладів;

- спосіб навантаження (спосіб тарованої машини), під час якого електрична потужність, що споживається двигуном (видається генератором), визначається за допомогою електровимірювальних приладів, а механічна потужність двигуна, яка віддається (потужність генератора, що споживається), вимірюється за допомогою тарованої машини, потужність

якої повинна бути сумірна з потужністю випробуваної машини. Тарованою машиною вважається електрична машина з відомими витратами в будь-якому режимі роботи.

Непрямий метод визначення ККД із використанням формули (2.11) застосовується для машин з ККД більшим 85%. Він базується на вимірюванні таких втрат потужності в електричній машині:

$P_{ст}$ – втрати потужності в сталі;

$P_{мех}$ – механічні втрати;

$P_{e1} + P_{e2}$ – основні втрати потужності в колах робочих обмоток машини;

$P_{дод}$ – втрати потужності в перехідних контактах щіток, на збудження та додаткові (втрати, які не враховано в інших випадках).

Сумарні складові основних втрат у колах робочих машин, втрати в перехідних контактах щіток та втрати на збудження визначаються шляхом розрахунків, а втрати в сталі (*core loss; iron loss*) та механічні втрати – дослідним шляхом.

Щодо додаткових втрат, то для синхронних машин потужністю більше 100 кВА їх рекомендують визначати дослідним шляхом, а для інших машин – розрахунковим. В останньому випадку вони приймаються рівними 1% від потужності, яка віддається некомпенсованими генераторами постійного струму або 1% від потужності, яка підводиться до некомпенсованих двигунів постійного струму та колекторних двигунів змінного струму. Для інших машин додаткові втрати приймаються рівними 0,5% від потужності, виробленої генераторами або спожитої двигунами.

Основні втрати в обмотці якоря машини постійного струму, у послідовно з'єднаних з нею інших обмотках (послідовній обмотці збудження, обмотці додаткових полюсів та компенсаційній обмотці), а також основні втрати в обмотці якоря синхронної машини потужністю до 100 кВА та в обмотці статора асинхронної машини розраховуються за формулою:

$$P_{e1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (2.12)$$

де P_{e1} – електричні втрати у вказаних обмотках, Вт;

m_1 – кількість фаз обмотки;

I_1 – робочий струм фази, А;

r_1 – опір обмотки фази на постійному струмі відносно розрахункової робочої температури, Ом.

Розрахункова робоча температура обмотки приймається рівною:

– 75°C – для обмоток, гранично допустимі перевищення температури

яких відповідають класам нагрівостійкості А, Е, В;

– 115°C – для обмоток, гранично допустимі перевищення температури яких відповідають класам нагрівостійкості F, H.

Основні втрати в обмотці ротора P_{e2} асинхронної машини визначають через електромагнітну потужність P_{em} та ковзання s (*slip*, *slipping*):

$$P_{em} = P_1 \pm (P_{ст} + P_{e1}); \quad (2.13)$$

$$P_{e2} = s \cdot P_{em}. \quad (2.14)$$

В формулі (2.13) знак “–” відповідає режиму двигуна асинхронної машини, а знак “+” – генераторному, причому асинхронна машина (*asynchronous machine*) в режимі двигуна споживає потужність P_1 , а в генераторному цю потужність віддає.

Втрати в паралельних обмотках збудження розраховують за струмом та напругою збудження. В машині зі збудженням від незалежного джерела втрати на збудження визначаються за струмом збудження та опором обмотки збудження на постійному струмі, який зведено до розрахункової робочої температури. У випадку збудження від електромашинного збуджувача враховуються втрати в збуджувачі та усіх пристроях, які входять в його комплект, за виключенням механічних втрат.

Втрати в перехідних контактах щіток кожної полярності розраховують за струмом та за перехідним спадом напруги, яка приймається рівною:

– 1 В – для вугільних (*carbon(-baked) brush*) та графітових щіток (*graphite brush*);

– 0,3 В – для металовугільних та металографітових щіток.

Для експериментального визначення втрат потужності в сталі та механічних втрат (а також додаткових втрат синхронних машин потужністю більше 100 кВ·А) можна використовувати способи обертання в режимі ненавантаженого двигуна, тарованої машини, самогальмування та калориметричний (*calorimetric method*).

Вказані способи використовуються за усталеного теплового стану частин машини, яка випробовується.

Спосіб обертання в режимі ненавантаженого двигуна використовується для машин усіх типів, які допускають обертання в режимі холостого ходу під час живлення від джерела напруги.

Машина, що випробовується, обертається в режимі холостого ходу з номінальною частотою та напругою, яка змінюється від значення, з якого проводиться випробування міжвиткової ізоляції на електричну міцність, до найменшого значення, яке забезпечує стійке обертання з цією частотою.

Постійність частоти обертання досягається підтриманням незмінної частоти прикладеної напруги в машинах змінного струму та регулюванням

струму збудження в машинах постійного струму. Збудження синхронних машин та машин постійного струму за будь-якої системи збудження здійснюється від незалежного джерела. Для машин постійного струму вимірюють прикладену напругу, струм і частоту обертання, а для машин змінного струму, крім того, частоту мережі та активну потужність, яка підводиться.

Суму втрат потужності в сталі та механічних втрат визначають відніманням від вимірної підведеної потужності основних втрат, які створюються в обмотках робочого кола машин, і втрат в перехідних контактах щіток. Основні втрати розраховують за опором обмоток одразу після закінчення досліду.

Спосіб тарованого двигуна використовується для синхронних машин та машин постійного струму. Машину, яка випробовується, приводять в обертання з номінальною частотою тарованим двигуном та збуджують від незалежного джерела. Для визначення втрат в сталі та механічних втрат напругу на виводах обмотки розімкненого якоря машини змінюють регулюванням струму збудження від найбільшої напруги, яка відповідає випробуванню міжвиткової ізоляції, до напруги, яка відповідає залишковому намагнічуванню за розімкненої обмотки збудження. Одночасно вимірюють потужність, яка підводиться до тарованого двигуна, і усі величини, які необхідні для визначення втрат в ньому.

Суму механічних втрат і втрат потужності в сталі машини, яка випробовується, розраховують як різницю підведеної потужності та втрат в тарованому двигуні.

Даний спосіб використовується для визначення суми основних втрат в обмотці якоря та додаткових втрат синхронних машин потужністю більше 100 кВ·А.

Спосіб самогальмування використовується для машин постійного струму та асинхронних машин, які мають значний момент інерції (*moment of inertia*) ротора. Для визначення втрат частоту обертання машини доводять до значення, яке дещо перевищує номінальне, після цього джерело енергії вимикають. В ході випробувань машин постійного струму проводять два досліди: самогальмування без збудження та самогальмування на холостому ході й струмі збудження, якому відповідає номінальна напруга на виводах розімкненої обмотки якоря за номінальної частоти обертання.

Для синхронних машин потужністю більше 100 кВ·А додатково проводять третій дослід – самогальмування для симетричного КЗ на виводах обмотки якоря та номінального струму в цій обмотці (збудження машини здійснюється від окремого джерела постійного струму).

Діапазон зміни частоти обертання в досліді складає $(110 \div 90)\%$ від номінальної, а в деяких випадках може бути зменшений до $(105 \div 95)\%$. Під час досліду записується зміна частоти обертання n в функції часу, а також

контролюються покази електровимірювальних приладів (в колі якоря машини) в момент проходження номінальної частоти обертання. Розрахунок втрат виконується за осцилограмою $n(t)$ з використанням формули:

$$P = J \cdot n_n \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (2.15)$$

де P – втрати в машині, які викликають її гальмування, Вт;

J – момент інерції ротора (або роторів, у випадку використання для розгону допоміжного двигуна), значення якого відоме, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

n_n – номінальна частота обертання машини, $1/\text{с}$;

$\frac{dn}{dt}$ – сповільнення ротора в точці $n = n_n$, $1/\text{с}^2$.

У випадку використання допоміжного двигуна повинні бути відомі його механічні втрати та момент інерції ротора.

З першого дослідів за формулою (2.15) визначають механічні втрати $P_{\text{мех}}$, з другого – схему механічних втрат та втрат потужності у сталі $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$, з третього – суму механічних та додаткових втрат, а також втрат в обмотці якоря $P_{\text{мех}} + P_{\text{дод}} + P_{\text{ел}}$ (втрати потужності в сталі внаслідок малої величини робочого потоку в режимі КЗ можна не враховувати).

Калориметричний спосіб більш трудомісткий, ніж спосіб самогальмування, оскільки він дає правильні результати для усталеного теплового процесу, час досягнення якого може бути дуже значним. Суть методу полягає у вимірюванні втрат (газ, масло, вода). Для визначення втрат, вимірюють втрати в охолоджувальних середовищах та підвищення їх температури після проходження через машину, яка знаходиться в практично усталеному тепловому стані або порівнянням нагріву охолоджувальних середовищ під час проходження через машину та через пристрій, в якому виділяється аналогічна потужність (якщо конструкція машини не допускає вимірювання втрат охолоджувальних середовищ).

Сумарні втрати розраховуються за формулою:

$$\Sigma P = \Sigma V_i \cdot C_i \cdot \Delta \nu_i, \quad (2.16)$$

де V_i – витрати i -го охолоджуючого середовища, $\text{м}^3/\text{с}$;

C_i – об'ємна теплоємність середовища, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

$\Delta \nu$ – різниця температур середовища на виході та вході машини, К.

Під час застосування калориметричного способу проводять три дослідів з номінальною частотою обертання:

- з недозбудженою машиною – для визначення механічних втрат;
- з розімкненою обмоткою якоря та номінальною напругою на ній – для визначення суми втрат в сталі, механічних втрат та втрат на збудження для струму збудження холостого ходу;
- з замкненою накоротко обмоткою якоря з номінальним струмом якоря – для визначення суми механічних втрат, основних втрат в обмотці якоря, додаткових втрат та втрат на збудження для струму збудження короткого замикання.

Останній дослід проводять для визначення основних втрат в обмотці якоря та додаткових втрат в синхронних машинах потужністю більше 100 кВ·А. Втрати в кожному досліді розраховуються за формулою (2.16).

Під час розрахунку ККД синхронних машин і машин постійного струму, отримані дослідним шляхом втрати в сталі та механічні втрати не потрібно розділяти, а для асинхронних машин – потрібно.

Для визначення втрат потужності в сталі та механічних втрат в асинхронних двигунах можуть бути використанні два способи: калориметричний та спосіб обертання в режимі ненавантаженого двигуна.

Під час використання калориметричного способу визначають механічні втрати $P_{\text{мех}}$ й суму втрат в сталі $P_{\text{ст}}$, механічні та електричні втрати в обмотці статора. Електричні втрати $P_{\text{ел}}$ за відомих значень струму, активного опору й температури обмотки статора (з дослідів) визначають розрахунковим шляхом за формулою (2.12). Визначивши $P_{\text{мех}}$ та суму $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{ел}}$, розраховують втрати в сталі $P_{\text{ст}}$.

Під час використання способу обертання в режимі ненавантаженого двигуна дослід проводять для декількох значень прикладеної напруги. В результаті отримують залежність $P_{10}(U_1)$, де P_{10} – сума механічних втрат, втрат в сталі та електричних втрат в обмотці статора. Віднімаючи від P_{10} електричні втрати (за відомого значення струму I_{10} та опору обмотки статора), отримують залежність $\Pi_o = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} = f(U_1)$, як показано на рисунку 2.4.

Оскільки дослід повинен проводитись з постійною частотою обертання, механічні втрати під час дослідів повинні залишитись постійними. Втрати в сталі залежать від квадрата прикладеної напруги. Отже, якщо будувати залежність $\Pi_o = f(U_1^2)$, то вона повинна бути прямолінійною (дивись рисунок 2.4) і відсікати на осі ординат відрізок, який кількісно дорівнюватиме механічним втратам. Віднімаючи механічні втрати з $\Pi_o = f(U_1^2)$, отримуємо втрати потужності в сталі.

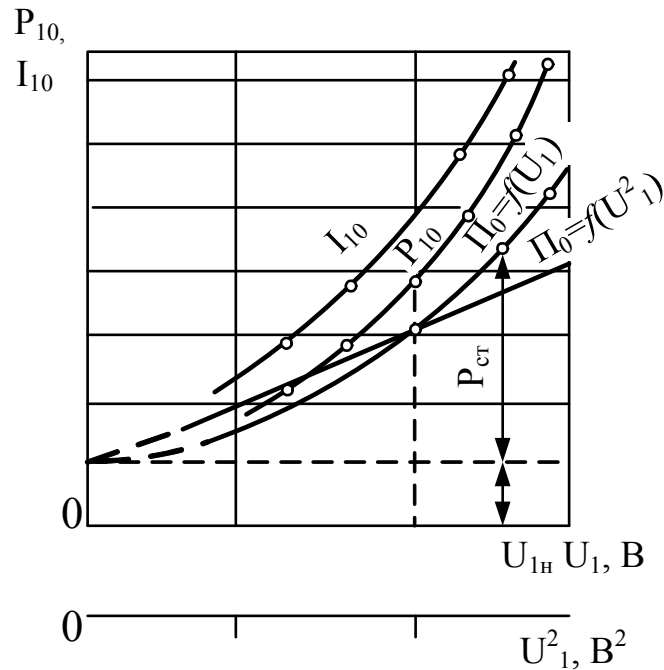


Рисунок 2.4 – Визначення механічних втрат та втрат потужності в сталі у досліді обертання асинхронної машини в режимі ненавантаженого двигуна

2.4 Визначення ступеня іскріння колекторних машин

Ступінь іскріння (*sparking; brush sparking*) машин постійного струму та колекторних машин (*commutator machine*) змінного струму оцінюється за ступенем іскріння під збігаючим краєм щітки. Стандарт передбачає п'ять можливих ступенів іскріння: 1, $1^{1/4}$, $1^{1/2}$, 2 і 3 (таблиця 2.1). Як правило, ступінь іскріння електричних машин за номінального режиму роботи не перевищує $1^{1/2}$.

Методи оцінювання комутації можна поділити на фотографічні, фотоелектричні, з реєструванням рівня радіоперешкод, з вимірюванням напруги під збігаючим краєм щітки та реагуючі на імпульсні напруги комутаційної реакції якоря.

До першої групи методів належать:

- візуальне оцінювання за вказаними критеріями;
- фотографування іскріння з подальшим його оцінюванням;
- метод світлового клину, який дозволяє оцінити ступінь іскріння за його яскравістю відповідно до щільності світлофільтра, який використовується.

Фотоелектричні прилади складаються з фотодавача (*photodetector; photosensor*), каналу передавання інформації, фотопідсилювача та реєстраційного приладу, роль якого можуть відігравати стрілкові індикатори та осцилографи (*oscilloscope*). Фотодавачі закріплюються поблизу щіток, тому повинні бути заходи зі зменшення впливу на їхню роботу вібрації та теплоти. Крім того їх потрібно екранувати від зовнішніх джерел світла.

Таблиця 2.1 – Ступені іскріння машин постійного струму

Ступінь іскріння (клас комутації)	Характеристика ступеня іскріння	Стан колектора і щіток
1	Відсутність іскріння (темна комутація)	—
$1^{1/4}$	Слабке іскріння під невеликою частиною щітки	Відсутність почорніння на колекторі й нагару на щітках
$1^{1/2}$	Слабке іскріння під великою частиною щітки	Поява почорніння на колекторі, яке легко усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів від нагару на щітках
2	Іскріння під усім краєм щітки (допускається тільки для короточасних поштовхів, навантажень та перевантажень)	Поява почорніння на колекторі, яке не усувається протиранням колектора бензином, а також слідів від нагару на щітках
3	Значне іскріння під усім краєм щітки з наявністю великих іскор та іскор, що вилітають (допускається тільки для моментів прямого вмикання або реверсування машин, якщо при цьому колектор та щітки залишаються в придатному для подальшої роботи стані)	Значне почорніння на колекторі, яке не усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також підгоряння та руйнування щіток

Комутація супроводжується радіоперешкодами в діапазоні частот (1000÷3000) Гц, причому погіршення комутації (підсилення іскріння) призводить до підвищення рівня радіоперешкод. Отже, вимірювання радіоперешкод у зоні щіткового контакту (*brush collector; brush contact*) дозволяє оцінити ступінь іскріння.

До недоліків цього методу відносять залежність рівнів радіоперешкод від частоти обертання машини та від зовнішніх радіоперешкод, які є в живильній мережі.

Прилади, які вимірюють напругу під збіжним краєм щітки, дозволяють отримати графік (потенціальну криву), за виглядом якої можна робити якісні висновки про характер комутації. Для проведення цих вимірювань потрібна установка на колекторі додаткової (вимірювальної)

щітки. У деяких випадках може вимірюватись напруга під набіжним краєм щітки.

Під час комутації не завжди можна помітити іскріння, однак, воно може супроводжуватись імпульсною напругою, значення якої сягає декількох десятків вольт. Ця напруга збільшується під час погіршення комутації. Для проведення вимірювань потрібно встановити на колекторі додаткову щітку. Прилади дозволяють проводити дистанційне вимірювання, досліджувати динамічні режими й мало залежать від зовнішнього впливу.

До даної групи належать прилади, які вимірюють імпульсну складову поля комутаційної реакції якоря на головних полюсах. В цьому випадку замість додаткової щітки на колекторі потрібна додаткова (вимірювальна) обмотка на головних полюсах.

Контрольні запитання

1. Способи вимірювання сили струму, напруги та потужності під час випробування електричних машин.
2. Методи вимірювання активного опору обмоток.
3. Визначення температури обмоток в практично холодному стані за відсутності вбудованих датчиків температури.
4. Вибір класу напруги мегомметра під час вимірювання опору ізоляції обмоток.
5. Залежність опору ізоляції від її температури.
6. Допустима швидкість наростання (спаду) напруги під час випробування ізоляції на електричну міцність.
7. Способи визначення ККД та галузь їх використання.
8. Визначення втрат в електричних машинах розрахунковим та дослідним шляхом.
9. Характеристики методів оцінювання комутації.
10. Основні характеристики датчиків струму.
11. Методи вимірювання електричної потужності.
12. Охарактеризуйте способи безпосереднього визначення ККД електричних машин.

3 ВИПРОБУВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

3.1 Вимірювання температури

Під час випробувань застосовуються два різних види термоперетворювачів – з лінійною та різко нелінійною характеристикою “вхід-вихід” у зоні допустимих температур. Перші використовуються для безперервного вимірювання температури (*temperature measurement*) або перевищення температури над температурою навколишнього середовища, а інші – для реєстрування факту перевищення температури окремих частин машин більше допустимого значення.

Для отримання достовірних результатів необхідно попередньо знати приблизну картину теплового поля електричної машини або трансформатора, щоб правильно встановити давачі температури.

До вимірювань температури ставляться такі технічні вимоги:

- можливість вимірювань в потрібних точках під час різних теплових режимів роботи;
- внесення мінімальних порушень у теплове коло під час вимірювань;
- можливість виконання дистанційних вимірювань, переважно методами безпосереднього оцінювання;
- незалежність результатів вимірювань від вібрації, електромагнітних полів та умов навколишнього середовища;
- висока точність вимірювань;
- можливість використання для вимірювань температури простої та стандартної апаратури.

Відповідно до вказаних вимог розглянемо різні методи та способи вимірювання температури.

Температуру окремих частин машини та охолоджувальних середовищ відповідно до нормативних, можна вимірювати методами термопар, опору, закладання давачів температури до вбудованих давачів температури.

Метод термопар. У цьому методі термоперетворювач давача температури прикладається до доступних поверхонь зібраної електричної машини. Як термоперетворювач давача можна використовувати термометр розширення, термопару, термометр опору або терморезистор (*temperature-sensitive resistor; thermistor*). Результат вимірювання показує температуру поверхні в точці прикладання давача температури. Термометри розширення використовуються в основному для вимірювання температури охолоджувальних рідин та газів. При цьому не потрібно використовувати ртутний термометр для вимірювання температури тих частин машини, де є змінні магнітні поля, оскільки змінні магнітні поля наводять у ртуті вихрові струми, які нагрівають її, а це призводить до неправильних

показів.

Метод опору дає середнє значення температури обмотки. Перевищення температури обмотки понад температуру охолоджувального середовища визначається за формулою [16]:

$$\Delta \nu = \frac{r_T - r_X}{r_X} \cdot (K + \nu_X) + \nu_X - \nu_0, \quad (3.1)$$

де r_T, r_X – опори обмотки в гарячому та холодному станах, Ом;

K – величина зворотна температурному коефіцієнту опору для 0°C ($K = 235$ для мідної обмотки та 245 для обмотки з алюмінію);

ν_X – температура обмотки в практично холодному стані, 0°C ;

ν_0 – температура охолоджувального середовища, 0°C .

Для покращення точності результатів вимірювання опору обмоток в холодному та гарячому станах, необхідно використовувати одні й ті самі прилади.

Метод закладених давачів температури застосовується для визначення температури обмотки або активної сталі. Зазвичай встановлюють не менше шістьох давачів, які рівномірно розташовують по колу машини у тих точках обмотки у осьовому напрямленні пазів, в яких очікують найбільші значення температури. Кожний давач повинен торкатися безпосередньо поверхні, температуру якої необхідно виміряти, та повинен бути захищений від впливу охолоджувального середовища. Як термоперетворювачі давачів використовують термопари, термометри опору або терморезистори.

Температуру в місці закладання термопари потрібно визначити за її характеристикою градування. Холодний спай термопари повинен бути захищений від швидких змін температури навколишнього середовища. При наявності однієї-двох термопар ЕРС вимірюється мілівольтметром з діапазоном вимірювань $3 \div 10$ мВ та внутрішнім опором не менше 25 Ом/мВ. Для усунення методичної похибки (врахування опору термопари) потрібно вводити поправку на покази мілівольтметра за формулою:

$$U = U_B \cdot \frac{(r_B - r_T)}{r_B}, \quad (3.2)$$

де U – дійсне значення ЕРС термопари, мВ;

U_B – виміряне значення ЕРС, мВ;

r_B, r_T – внутрішній опір мілівольтметра та опір термопари.

При більшій кількості термопар, як правило, застосовують

компенсаційний метод вимірювань. Температуру в місці закладання термометрів опору визначають вимірюванням опору термометра містком або спеціальним логометром. Перевищення температури приймають рівним найбільшому вимірюваному значенню.

Метод вбудованих давачів температури. Під час використання цього методу, давачі (термопари, термометри опору або терморезистори) встановлюють в електричну машину тільки під час випробувань. Місце встановлення – лобові частини обмотки або між окремими листами активної сталі на глибину не менше 5 мм від її поверхні. Крім того, давачі можуть встановлюватися у інших доступних точках машини, в яких очікується найбільше перевищення температури.

Характеристики термоперетворювачів. Термопари використовують явище термоелектрики. Для промислових термопар використовуються такі матеріали термоелектродів [16]:

- термопара типу ТПП: платинородій (10% родію) – платина;
- термопара типу ТПР: платинородій (30% родію) – платина;
- термопара типу ТХА: хромель - алюмель;
- термопара типу ТХК: хромель - копель.

Діапазон вимірювання температури під час тривалого використання термопар складає для:

- ТПП: від -20 до $+1300^{\circ}\text{C}$;
- ТПР: від $+300$ до $+600^{\circ}\text{C}$;
- ТХА: від -50 до $+1000^{\circ}\text{C}$;
- ТХК: від -50 до $+600^{\circ}\text{C}$.

Значення термо-ЕРС, яка розвивається термопарами за температури "гарячого" спаю 0°C складає:

- для термопари типу ТПП – 0,64 мВ;
- для термопари типу ТХА – 4,1 мВ;
- для термопари ТХК – 6,9 мВ.

Для вимірювання температур нижчих за -50°C застосовуються термопари мідь-констактан (до -270°C) та мідь-копель (до -200°C).

Зауважимо, що термопара вимірює не температуру місця установлення спаю, а перевищення цієї температури над температурою протилежної пари електродів, до яких під'єднується вимірювальний прилад, тому під час проведення вимірювань необхідно знати температуру в місці установлення "холодного" спаю або застосовувати в давачі компенсатор температури "холодного" спаю.

Термометри опору належать до найбільш точних перетворювачів температури. Платинові термометри опору дозволяють вимірювати температуру з похибкою $0,001^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температури використовуються метали (платина, мідь), які мають високостабільний температурний коефіцієнт опору (ТКО) та лінійну залежність опору від

температури.

Промислові платинові термопари опору використовуються в діапазоні температур від -200 до $+650^{\circ}\text{C}$, міді – від -50 до $+200^{\circ}\text{C}$. Величина ТКО в діапазоні температур від 0 до 100°C для платини складає $0,0039$, для міді – $0,00427\text{ K}^{-1}$.

Промислові платинові термопари мають опір $10,46$ та 100 Ом при 0°C ; мідні – 53 та 100 Ом . Збільшення температури чутливого елементу термометра, який розташований в талому льоду, за рахунок нагрівання вимірювальним струмом не повинно перевищувати $0,2^{\circ}\text{C}$ для платинових термометрів і $0,4^{\circ}\text{C}$ для мідних з потужністю розсіювання в термометрі 10 мВт .

Терморезистори бувають металеві та напівпровідникові. Крім платини та міді для виготовлення терморезисторів використовують нікель та вольфрам. ТКО нікелю в діапазоні температур від 0 до 100°C складає $0,0069$, вольфраму – $0,0048\text{ K}^{-1}$.

Основною перевагою нікелю є його відносно високий питомий опір, який має лінійну залежність від температури тільки до $+100^{\circ}\text{C}$. Мідні та нікелеві терморезистори випускають з литого мікропроводу в скляній ізоляції. Мікропроводові терморезистори герметизовані, високостабільні, мало інерційні та за малих габаритів можуть мати опір близько десятків кОм . Для низькотемпературних вимірювань використовують індієві, германієві та вугільні терморезистори.

Напівпровідникові терморезистори відрізняються від металевих меншими габаритами. Їх ТКО має від'ємне значення й зменшується обернено пропорційно квадрату абсолютної температури. Для температури 20°C величина ТКО складає $0,02\div 0,08\text{ K}^{-1}$, що на порядок вище, ніж в металевих терморезисторах. Напівпровідникові терморезистори випускаються у великому асортименті та мають номінальні опори для 20°C від $0,3$ до 3300 кОм . Діапазон робочих температур різних терморезисторів складає від -100 до $+300^{\circ}\text{C}$. Точність вимірювання температури за допомогою напівпровідникових терморезисторів близька до точності вимірювання металевими терморезисторами з дотриманими термінами їх повірки.

Розроблені терморезистори з додатним значенням ТКО на базі сегментованих елементів, які різко змінюють свій опір за малих змін температури. Такі терморезистори знайшли застосування в пристроях захисту електричних машин від перегріву. З їх допомогою перевіряють перевищення допустимих температур. Критична температура, за якої починається різке зростання опору, складає для різних напівпровідникових терморезисторів з додатним значенням ТКО від $+70$ до $+150^{\circ}\text{C}$.

Інерційність термопар і термометрів характеризується їх постійною часу. Розрізняють термопари й термометри опору малоінерційні (постійна

часу менша або дорівнює 40 с для термопари та 9 с для термометра), середньої інерційності (постійні часу відповідно 60 с та 80 с); великої інерційності (з постійними часу до 3,5 та 4,0 хв) і ненормованої інерційності.

Окрему групу складають вимірювачі разової дії, до яких належать теплочутливі фарби й легкоплавкі метали. Ці вимірювачі дозволяють лише дати відповідь на запитання, перевищує температура, що вимірюється, допустиму чи ні. Якщо температура перевищує допустиму, то теплочутлива фарба змінює свій початковий колір, а металевий запобіжник плавиться, порушує контакт у колі вимірювання та сигналізує про недопустиме перевищення температури.

3.1.1 Особливості вимірювання температури обертових частин електричних машин

Температура обертових частин електричної машини вимірюється давачами температури, які можуть з'єднуватись з індикатором через електричний контакт ковзання або безконтактним способом. Можливе використання вимірювачів разової дії.

Під час використання електричного контакту ковзання як термоперетворювач застосовують термопари, термометри опору або терморезистори, які через контактні кільця й щітки або рідкометалеві контакти, з'єднуються з вимірювальними приладами. Під час використання ковзного контакту в його зоні виникає комутаційна ЕРС. Опір контакту суттєво залежить від температури, вологості, вібрації, швидкості обертання (*rotation(al) rate*) та інших чинників. Меншою мірою вплив цих чинників виявляється у випадку використання рідкометалевих контактів.

Безконтактне передавання інформації з термоперетворювача на вимірювальний пристрій може здійснюватись з використанням індуктивності, ємності або ПВЧ-зв'язку. Широкого впровадження набули безконтактні методи вимірювання температури, засновані на вимірюванні теплового випромінювання ротору.

Індукційний зв'язок може здійснюватись за допомогою трансформатора, що обертається – повітряного або з феромагнітним осердям. Котушка, що обертається, з'єднана з термометром опору або терморезистором, а нерухома котушка увімкнена в місткову вимірювальну схему. Живлення містка здійснюється від джерела змінного струму.

У випадку використання ємнісного зв'язку одна з обкладок конденсатора (зазвичай циліндричного) обертається, а інша нерухома. Час заряду або розряду конденсатора та його струм залежить від опору термоперетворювача, який з'єднаний з обертовою обкладкою конденсатора.

Як перетворювачі застосовують також давачі з осердям,

виготовленим з матеріалів, точка Кюрі яких відповідає гранично допустимій температурі контрольованого елемента ротора електричної машини.

ПВЧ-зв'язок використовується рідко та здійснюється за допомогою мініатюрних ПВЧ-резонаторів, які встановлюються на роторі. Під час зміни температури в результаті теплового розширення змінюються лінійні розміри резонатора та його резонансна частота, яка обумовлюється нерухомими приймачами частоти (частотоміри). Приймач може мати шкалу в градусах або спеціальну таблицю чи криву, які дозволяють за відомим значенням частоти визначити температуру.

Використання теплового випромінювання обертових частин електричних машин для вимірювання температур стало можливим після розробки приймачів випромінювання, які мають довжину хвилі близько 5 мкм, що відповідає зоні випромінювання слабо нагрітих тіл з температурою приблизно 100°C. Для безконтактного вимірювання температури обертових частин можна використовувати стандартні фотоелектричні пірометри та тепловізори, які серійно випускаються промисловістю.

3.1.2 Вимірювання температури в трансформаторах

Вимірювання температури охолоджувального середовища (трансформаторне масло (*transformer oil*), рідинний негорючий діелектрик, повітря, елегаз (*sulfur hexafluoride*) здійснюється методом термометра, а температура обмоток – методом опору. У випадку неможливості застосування методу опору використовують метод термометра.

Згідно з нормативами за середню температуру обмоток масляного трансформатора або трансформатора з рідинним негорючим діелектриком, приймається температура масла (рідинного негорючого діелектрика) у верхніх шарах, якщо трансформатор не піддавався нагріванню протягом 20 год і після заливання пройшло не менше 6 год. Температура середніх шарів масла не повинна перевищувати 40°C.

За середню температуру обмоток сухих трансформаторів, які не піддавались нагріванню і знаходились не менше 16 год в приміщенні, в якому коливання температури охолоджувального повітря не перевищувало 1°C в годину, приймають середнє арифметичне показів двох термометрів, які встановлені біля верхнього та нижнього країв бокової поверхні однієї з зовнішніх обмоток.

Температуру повітря вимірюють за допомогою трьох або більше термометрів, які розташовані з трьох сторін трансформатора приблизно на середині його висоти, на відстані 1÷2 м від охолоджувальної поверхні. Кожен термометр розташовують у наповнену трансформаторним маслом посудину об'ємом не менше 1 л, яка добре відбиває зовнішні теплові випромінювання.

3.2 Вимірювання ковзання машин змінного струму

Ковзання (s) є відносна різниця між частотою обертання магнітного поля статора (n_1) та механічною частотою обертання ротора (n) машини, яка подається у відносних одиницях або відсотках:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1}. \quad (3.3)$$

Оскільки величина ковзання в номінальному режимі для асинхронних двигунів (АД) загальнопромислового призначення змінюється від декількох сотих до тисячних одиниць, то метод безпосереднього вимірювання n за повною формулою (3.3) зумовить великі помилки, тому під час визначення ковзання необхідно вимірювати різницю величини $n_1 - n$ безпосередньо.

Відповідно до нормативів для вимірювання ковзання використовуються методи амперметра постійного струму, індуктивної котушки та стробоскопічний (*stroboscopic method*), а також частотні методи.

Метод амперметра постійного струму застосовується для асинхронних двигунів з фазним ротором. У коло статора вмикається магнітоелектричний амперметр із нулем у середині шкали. Оскільки частота струмів в обмотці ротора f_2 дорівнює $s \cdot f_1$, то визначивши кількість N повних коливань стрілки амперметра за час T , можна обчислити частоту струмів ротора $s \cdot f_1$ та величину ковзання

$$\left. \begin{aligned} f_2 &= \frac{N}{T} \\ s &= \frac{f_2}{f_1} = \frac{N}{f_1 \cdot T} \end{aligned} \right\}. \quad (3.3)$$

Метод індуктивної котушки засновано на вимірюванні частоти струмів ротора асинхронної машини. Оскільки безпосередньо увімкнути прилад в коло ротора не завжди вдається, багатовиткову котушку розташовують поблизу від лобової частини обмотки ротора таким чином, щоб потоки розсіювання ротора наводили в ній ЕРС (з частотою f_2).

Стробоскопічний метод засновано на вимірюванні різниці частот обертання ротора та магнітного поля машини з використанням стробоскопічних дисків. Як джерело випромінювання використовують безінерційні лампи (неонові або люмінесцентні) або лампу зі спалахом. Живлення лампи здійснюється з частотою мережі, від якої живиться

асинхронний двигун. Під час живлення синусоїдальною напругою тривалість горіння лампи протягом півперіоду відносно велика й зображення є нечітким. Тому потрібно подавати на лампу імпульсну напругу, для чого послідовно з лампою вмикається котушка з насиченим осердям та струмообмежувальний резистор.

На торці вала встановлюють диск із темними та світлими секторами, що чергуються. Кількість темних секторів дорівнює кількості світлих і відповідає кількості полюсів машини $2p$. Якщо освітлювати диск лампою, то за синхронної швидкості обертання ($n = n_1$) ротора, диск (зірка секторів) здається нерухомим у просторі. Для $n < n_1$ диск буде обертатись з різницею швидкостей $n_1 - n$ проти напрямку обертання ротора, а для $n > n_1$ – за напрямком обертання ротора.

Для великих електричних машин замість диску з секторами звичайно використовують торець вала або доступну для спостереження циліндричну частину вала. В останньому випадку сектори замінюють полюсами, що чергуються, різної яскравості, кількість яких також дорівнює $2p$.

Ковзання визначається за формулою:

$$s = \frac{p \cdot k}{t \cdot f_1}, \quad (3.5)$$

де p – кількість пар полюсів машини;

k – кількість повних обертів зірки секторів за час вимірювань t ;

t – час вимірювань, с.

За малих значень ковзання доцільно визначати не кількість повних обертів зірки секторів за час вимірювань T , а кількість k темних (світлих) сегментів, які пройшли повз нерухому точку за час t_1 . Тоді ковзання буде визначатися за формулою:

$$s = \frac{p \cdot k}{N \cdot t_1 \cdot f_1}, \quad (3.6)$$

де N – кількість темних (світлих) сегментів на диску.

Під час використання циліндричної частини вала розрахунки виконують за формулою (3.6).

У частотному методі вимірювання ковзання на валу ротора встановлюють диск з дірками, а на статорі – фотоелектричний пристрій (аналогічний фотоелектричному таходавачу), який зв'язаний з диском. Кількість дірок K в диску є такою, що за одне обертання ротора можна отримати 100 і більше імпульсів.

Під час обертання ротора зі швидкістю n (об/с) імпульси від

фотодавача підсумовуються, перемножуються на кількість пар полюсів p та подаються на перший лічильник (кількість імпульсів $N = n \cdot p \cdot K \cdot T$). У свою чергу, напруга, яка живить електричну машину, подається на формувач імпульсів (один імпульс за один період живильної напруги), потім імпульси підсумовуються та помножуються на кількість дірок в диску K у другому лічильнику (кількість імпульсів $N_1 = f \cdot K \cdot T$). Підсумування імпульсів по двох каналах – статора й ротора йде одночасно та через визначений час T (зазвичай декілька секунд) проводиться розрахунок ковзання за формулою:

$$s = \frac{N_1 - N}{N_1} = \frac{f \cdot K \cdot T - n \cdot p \cdot K \cdot T}{f \cdot K \cdot T} = \frac{f - n \cdot p}{f}. \quad (3.7)$$

3.3 Вимірювання рівня шуму та вібрації під час випробувань електричних машин і трансформаторів

Звукові хвилі являють собою повздовжні механічні хвилі, які розповсюджуються у вигляді коливань тиску. Під шумом розуміють нерегулярні коливання тиску з різними частотами. Реальні рівні шуму та вібрації, які створюються електричними машинами й трансформаторами, обмежені вимогами безпечного ведення робіт і фактором продуктивності праці.

В загальному шумі електричної машини можна виділити складові.

Аеродинамічний шум (aerodynamic noise) з'являється в результаті руху газоподібного охолоджувального середовища при обертанні різних деталей та вузлів електричної машини (ротор, вентилятор, колектор тощо). Чим сильніша турбулентність руху газу, тим вищий рівень шуму.

Шум вентиляторів (blower noise, fan noise) в основному залежить від його швидкості обертання. Так, у електричних машин зі швидкостями більше 60 м/с загальний рівень шуму визначається тільки аеродинамічним вихором вентилятора.

Магнітний шум (magnetic noise) з'являється внаслідок виникнення примусових коливань статора й ротора електричної машини під дією знакозмінних електромагнітних сил, які мають періодичний характер. Він в основному обумовлений радіальними силами, які пропорційні квадрату магнітної індукції у повітряному зазорі машини.

Шум підшипників (bearing noise) обумовлений небалансом та неточністю виготовлення елементів підшипників кочення. Інтенсивність шуму зростає зі збільшенням діаметра підшипника, швидкості обертання вала, сил одностороннього магнітного тяжіння та невірноваженості ротора.

Шум щіток (brush noise) виникає під час їхнього ковзання по

колектору та контактним кільцям і залежить від якості їх поверхонь, стану щіток та ступеня їх тиску на колектор та контактні кільця.

Шум, який створюється механічними факторами, виникає внаслідок розповсюдження вібрацій підшипників або внутрішніх частин машин на величину площі фундаментів або кожухів. Цей структурний шум перетворюється в аеродинамічний.

Шум трансформаторів обумовлений, головним чином, явищем магнітострикції (*magnetostriction*) (зміна форми та розмірів феромагнітного тіла, яке розташоване у змінному магнітному полі). До інших джерел шуму, які характерні для трансформаторів з форсованими системами охолодження, належать вентилятори й масляні насоси. Крім того, шум створюється електродинамічними зусиллями в обмотках та електромеханічними пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН). Рівень шуму трансформаторів значною мірою визначається величиною навантажень та габаритними розмірами.

Головною причиною шуму є вібрація (*vibration*) осердя, яка виникає внаслідок магнітострикції. Вібрація передається баку через масло й безпосередньо через кріплення магнітопроводу. У цілому можна сказати, що в трансформаторів переважає магнітний шум.

Осердя трансформаторів під дією магнітострикції деформуються. Магнітопроводи трансформаторів можуть потрапити в резонанс як з коливаннями, які викликаються магнітострикцією, так і з різними гармоніками сил, які виникають в осерді.

У трансформаторах важлива складова шуму генерується попередніми вібраціями листів магнітопроводу. Вібрації є наслідком різниці в довжині та товщині листів, з яких складається осердя, та різниці значень коефіцієнтів подовження листів пакета, що веде до зміни зазору з'єднань у функції миттєвих значень індукції. Ці відхилення викликають перерозподіл у часі магнітних потоків від одного листа до іншого і, таким чином, до поперечної вібрації листів.

Досвід показує, що поздовжні та поперечні вібрації листів сталі магнітопроводу є джерелом шуму приблизно однакової потужності. З цієї причини навіть при повному знищенні одного з джерел рівень шуму трансформатора не зменшиться більше ніж на 3 дБ. При зростанні індукції в трансформаторі з осердям з холоднокатаної сталі з 1,55 до 1,65 Тл рівень шуму зростає приблизно на 8 дБ.

Шум, який викликається електродинамічними зусиллями в обмотках трансформатора за його роботи з навантаженням, зазвичай малий. Однак характер та величина навантаження трансформатора впливають на індикацію в сталі і, таким чином, на рівень магнітного шуму.

Для вимірювання рівня акустичного тиску в газовому середовищі використовується апарат, який називається шумомір. Він складається з вимірювального мікрофона, підсилювача, коригуючих кіл, детектора та

індикатора, шкала якого проградуєвана в децибелах відносно граничного значення акустичного тиску. У шумомірах передбачається декілька часових характеристик, які дозволяють вимірювати стабільні, стаціонарні та імпульсні шуми.

За точністю вимірювання шумоміри поділяються на чотири класи: 0; 1; 2 і 3. Прилади класу 0 використовуються як зразковий засіб вимірювань, класу 1 – для точних лабораторних та натурних вимірювань, класу 2 – для вимірювання нормальної точності, класу 3 – для приблизних вимірювань. Шумоміри класів 0 та 1 мають стандартний діапазон частот $12,5 \text{ Гц} \div 20 \text{ кГц}$, класу 2 – $8 \text{ Гц} \div 20 \text{ кГц}$, класу 3 – $31,5 \text{ Гц} \div 8 \text{ кГц}$. Деякі шумоміри мають октавні та третиноктавні фільтри, які дозволяють більш краще аналізувати шум у потрібному частотному діапазоні. Динамічний діапазон рівня шуму складає: мінімальний – $15 \div 35$, максимальний – $140 \div 160 \text{ дБ}$.

У шумомірі використовується вимірювальний мікрофон ненаправленого типу з діапазоном частот від $31,5$ до 12500 Гц . Чутливість мікрофону не повинна змінюватись більше ніж на $\pm 0,5 \text{ дБ}$ під час зміни тиску навколишнього середовища на $\pm 10\%$.

У залежності від рівня та частоти шуму, а також від умов проведення вимірювань використовуються такі типи мікрофонів: конденсаторний, п'єзоелектричний та електродинамічний. Найбільше розповсюдження для вимірювання шуму (*audio measurement; noise measurement; noise-power measurement*) електричних машин отримали конденсаторні мікрофони, які мають високу чутливість та добру частотну характеристику до $10 \div 40 \text{ кГц}$. Крім того, мікрофони цього типу нечутливі до зовнішніх електромагнітних полів. Недоліком конденсаторних мікрофонів є відносно високий рівень власних шумів ($35 \div 50 \text{ дБ}$). Це, однак, є цілком допустимою величиною для більшості електричних машин, оскільки нижній допустимий рівень шуму електричних машин на відстані 1 м складає $49 \div 64 \text{ дБ}$. Для трансформаторів на відстані $0,3 \text{ м}$ допустимий рівень шуму складає $47 \div 66 \text{ дБ}$. Більшість шумомірів класу 1 мають конденсаторні мікрофони. Конденсаторний мікрофон для нормальної роботи потребує поляризації ємності від спеціального джерела живлення, яке вбудовується в шумомір, та використання передпідсилювача.

П'єзоелектричний мікрофон не потребує джерела поляризації для нормальної роботи й має значну ємність. Однак його чутливість нижче, ніж у конденсаторного мікрофона, у зв'язку з чим їх використовують у шумомірах класу 2.

Електродинамічні мікрофони використовують у шумомірах класу 2. Вони мають низький рівень власного шуму ($10 \div 15 \text{ дБ}$). Однак на їхню роботу сильно впливають зовнішні електромагнітні поля, що обмежує їх використання як давача шуму електричних машин та трансформаторів.

3.3.1 Вимірювання вібрації

Для цього використовуються практично ті самі прилади, що й для вимірювання шуму. Різниця полягає лише в давачі, а в деяких випадках у наявності інтегродиференційних кіл, які дозволяють визначити за ефективністю швидкості вібрації вібраційне прискорення або зсув. Отже, шумоміри можуть використовуватись як віброметри, якщо замість мікрофона як чутливий елемент застосовується вібродавач.

Різниця полягає в області частот, які вимірюються, оскільки під час вимірювання вібрацій достатньо виконати вимірювання в діапазоні від 5 до 1000 Гц.

При вимірюванні параметрів вібрації застосовуються кінематичний і динамічний принцип вимірювання. При використанні кінематичного принципу координати точок об'єкта, який досліджується, вимірюються відносно вибраної нерухомої системи координат. Динамічний принцип полягає у вимірюванні параметрів вібрації відносно штучної нерухомої системи відліку, у більшості випадків інерційного елемента.

Давачі вібрацій за способом вимірювання можна поділити на дві групи – контактні та безконтактні. Перевагою безконтактних давачів є можливість проведення вимірювань з високою точністю у важко-доступних місцях в умовах впливу зовнішніх електромагнітних полів. Як давачі використовуються оптичні, електромагнітні, електричні, радіохвильові, акустичні та радіаційні пристрої, які механічно не зв'язані з машиною, яка проходить випробування, і тому не вносять похибки в картину вібрацій. Однак при промислових випробуваннях використовують більш дешеві контактні давачі, маса яких незначна й тому їх використання практично не вносить похибки у вібраційний стан трансформаторів та електричних машин, які досліджуються.

Як контактні давачі вібрації отримали розповсюдження електродинамічні та п'єзоелектричні давачі, електричні сигнали на виходах яких пропорційні швидкості вібрації та вібраційному прискоренню, відповідно. Щоб точність вимірювань вібрацій була задовільною, маса давача не повинна перевищувати 5% від маси об'єкта, який вимірюється. Найбільш мініатюрними є п'єзоелектричні давачі (акселерометри), активний елемент яких виготовляється на основі п'єзокварцу, цирконато-титанових керамік або титанату барію.

Вибір матеріалу п'єзоелектричного давача визначається допустимою величиною температурної похибки. Використання цирконато-титанових керамік забезпечує роботу давача з похибкою $\pm 20\%$ в діапазоні $200 \div 250^\circ\text{C}$, при похибці $\pm 5\%$ температурний діапазон зменшується до $40 \div 60^\circ\text{C}$.

При використанні кварцу забезпечується похибка $\pm 2\%$ і діапазоні до 400°C . Для вимірювання вібрації в зоні температур нижче 100°C високу точність дає використання титанату цирконію або барію.

3.3.2 Методи вимірювання рівня шуму та вібрації електричних машин

За рівнем шуму електричні машини поділяються на чотири класи [4]:

а) 1 клас – машини, до яких не ставляться вимоги щодо обмеження рівня шуму, а також машини, які були розроблені до 1985 р. і доведення яких до класу 2 недоцільно;

б) 2 клас – машини експортного виконання та ті, що знову розробляються;

в) 3 клас – малошумні машини з малошумними підшипниками кочення та глушниками вентиляційного шуму;

г) 4 клас – особливо малошумні машини, в яких додатково передбачається знижене використання активних матеріалів та встановлення звукоізоляційного кожуха.

Граничне значення рівнів шуму машин класів 2, 3, 4 повинно бути нижче рівнів шуму машини класу 1 на 5, 10 та 15 дБ, відповідно.

Під час проведення контрольних випробувань приміщення вважається придатним для вимірювання шуму за методом вільного поля, якщо середній рівень звуку збільшується не менше ніж на 5 дБ при двократному зменшенні відстані r_1 від центра джерела до точок вимірювання шуму або середній рівень звуку зменшується не менше ніж на 4 дБ при збільшенні вказаної відстані у двічі. В ідеальному вільному полі без затухання зміна середнього рівня звуку L_2 при збільшенні відстані до $r_2 = 2r_1$ складає 6 дБ відповідно до виразу [4]:

$$L_2 = L_1 + 20 \lg \frac{r_1}{r_2}, \quad (3.8)$$

де L_1 – відоме значення рівня інтенсивності звуку на відстані r_1 від джерела.

Якщо підлога у випробувальному приміщенні має добре звукопоглинання (коефіцієнт звукопоглинання не менше 0,8), машину розташовують на висоті не менше 1 м над центром підлоги та не ближче 1,5 м від стелі. У випадку, коли підлога має звуковідбиття (коефіцієнт звукопоглинання не більше 0,05), машину розташовують на підлозі або безпосередньо над нею поблизу від її центра. Звуковідбивна підлога повинна виходити за вимірювальну поверхню так, щоб лінійні розміри звуковідбивної поверхні були більші проєкції вимірювальної поверхні, яка створена вимірювальними лініями (рисунок 3.1).

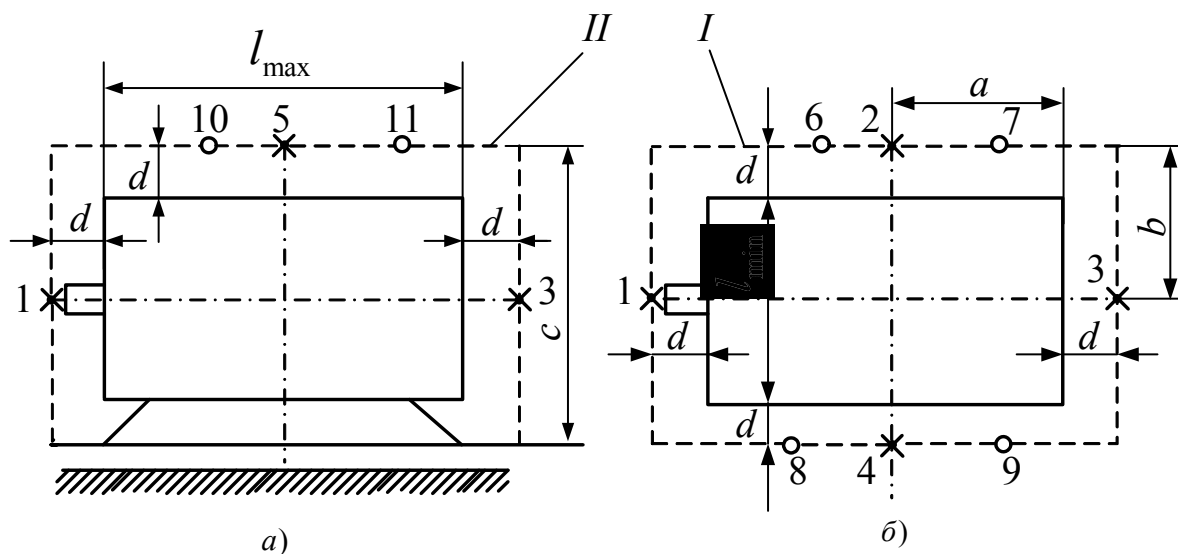


Рисунок 3.1 – Точки вимірювання шуму електричної машини, (а) вигляд спереду та (б) зверху

Під час вимірювань корпус шумоміра та інші прилади, а також спостерігач повинні знаходитись на відстані не менше 1 м від мікрофона.

Точки вимірювання вибирають на вимірювальних лініях I та II (дивись рисунок 3.1). При визначенні розмірів l_{\max} , l_{\min} та d не враховують вихідний кінець вала, коробку затискачів і інші деталі електричної машини, що виступають.

Для машин горизонтального виконання вимірювальна лінія I розташовується на висоті осі обертання машини, для машин вертикального виконання – на половині висоти машини, але не менше 0,25 м для звуковідбивної та 1 м для звукопоглинаючої підлоги. Вимірювальна лінія II в усіх випадках повинна знаходитись у вертикальній площині, яка проходить через вісь машини.

Під час контрольних випробувань вимірювання проводять у точках 1, 2, 3, 4, 5 для машин першої групи (з $l_{\max} < 1$ м, а також $1 \text{ м} < l_{\max} < 2 \text{ м}$ і $\frac{l_{\max}}{l_{\min}} < 2$) та в точках 1, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11 для машин другої групи (з

$l_{\max} \geq 2$ м, а також $1 \text{ м} < l_{\max} < 2 \text{ м}$ та $\frac{l_{\max}}{l_{\min}} > 2$).

ГОСТ 16372-93 регламентує допустимі рівні шуму електричних машин при вимірюванні на відстані 1 м від зовнішнього контура машини. Тому розмір d при вимірюваннях приймається рівним 1 м.

Після вимірювання рівнів шуму у вказаних точках обробляють результати вимірювань.

Еквівалентний радіус r_s для машин першої групи:

$$r_s = \frac{l_{\max}}{2} + d, \quad (3.9)$$

де $d = 1$ м.

Площа еквівалентної сфери та корегований рівень звукової потужності за шкалою А:

$$L_{PA} = L_A + 10 \lg S + K, \quad (3.10)$$

де L_A – вимірюваний середній рівень звуку за шкалою А, дБ;

K – постійний коефіцієнт ($K = 0$ для звуковідбивної підлоги та $K = 3$ для звукопоглинаючої підлоги);

$$S = 2\pi \cdot r_s^2. \quad (3.11)$$

Рівень звукової потужності в частотних полюсах:

$$L_p = L + 10 \lg S + K, \quad (3.12)$$

де L – вимірюваний рівень звукового тиску в частотній полосі, дБ.

Зведений рівень звуку за шкалою А на опорному радіусі 3 м:

$$L_{A3} = L_{PA} + 20 \lg r_s - 10. \quad (3.13)$$

Виміряні та розрахункові при випробуваннях величини зіставляються з вимогами за допустимим рівнем шуму.

При оцінюванні вібрації електричних машин основною величиною, яка вимірюється, є ефективне значення вібраційної швидкості $v_{\text{еф}}$, яке вимірюється в діапазоні від робочої частоти до 2000 Гц. Для електричних машин з робочою частотою обертання до 3000 об/хв. Допускається вимірювання $v_{\text{еф}}$ в діапазоні частот до 1000 Гц.

Визначення ефективного значення вібраційної швидкості допускається проводити за даними спектрального аналізу у вказаному діапазоні частот:

$$v_{\text{еф}} = \sqrt{\sum v_{\text{еф},i}^2}, \quad (3.14)$$

де $v_{\text{еф},i}$ – ефективне значення вібраційної швидкості, яке отримано під час спектрального аналізу i -ї полоси фільтра, причому перша та остання полоси повинні включати до себе нижню та верхню межі заданого

діапазону частот, відповідно.

Значення вібраційної швидкості виражають у мм/с, а вібраційного прискорення – у м²/с. Допускається оцінювати ці параметри в дБ.

Для оцінювання вібрації зібраних електричних машин встановлюється вісім класів: 0,28; 0,45; 0,70; 1,10; 1,80; 2,80; 4,50; 7,00. Індeksi класів відповідають максимально допустимій для даного класу ефективній вібраційній швидкості в мм/с.

При контролі вібрації електричних машин їх розташовують на пружній основі, причому додаткова маса пружної основи не повинна перевищувати 10% маси машини, яка проходить випробування.

Вібродавачі повинні жорстко кріпитися до машини або додаткової маси. При випробуваннях електрична машина повинна мати таке положення, як і при нормальній експлуатації.

Перешкоди від зовнішньої вібрації в прийнятих точках вимірювання не повинні перевищувати 25% від нормованої величини $v_{\text{эф.доп}}$, а при вимірюванні рівня вібрації в дБ – 8÷10 дБ, відповідно.

При періодичних та типових випробуваннях вібрацію необхідно вимірювати на підшипникових щитах по вертикальній та горизонтальній осях, а також у напрямку осі обертання, якомога ближче до останньої. Крім того, вимірюється вібрація на лапах або на фланці машини в напрямку, який перпендикулярний до опорної поверхні, у точках, які знаходяться поблизу місць кріплення.

Спектральний аналіз вібрації проводять у точці вимірювання з максимальним значенням вібрації. Контроль вібрації здійснюють при сталій частоті обертання в режимі, який встановлено стандартом на відповідні типи машин. Для багатьох швидкісних машин контроль проводиться за швидкістю, для якої вібрації максимальні.

3.3.3 Особливості вимірювання рівня шуму трансформаторів

Допустимі значення середнього рівня звуку та методи його вимірювання при промислових випробуваннях наведені в ГОСТ 12.2.024-76. Цей стандарт розповсюджується на силові масляні трансформатори загального призначення потужністю від 100 кВА й вище та напругою до 750 кВ включно. За замовленням споживача трансформатори повинні виготовлятися потужністю (16÷200) МВА з рівнем звуку, який нижче не менше ніж на 10 дБ при порівнянні з вказаними в стандарті.

Для проведення випробувань необхідно вибрати час доби, коли зовнішні шуми мінімальні. Можна також використовувати передові звукопоглинаючі стіни, які відіграють роль екранів, оскільки головною поверхнею трансформатора, яка випромінює шум, є вертикальна. Стіни встановлюють зі сторони, з якої проводяться вимірювання.

Під час вимірювань необхідно, щоб вібрації не передавались від трансформатора підлозі, а можливі акустичні поверхні відбиття

знаходились не ближче 3 м від точок вимірювання. При проведенні випробувань також необхідно запобігти впливу зовнішніх електромагнітних полів на результати вимірювань. Тому рекомендується використовувати конденсаторні мікрофони.

Вимірювання шуму трансформатора проводиться в режимі холостого ходу при номінальних напругах та частоті. Точки вимірювань розташовують навколо трансформатора на вимірювальних лініях, які лежать у горизонтальних площинах на відстані 0,3 м від умовної поверхні випромінювання. При висоті бака до 2,5 м вимірювальні лінії розташовуються на половині висоті, а при висоті бака 2,5 м і більше – на 1/3 або 2/3 висоті.

Відстань між сусідніми точками вимірювання не повинна перевищувати 1 м, а кількість точок вимірювання повинна бути не менше шести. Для трансформаторів із системою охолодження Д та ДЦ вимірювання проводяться два рази – при увімкненому та вимкненому дутті й у тій ж точці з максимальним рівнем звуку на вимірюваній відстані 2 м.

Після вимірювання рівнів шуму у вказаних точках обробляють результати вимірювань. Визначають середній рівень шуму

$$L'_A = L_A - \Delta L - K, \quad (3.15)$$

де L_A – виміряний середній рівень звуку за шкалою А, дБ;

ΔL – поправка, яка відповідає середньому рівню перешкоди, дБ;

K – постійна, яка враховує вплив відбиття звуку, дБ (при вимірюваннях на відкритих площах $K=0$, для інших випадків K визначається розрахунком).

Корегований рівень звукової потужності:

$$L_{PA} = L'_A + 10 \lg(S / S_0), \quad (3.16)$$

де L'_A – середній рівень шуму, дБ;

S – площа еквівалентної півсфери, м²;

$S_0 = 1$ м².

Площа еквівалентної півсфери:

- при відсутності дуття:

$$S_{0,3} = 1,25H \cdot l; \quad (3.17)$$

- при увімкненому дутті

$$S_{2,0} = 0,75 \cdot l^2 / \pi, \quad (3.18)$$

де H – висота бака, м;

l – довжина вимірюваної лінії по периметру для вимірюваних відстаней 0,3 і 2 м, м;

1,25 та $0,75/\pi$ – коефіцієнти, які враховують випромінювання звукової енергії в еквівалентну півсферу.

Виміряні та розраховані при випробуваннях величини зіставляються з вимогами за допустимими рівнями шуму, які наведені в ГОСТ 12.2.024-76.

Постійна K в приміщенні визначається так:

– визначають площу вибраної вимірної поверхні S за формулами (3.17) або (3.18);

– визначають площу поверхонь, які обмежують приміщення, S_v (m^2), включаючи підлогу;

– розраховують еквівалентну площу звукопоглинання A (m^2):

$$A = \alpha_s \cdot S_v, \quad (3.19)$$

де α_s – середній рівень звукопоглинання, який змінюється в залежності від типу приміщення, в якому проводяться вимірювання, від 0,05 (пусті приміщення з гладкими стінами з бетону або цегли) до 0,5 (приміщення, які облицьовані спеціальними звукопоглинаючими конструкціями);

– визначають постійну K :

$$K = 10 \lg [1 + 4S / A \cdot (1 - A / S_v)]. \quad (3.20)$$

Контрольні запитання

1. Характеристика методів вимірювання температури.
2. Особливості вимірювання температури обертових частин електричних машин.
3. Методи визначення частоти обертання.
4. Принцип дії стробоскопічного тахометра.
5. Методи вимірювання ковзання асинхронних машин.
6. Пристрої для вимірювання кутів навантаження синхронних машин.
7. Методи вимірювання механічного моменту.
8. Основні джерела шуму електричних машин та трансформаторів.
9. Типи мікрофонів для вимірювання шумів та їх принцип дії.
10. Вимоги до вимірювальних механізмів та давачів вібрації.
11. Діапазон частот при вимірюванні шумів та вібрацій.

4 ВИПРОБУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Експлуатаційні властивості трансформаторного масла визначаються його хімічним складом, який залежить, головним чином, від якості сировини та способів його очищення при виготовленні. Масло являє собою суміш достатньо складних органічних сполук. Під впливом електричних та магнітних полів, вологості й температури всередині та зовні високовольтного маслonaповненого обладнання, виникає розкладання початкових органічних сполук, які утримуються в трансформаторному маслі. Крім того, у масло переходять продукти розкладання твердої ізоляції та конструкційних матеріалів, які можуть вступати в нові взаємодії між собою, і прискорюють процес зносу ізоляції трансформаторів.

Оскільки в процесі експлуатації трансформаторів початковий склад трансформаторного масла (ТМ) та твердої ізоляції ускладнюється за складом та змінюється за конструкцією і агрегатним станом, потрібні докладні фізико-хімічні дослідження для оцінювання стану та виявлення дефектів електрообладнання. Досвід експлуатації трансформаторів вказує на те, що великий процент їх відмов виникає через пошкодження високовольтних вводів. Причиною цих пошкоджень може бути зменшення електричної міцності масла у високовольтних герметичних вводах викликане його колоїдним старінням, а в негерметичних вводах – зниження електричної міцності паперово-масляної ізоляції через її зволоження та забруднення.

4.1 Види випробувань трансформаторного масла

Стан ТМ оцінюється за результатами випробувань, які залежно від об'єму поділяються на три види:

- випробування на електричну міцність, які включають визначення пробивної напруги (*punch-through voltage, disruption voltage*), якісне визначення наявності води, візуальне визначення наявності механічних домішок;

- скорочений аналіз, який включає визначення кислотного числа (*acid number; acidity index; neutralization number*), наявність водорозчинних кислот, температури спалаху та кольору масла;

- випробування в об'ємі повного аналізу, який включає в себе всі випробування в об'ємі скороченого аналізу, а також визначення $\text{tg}\delta$, нагрової проби, стабільності проти окислення, кількісне визначення вологомісткості та механічних домішок.

Основною електроізоляційною характеристикою масла є його пробивна напруга. Практика показує, що розкид результатів при визначенні пробивної напруги масла виникає в основному через наявність в ньому механічних домішок – речовин, які знаходяться в ТМ у завислому стані або у вигляді осадів. Домішки (*impurity*) з'являються в результаті

зруйнування фарб, лаків та твердої ізоляції й збільшують значення $\text{tg}\delta$.

Цей показник характеризує активну потужність, яка виділяється в діелектрику при прикладанні до нього змінної напруги – діелектричні втрати, які обумовлені наявністю в маслі речовин з поляризованими молекулами (диполями) або з молекулами, які здатні розкладатися на іони під дією електричного поля.

Таблиця 4.1 – Норма кількісних показників якості експлуатаційного трансформаторного масла

Пробивна напруга масла в експлуатації, кВ, не менше:	
- для трансформаторів напругою (60÷220) кВ	35
- для трансформаторів напругою (20÷35) кВ	25
Наявність механічних домішок (візуально)	відсутні
Кислотне число, мг КОН на 1 г масла, не більше	0,25
Стабільність проти окислення:	
- наявність летких низькомолекулярних кислот, мг КОН на 1 г масла, не більше	0,005
- масова частка осаду після окислення, %	відсутня
- кислотне число окисленого масла, мг КОН на 1 г, не більше	0,1
Температура спалаху (<i>flash temperature</i>), °C, не нижче	150
$\text{tg}\delta$ при 90°C, %, не більше	7,0
Вологомісткість за масою	за заводськими нормами
Газомісткість	за заводськими нормами
Проба натру за ГОСТ 19296-73, бали, не більше	0,4
Температура застигання, °C, не вище	-45
В'язкість (<i>oil viscosity</i>) кінематична, $(\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-6}$, не більше:	
- при 20°C	28
- при 50°C	9
- при -30°C	1300

Через зволоження масла внаслідок безпосереднього контакту масла в трансформаторі з атмосферним повітрям знижується його електрична міцність (*dielectric strength*), а насичення киснем призводить до підсиленого розвитку процесів окислення (старіння) масла.

У результаті старіння створюється шлам, у склад якого входять розчинні та нерозчинні в маслі компоненти. Нерозчинні компоненти викликають небезпеку для роботи твердої ізоляції через їхню гігроскопічність та утворення ними провідних містків. Крім того, осади

погіршують охолодження трансформаторів, зменшуючи переріз каналів охолодження обмоток. При випробуваннях масла використовують як якісний, так і кількісний метод визначення вмісту механічних домішок та води.

При кількісному оцінюванні вмісту механічних домішок у маслі воно спочатку пропускається через попередньо зважений, сухий беззольний паперовий фільтр. Потім фільтр висушується та зважується, а різниця у вазі дає масу механічних домішок.

Важливою характеристикою ТМ є кислотне число, яке вимірюється кількістю їдкого натру (у міліграмах) необхідного для нейтралізації всіх вільних кислот у маслі. Кислі сполуки добуваються при нагріванні з масла розчином етилового спирту, а потім нейтралізуються їдким натром.

Кількість у маслі водорозчинних кислот, які є агресивними сполуками, викликає корозію металів та прискорює старіння твердої ізоляції. Визначення вмісту водорозчинних кислот та лугів базується на їхньому витяганні з масла водою або водним розчином спирту.

Температура спалаху – це температура, при якій пари масла, нагрітого в закритій посудині, створюють з повітрям суміш, яка спалахує при піднесенні до неї полум'я. При нормальній роботі трансформатора температура спалаху поступово зростає через випарування легких фракцій масла. При розвитку дефекту в трансформаторі температура спалаху масла різко знижується через розчинення в маслі газів, які створюються при його термічному розкладанні в місці дефекту. Зниження температури спалаху більше ніж на 5°C в порівнянні з попереднім визначенням вказує на наявність дефекту й у такому випадку потрібне комплексне обстеження трансформатора для виявлення причин цього зниження.

Якісне визначення вологомісткості в маслі здійснюють шляхом нагрівання масла до 130°C. Наявність вологи вважається встановленою, якщо при спіненні або без нього не менше двох разів чути тріск. Кількісне оцінювання розчиненої води базується на взаємодії з нею гідриду кальцію. Потрібно зауважити, що гідрид-кальцієвий метод визначення вологомісткості не дозволяє отримати достатньо відтворювані результати і, крім того, на виконання аналізу витрачається багато часу. Ці недоліки усуваються під час застосування кулонометричного методу, який заснований на взаємодії води з реактивом Фішера при пропусканні електричного струму через суміш цього реактиву з аналізованою пробой масла. Реактив Фішера отримують розчином йоду, діоксиду сірки й піридина в метанолі.

4.2 Визначення пробивної напруги масла при частоті 50 Гц

Методика випробування масла на електричну міцність передбачає порядок підготовки вимірювальної камери, проведення випробувань, оброблення результатів та оцінювання достовірності випробувань.

Випробування проби служить основою для перевірки відсутності шкідливих домішок у маслі.

Підготовка до випробування, відбір проб трансформаторного масла. Відбір проб масла або іншої ізолюючої рідини є відповідальною операцією. Трансформаторне масло й негорючі синтетичні рідини надзвичайно чутливі до забруднення сторонніми домішками. Тому необхідно дотримуватись особливих заходів застереження, інакше випробування проби може дати незадовільний результат.

Посудина для відбору проби повинна бути абсолютно чистою та сухою. Для відбирання проби рекомендується використовувати скляні банки з притертими пробками, на яких закріплюють етикетки з вказанням обладнання, дати й причини відбору, а також особи, яка відбирала пробу. Проба, як правило, береться з нижніх прошарків масла. Перед відбором проби зі зливного крана або пробки видаляється пил та бруд, потім кран (пробку) промивають шляхом зливу ($0,5 \div 3$) л масла в залежності від об'єму масла в апараті. Коли під кран неможливо безпосередньо поставити банку (а для обладнання напругою 220 кВ та вище у всіх випадках), проби відбирають через гнучкий чистий шланг, який надівають на кран.

При відбиранні проб банка двічі промивається маслом з трансформатора, а потім наповнюється ним до вузької частини горловини й закривається пробкою. У холодну пору року банку з маслом, яку принесли з вулиці в тепле приміщення, не відкривають протягом ($3 \div 4$) год, доки її температура не зрівняється з температурою приміщення для уникнення зволоження масла за рахунок утворення конденсату. Об'єм масла, який потрібний для випробування, складає 300 мл.

У трансформаторах з негорючою рідиною пробу відбирають з верхнього крану, тому що синтетичні рідини типу совтолу та інші мають щільність значно більше одиниці й волога в цих трансформаторах може знаходитись у верхніх прошарках рідини.

Випробування проби масла, оброблення результатів випробувань. Випробування виконують у вимірювальній камері (рисунок 4.1), яка складається з посудини 1, яка виготовляється з матеріалу, що не розчиняється в рідкому діелектрику та не впливає на нього (електроізоляційне скло, кварц, електроізоляційні пластмаси) та вмонтованих у ній латунних електродів 2.

Конструкція вимірювальної камери повинна забезпечувати можливість швидкого демонтажу електродів для їхнього чищення та полірування, а також точного юстирування зазору між електродами при повторному монтажі. Електроди повинні бути змонтовані так, щоб їх осі розташовувались на одній горизонтальній лінії в площині, яка паралельна нижній поверхні вимірювальної камери. Зазор між електродами повинен бути рівним 2,5 мм. Перевірка зазору здійснюється шаблоном (калібром): шаблон з номінальним зазором 2,45 мм повинен проходити між

електродами, а шаблон з номінальним розміром 2,55 мм – ні.

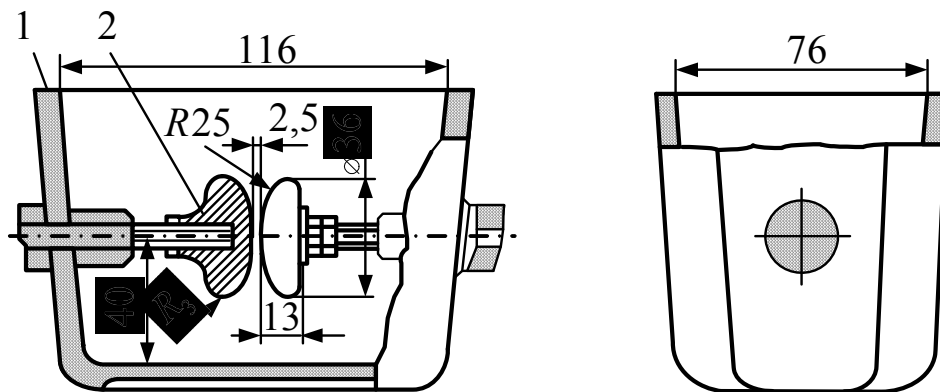


Рисунок 4.1 – Вимірювальна камера:
1 – ємність для масла; 2 – електрод

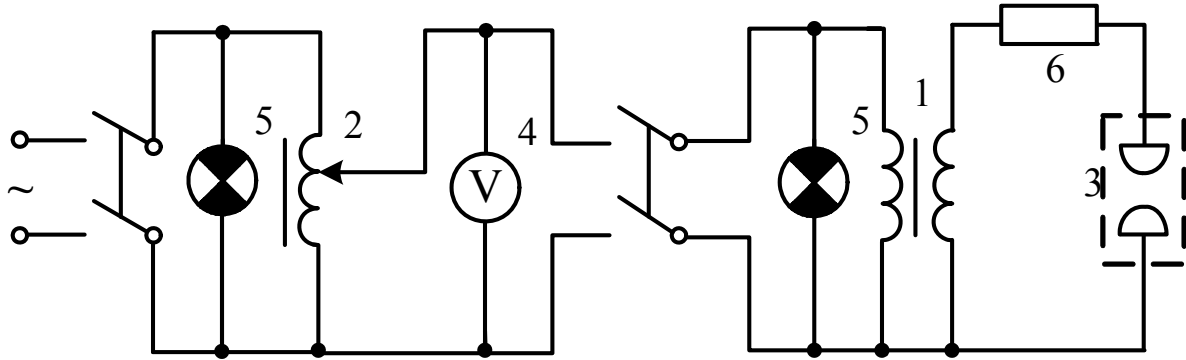
При використанні нової вимірювальної камери або після тривалого її зберігання, а також при зміні типу рідини, яка випробовується, камеру обробляють розчинником. Для промивки камери використовують послідовно гас та петролейний ефір з границями кипіння $(20 \div 120)^\circ\text{C}$. При використанні легкокиплячих розчинників у результаті швидкого випаровування електроди можуть охолонути й на їхній поверхні можлива поява вологи. У цьому випадку камеру необхідно трохи нагріти. Для періодичного чищення поверхні електродів потрібно використовувати полірувальні сполуки, сліди яких після полірування необхідно ретельно видаляти шляхом промивання вказаним розчинником.

Якщо поверхні електродів потемніли, їх необхідно зняти, відполірувати, промити розчинником і знову встановити. Після оброблення камеру обробляють маслом, яке випробовується, а потім заповнюють порцією масла. У випадку, якщо на установці щодня проводять випробування, а значення пробивної напруги не нижче встановлених норм, оброблення вимірювальної камери зводиться до її промиванням маслом, яке випробовується. У неробочому стані вимірювальну камеру зберігають заповненою маслом.

Визначення пробивної напруги повинно виконуватись на установці (рисунок 4.2), яка має потужність, достатню для того, щоб при пробії струм на стороні ВН був не менший 20 мА на всьому діапазоні випробування напруг, що використовуються, які перевищують 15 кВ. Трансформатор повинен бути вибраний таким чином, щоб пробивна напруга рідини складала не менше 15% від номінальної напруги на стороні ВН трансформатора.

Джерело живлення установки, трансформатор та регулювальний пристрій повинні забезпечувати напругу синусоїдальної форми при частоті (50 ± 5) Гц з коефіцієнтом амплітуди (відношення максимального значення

до діючого) у межах $(\sqrt{2} \pm 5)\%$. Для захисту установки й електродів струм КЗ обмежують шляхом послідовного вмикання резистора R, опір якого дорівнює $(0,2 \div 1,0)$ Ом на 1 В на стороні ВН випробного трансформатора.



1 – високовольтний випробний трансформатор; 2 – регулювальний трансформатор; 3 – вимірювальна камера; 4 – вольтметр; 5 – сигнальна лампа; 6 – захисний резистор

Рисунок 4.2 – Схема випробувальної установки

У первинне коло трансформатора встановлюється вимикач, який спрацьовує при пробі зразка. Час спрацювання не повинен перевищувати 0,02 с. Регулювальний пристрій повинен забезпечувати плавне збільшення напруги з постійною швидкістю, яка дорівнює $2 \text{ кВ/с} \pm 20\%$.

Для однієї проби робиться 6 пробів з інтервалами в 5 хв, що дозволяє забезпечити необхідну достовірність результатів випробувань. Перше випробування проводять через 10 хв після заповнення камери маслом. Після кожного пробію із зазору між електродами та з електродів за допомогою скляної трубки або пластинки з іншого матеріалу, який не пошкоджує поверхню електродів (наприклад, фторопласту-4), обережно видаляють частинки сажі, уникаючи появи бульбашок повітря в маслі.

Пробивна напруга $\bar{U}_{\text{пр}}$, кВ, визначається як середнє арифметичне шести дослідів:

$$\bar{U}_{\text{пр}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{\text{пр}i}, \quad (4.1)$$

де $U_{\text{пр}i}$ – значення напруги, яке отримано при послідовних пробоях, кВ;

$n = 6$ – кількість пробів.

Якщо $\bar{U}_{\text{пр}}$ більше нормованого значення, то знаходять середньоквадратичну помилку середньої пробивної напруги:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{\text{при}} - \bar{U}_{\text{пр}})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.2)$$

Значення $\bar{U}_{\text{пр}}$ повинно також відповідати нормованому значенню коефіцієнта варіації V :

$$V = \frac{100 \cdot \sigma_u}{\bar{U}_{\text{пр}}}, \quad (4.3)$$

Якщо $V > 20\%$, то ще раз заповнюють вимірювальну камеру порцією масла з тієї ж посудини й ще 6 разів визначають пробивну напругу, а при остаточних розрахунках за формулами (4.1)÷(4.3) приймають $n = 12$.

Якщо коефіцієнт варіації й на цей раз перевищує 20%, якість масла в трансформаторі вважається незадовільною й масло потрібно замінити.

4.3 Визначення тангенса кута діелектричних втрат

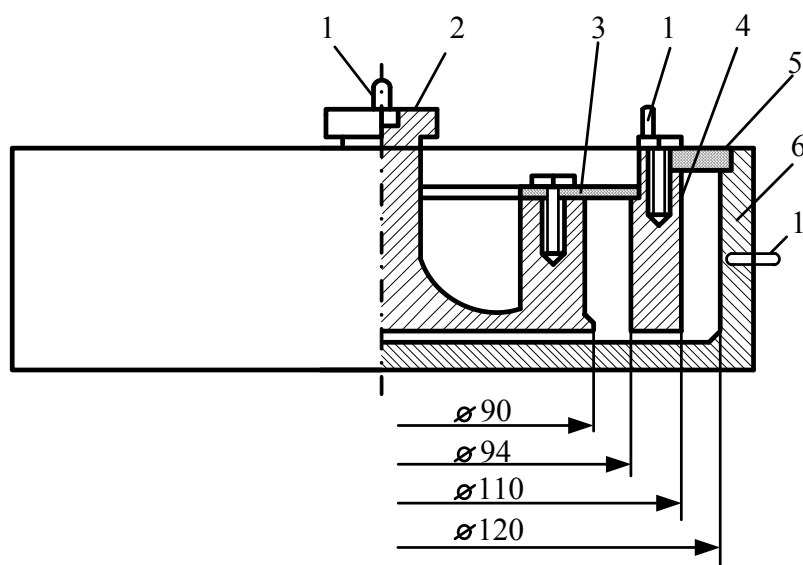
Для визначення $\text{tg} \delta$ (*dielectric loss angle; lose angle*) проводять два вимірювання, для яких використовують спеціальні камери. Конструкція камери повинна бути зручною для розбирання й ретельного чищення, а її електроди повинні зберігати початкове положення відносно один одного, щоб власна ємність камери не відрізнялась при чергових випробуваннях більше ніж на 35.

Матеріали, з яких виготовляють камери, повинні витримувати однакові температури, а зміна температури не повинна впливати на взаємне розташування електродів. Як твердий електроізоляційний матеріал використовують плавкий кварц, фторопласт або кераміку, яка відповідає вказаним вимогам.

Для виготовлення електродів використовуються метали, які стійкі до корозії, яка викликається рідиною, що випробовується, або сполукою для промивання, і не виявляє каталітичного впливу (окислення) на рідини, що випробовуються.

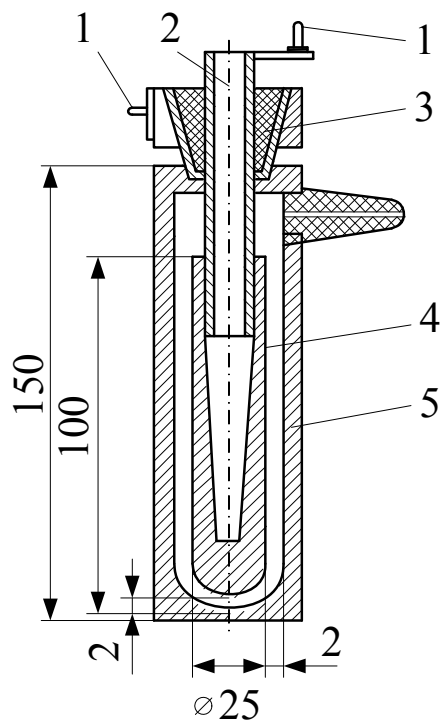
Вимірювальні камери мають різну конструкцію: плоскі або циліндричні, з двома або трьома затискачами. На рисунку 4.3 показана камера з трьома затискачами та плоскими електродами. Камера має три електроди: зовнішній високовольтний, внутрішній вимірювальний і проміжний охоронний. Зовнішній електрод одночасно служить оболонкою посудини, в яку заливається рідина, що випробовується. Для порівняння на рисунку 4.4 показана камера з двома затискачами. Такі камери

використовують при проведенні приймально-здавальних випробувань, вхідному й періодичному контролі. В інших випадках використовують камери з трьома затискачами.



- 1 – затискачі для з'єднання з вимірювальною схемою;
- 2 – вимірювальний електрод;
- 3 та 5 – провідники;
- 4 – захисний електрод;
- 6 – високовольтний електрод

Рисунок 4.3 – Плоска камера з трьома затискачами



- 1 – затискачі для з'єднання з вимірювальною схемою;
- 2 – отвір для термометра;
- 3 – прокладка з твердого електроізоляційного матеріалу;
- 4 – вимірювальний електрод;
- 5 – високовольтний електрод

Рисунок 4.4 – Вимірювальна камера з двома затискачами

Обов'язковими розмірами в конструкції камери є зазори між вимірювальними й високовольтними електродами та між вимірювальним і захисним електродами. Ці зазори повинні бути $(2 \pm 0,1)$ мм. Електроди камери повинні мати контактні затискачі, які забезпечують надійне з'єднання з елементами схеми. З'єднання з вимірювальним приладом виконують екранованим кабелем. При цьому захисний електрод камери з трьома затискачами повинен бути приєднаний до заземлення та до екрана кабелю, який з'єднує внутрішній (вимірювальний) електрод з вимірювальним приладом.

Установка для вимірювання $\text{tg} \delta$ складається з джерела (генератора) напруги, вимірювального пристрою та індикатора. Джерело забезпечує напругу практично синусоїдальної форми, коливання напруги – не більше 1%, зміна частоти – не більше 0,5%. Установка повинна забезпечувати вимірювання ємності від 20 до 1000 Ф з похибкою не більше $\pm 0,01$ Ф і $\text{tg} \delta$ від 0,0001 до 1 з похибкою не більше $\pm 5\%$.

Вимірювання $\text{tg} \delta$ здійснюють містком Віна – вимірювальним містком змінного струму, який призначений для вимірювання ємності та коефіцієнта втрат конденсаторів. Місток являє собою послідовне з'єднання об'єкта, який вимірюється (ємність C_x із втратами), зі схемою порівняння, яка копіює заступну схему цієї ємності, та паралельно з'єднаним з ними ділника напруги з двох активних опорів R_3 і R_4 (рисунок 4.5).

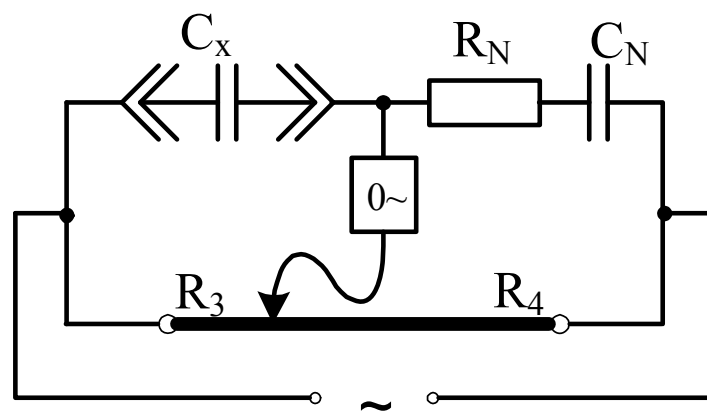


Рисунок 4.5 – Місток Віна (*Wien bridge*)

Відповідно до заступної схеми об'єкта, який вимірюється, схема порівняння являє собою послідовне коло зразкової ємності (*calibrating capacitor; reference capacitor; standard capacitor*) C_N з малими втратами та фазовирівнювальним опором R_N . Ємність та опір втрат конденсатора визначаються від частоти джерела:

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_N; R_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_N. \quad (4.4)$$

За відомої частоти ω джерела живлення отримують коефіцієнт втрат:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega \cdot C_N \cdot R_N. \quad (4.5)$$

Як нульовий індикатор використовують вібраційний гальванометр, селективний мікровольтметр або осцилограф.

Перед проведенням вимірювання камера повинна бути повністю демонтована й усі її деталі двічі ретельно промиті розчинником (при випробуванні нафтових масел використовують вуглеводневі розчинники, наприклад, толуол). Після промивання всі деталі ополіскують ацетоном, промивають мильним розчином або детергентом, кип'ятять в 5%-ному розчині фосфату натрію в дистильованій воді не менше 5 хв. Потім промивають деталі декілька разів і протягом 1 год кип'ятять у дистильованій воді. Для видалення вологи деталі камери висушують при температурі $(105 \div 110)^\circ\text{C}$ протягом $(60 \div 90)$ хв. Якщо після сушіння та охолодження камеру не використовують для вимірювання, її зберігають в ексикаторі із сухим повітрям.

Після сушіння деталі камери охолоджують до температури $(5 \div 7)^\circ\text{C}$ вище кімнатної та складають її, уникаючи дотику незахищеними руками до робочої поверхні електродів. Потім камеру приєднують до вимірювальної схеми, визначають ємність порожньої камери (C_0), а також її $\operatorname{tg} \delta_0$. Значення $\operatorname{tg} \delta_0$ при температурі $(15 \div 35)^\circ\text{C}$ для камери з трьома затискачами не повинно перевищувати 0,0001, а для камери з двома затискачами – 0,0003. На основі цих вимірювань оцінюють чистоту ізоляційних прокладок камери. При великих значеннях $\operatorname{tg} \delta_0$ камеру потрібно розібрати та знову промивати.

Підготовка до вимірювань. Якщо електрофізичні показники визначають у пробі, яка береться з трансформатора або в пробі, яка підготовлена для заповнення бака, її попереднє оброблення не проводять.

При випробуванні масла після транспортування або зберігання на складі визначають електрофізичні показники сухого масла, проводячи попередньо його сушіння. Для цього масло пропускають через фільтруючу лійку при температурі $(60 \div 80)^\circ\text{C}$ та при надлишковому тиску $(1333 \div 2666)$ Па $(10 \div 20)$ мм рт. ст.) з наступною витримкою при таких умовах у тонкому $(5 \div 10)$ мм шарі протягом 50 хв.

Перед проведенням першого вимірювання камеру спочатку заповнюють маслом, яке випробовується, і, не проводячи вимірювання, рідину виливають. Потім знову заповнюють камеру до рівня $(3 \div 5)$ мм вище нижнього краю захисного електрода (дивись рисунок 4.3),

розташовують її в попередньо нагрітій температурі випробування термостат, приєднують до електричної схеми та після досягнення камерою заданої температури проводять вимірювання. Для вимірювань при кімнатній температурі термостат не використовують. Відлік значення $\operatorname{tg} \delta$ проводять не більше ніж через 3 хв після увімкнення напруги.

При проведенні другого вимірювання чисту зібрану камеру нагрівають до температури, яка на $(5 \div 10)^\circ\text{C}$ перевищує задану температуру вимірювання, заповнюють порцією нагрітої рідини та виливають її. Камеру знову заповнюють порцією нагрітої рідини та витримують 20 хв. при заданій температурі, після чого визначають $\operatorname{tg} \delta$. Кожне з двох вимірювань краще проводити у своїй окремій камері.

Оброблення результатів вимірювань. Розходження між результатами двох вимірювань $\operatorname{tg} \delta$ не повинно перевищувати 15% від значення більшого результату плюс 0,0002. Якщо розходження між результатами вимірювань перевищують вказані межі, то продовжують вимірювання на нових порціях діелектрика доки не отримають задовільні розходження. Розрахунок значень $\operatorname{tg} \delta$ проводиться за такими формулами:

- при проведенні вимірювань у камері з трьома затискачами:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_1 - \frac{C_0}{C_1} \cdot \operatorname{tg} \delta_0; \quad (4.6)$$

- при проведенні вимірювань у камері з двома затискачами:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{C_1}{C_1 - C_{\Pi}} \cdot \left(\operatorname{tg} \delta_1 - \frac{C_0}{C_1} \cdot \operatorname{tg} \delta_0 \right) \\ C_{\Pi} &= \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\kappa} - C_{\kappa}}{\varepsilon_{\kappa} - 1} \end{aligned} \right\}, \quad (4.7)$$

де $C_0, \operatorname{tg} \delta_0$ – відповідно ємність (Ф) та $\operatorname{tg} \delta$ пустої вимірювальної камери;

$C_1, \operatorname{tg} \delta_1$ – відповідно ємність (Ф) та $\operatorname{tg} \delta$ вимірювальної камери, яка заповнена маслом, яке випробовується;

C_{Π} – паразитна ємність камери (обумовлена наявністю твердих електроізоляційних прокладок, пустот, ємності проводів тощо), Ф;

C_{κ} – ємність вимірювальної камери, як заповнена рідиною з відомим значенням діелектричної проникності ε_{κ} (калібровочною рідиною) та з $\operatorname{tg} \delta_{\kappa} < 0,01$.

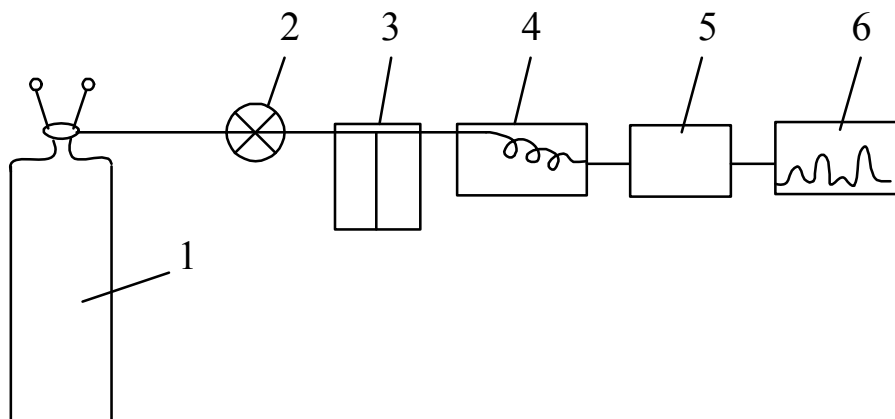
За результат вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ приймають менше з двох значень, які

отримали в дослідях.

4.4 Фізико-хімічне оцінювання стану трансформаторного масла

Аналіз розчинених у маслі газів дозволяє визначити внутрішні дефекти в трансформаторі. Для визначення якісного та кількісного утримання в маслі газів і води широко використовують хроматографічний метод.

Основними елементами газохроматографічної (*gas chromatography*) установки (рисунок 4.6) є джерело стисненого газу, колонка з нерухомою фазою (для розділення газів, що визначаються) прилади та обладнання для оброблення результатів дослідів. Для виконання основної функції – перенесення речовини через газохроматографічну колонку 4 служить інертний газ, як правило, гелій. Колонка являє собою трубку малого діаметра, яка заповнена сорбентом, в яку при відкритті вентилі газ-носії доставляє пробу.



1 – джерело газоносія; 2 – витратомір; 3 – пристрій для введення проби (випаровувач); 4 – колонка; 5 – детектор; 6 – реєстратор

Рисунок 4.6 – Схема газохроматографічної установки

Проба для аналізу вводиться через випаровувач 3, який являє собою окрему камеру з власним нагрівом, яка розташована безпосередньо перед колонкою, а може бути початком самої колонки. Рідинні проби, звичайно, вводять через окрему камеру, яка має мінімальний об'єм для миттєвого випаровування й введення її в колонку. Іншим способом введення проби є механічний, при якому пробу вводять шприцом або петлею (газовий пробовідбірник).

Детектор 5 (зазвичай диференційного типу) реагує на зміну складу газової суміші, яка проходить через нього. Електричний сигнал, який надходить з детектора, повідомляє про зміну складу газової суміші. У результаті на стрічці реєстратора 6 з'являється крива, яка має серію піків. В ідеалі кожний пік має форму кривої розподілення Гауса та відповідає появі в детекторі певної речовини. Отже, визначається якісний склад

газової суміші (проби).

Кількісний склад зазвичай отримують за допомогою реєстратора з дисковим інтегратором або цифрового інтегратора. Для проведення розрахунків на хроматографах визначають висоту або площу піка. Метод вимірювання висоти піка й два можливих способи вимірювання його площі показані на рисунку 4.7.

Результати вимірювань необхідно порівняти з концентрацією речовини в пробі. Для цього проводять калібрування (нормалізацію площі) – зведення параметрів аналізу до нормальних умов, після чого перераховують висоту або площу піків. Серед методів хроматографічного аналізу найбільш широке розповсюдження має метод, в основі якого покладено принцип аналізу рівноважної газової фази і який дозволяє швидко й точно провести градування хроматографа.

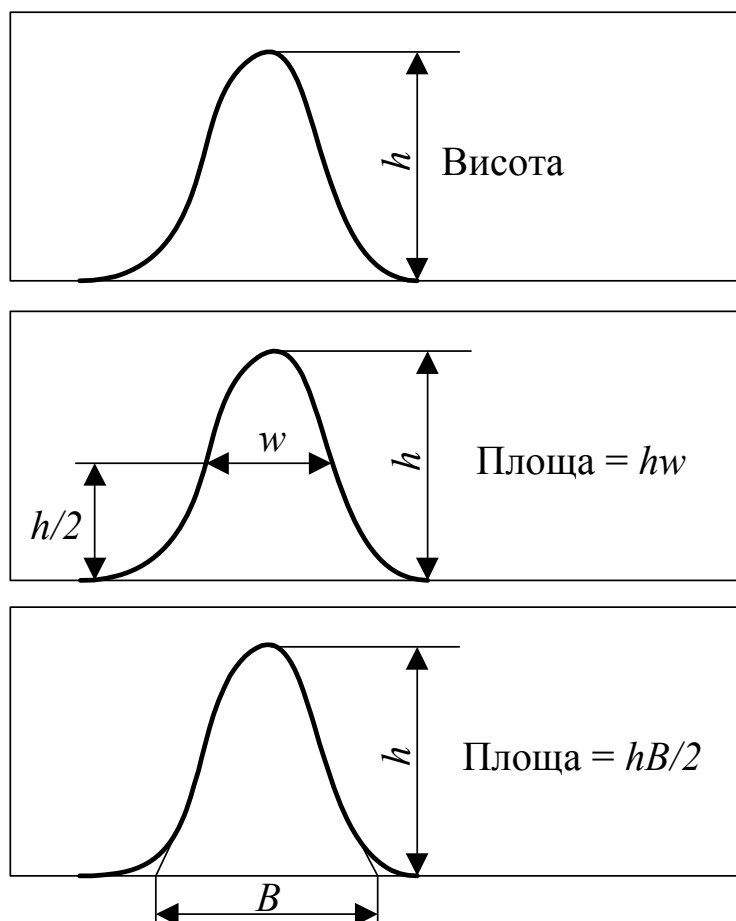


Рисунок 4.7 – Визначення вмісту газу в маслі

При використанні цього методу пробу масла спочатку вводять у замкнену ємність (термостатований медичний шприц) об'ємом (50÷100) мл, частину якої заповнюють газом-носієм. Потім для встановлення рівноважного стану між газоподібною та рідинною фазами

безперервно розмішують масло протягом (5÷10) хв, після чого проводять аналіз суміші на хроматографічній установці.

За результатами декількох вимірювань будують графік залежності висоти (або площі) піка від кількості речовини. Концентрацію кожного газу в пробі визначають за отриманим значенням висоти (або площі) піка з використанням калібровочного графіка.

У сучасних хроматографах замість ручного оброблення результатів аналізу використовують різні програми їх машинного оброблення на ЕОМ, які можуть поставлятись сумісно з хроматографом.

Контрольні запитання

1. Види випробувань трансформаторного масла.
2. Параметри трансформаторного масла та контроль за ними під час випробувань.
3. Вплив параметрів трансформаторного масла на роботу трансформатора.
4. Процес відбору проби масла для випробувань.
5. Визначення пробивної напруги масла.
6. Вимоги до установок з визначення $\text{tg}\delta$ масла.
7. Визначення якісного складу розчинених у маслі газів.
8. Норми кількісних показників якості трансформаторного масла.
9. Будова камери для визначення $\text{tg}\delta$ трансформаторного масла.
10. Вимірювання $\text{tg}\delta$ масла за допомогою містка Віна.
11. Основні етапи обробки результатів вимірювання $\text{tg}\delta$.
12. Призначення компонентів газохроматографічної установки для оцінювання фізико-хімічного стану трансформаторного масла.
13. Визначення вмісту газу в маслі.

5 ВИДИ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА ТРАНСФОРМАТОРІВ

Електричні машини й трансформатори під навантаженням випробовують на нагрів, надійність, а також для визначення їх енергетичних характеристик, при настроюванні комутації та її перевірці в машинах постійного струму й колекторних машинах змінного струму. При випробуваннях використовуються методи безпосереднього або непрямого навантаження. При методі безпосереднього навантаження випробування проводяться в номінальному режимі роботи, який не відрізняється від роботи в реальних умовах. Метод безпосереднього навантаження реалізовується трьома способами: без видачі та з видачею енергії в мережу, а також шляхом взаємного навантаження.

5.1 Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів без видачі енергії в мережу

Як навантаження трансформаторів і електричних машин, що працюють у режимі генератора, використовуються дрові, рідинні або лампові навантажувальні реостати. У цьому випадку вся електрична енергія, яку вони віддають, поглинається в навантажувальних реостатах. Регулювання навантаження здійснюється шляхом зміни опору навантаження реостатів або шляхом напруги генераторів. Випробування в цьому режимі проводяться або для генераторів і трансформаторів невеликої потужності (до 10 кВ·А), або для генераторів спеціальних типів, які не можуть працювати сумісно з електричними двигунами. Навантаження трансформаторів з масляним охолодженням може бути здійснюватись й у режимі КЗ так, щоб втрати в його обмотках дорівнювали сумі номінальних втрат короткого замикання та холостого ходу. Навантажувальні реостати можуть бути регульованими або нерегульованими. Недоцільно використовувати рідинні реостати на постійному струмі через електроліз рідини, осідання на контактах продуктів електролізу та пошкодження поверхонь. Індуктивне навантаження можна забезпечити за допомогою регульовальних реакторів або машин змінного струму, які працюють у режимі холостого ходу. У залежності від потужності навантаження використовується природне повітряне, форсоване повітря або рідинне охолодження навантажувальних пристроїв.

Навантаження електричних машин, які працюють у режимі двигуна, здійснюється за допомогою гальм рідинного типу.

5.2 Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів з видачею енергії в мережу

Реалізація цього методу вимагає, як правило, багатократного перетворення енергії й складного комплексу випробувального обладнання. Тому його використання економічно доцільно при випробуванні електричних машин середньої та великої потужності.

Розглянемо використання цього методу для електричних машин різного типу.

Машини постійного струму. При випробуваннях двигуна постійного струму його живлення здійснюється або від мережі постійного струму, або від керованого випрямляча. Навантаженням випробувального двигуна ВД (рисунок 5.1, а) є електромашинне гальмо, яке використовується як генератор постійного струму з незалежним збудженням ГПС. До ГПС під'єднується якір (*armature*) двигуна постійного струму з подальшим збудженням ДПС за схемою “генератор-двигун”, при використанні якої частота обертання n_2 ДПС підтримується постійною при зміні частоти обертання n_1 ВД у широкому діапазоні. ДПС призводить до обертання синхронний генератор СГ, який віддає частину спожитої при випробуваннях енергії в мережу. Регулювання навантаження двигуна ВД здійснюється збільшенням струму збудження генератора ГПС, що призводить до збільшення моменту ДПС та потужності СГ, яка віддається в мережу.

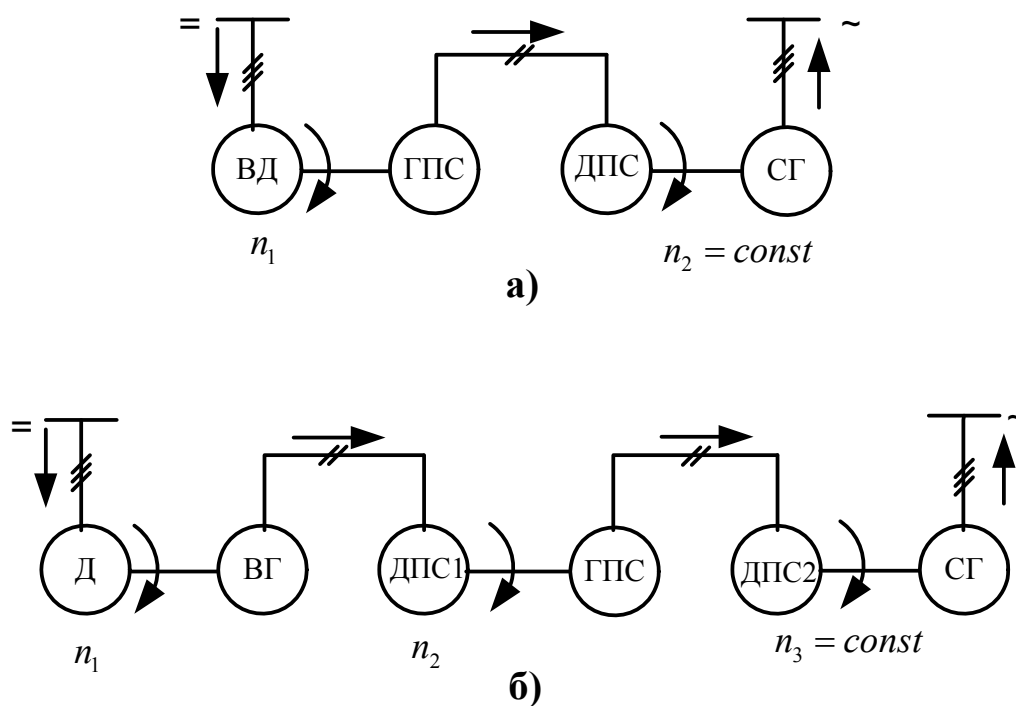


Рисунок 5.1 – Принципова схема випробування під навантаженням електричних машин постійного струму:

а – двигуна; б – генератора

При випробовуваннях під навантаженням випробувальний генератор постійного струму ВГ (рисунк 5.1, б) приводиться в обертання з частотою n_1 двигуном Д (асинхронним при $n = \text{const}$ або постійного струму при необхідності зміни n_1 відповідно до паспортних даних генератора ВГ). Як навантаження ВГ використовується двигун постійного струму ДПС₁, енергія якого після потрібного перетворення в машинах постійного струму (генераторі ГПС і двигуні ДПС₂) і синхронному генераторі СГ віддається в мережу змінного струму. Використання генератора ГПС і двигуна ДПС₂, з'єднаних за схемою “генератор-двигун”, викликаний необхідністю стабілізації частоти обертання n_3 синхронного генератора СГ. На рисунку 5.1 стрілками вказано напрямки активної потужності, яка перетворюється електричними машинами.

У багатьох випадках для спрощення схем випробування машин постійного струму з поверненням енергії в мережу замість механічно зв'язаного двигуна постійного струму та синхронного генератора використовують статичний перетворювач постійного струму в змінний потрібної частоти (інвертор), вхід якого під'єднаний до генератора ГПС, а вихід – до мережі. Регулювання потужності в цьому випадку здійснюється за рахунок зміни тривалості провідного стану перетворювача.

Синхронні машини. Випробуваний синхронний двигун ВД (рисунк 5.2, а) живиться від мережі змінного струму (у випадку необхідності регулювання напруги двигуна з'єднується з мережею через автотрансформатор або індукційний регулятор) та приводить до обертання навантажувальний генератор постійного струму ГПС, якорь якого з'єднаний з якорем двигуна постійного струму ДПС (схема “генератор-двигун”), швидкість якого підтримується постійною.

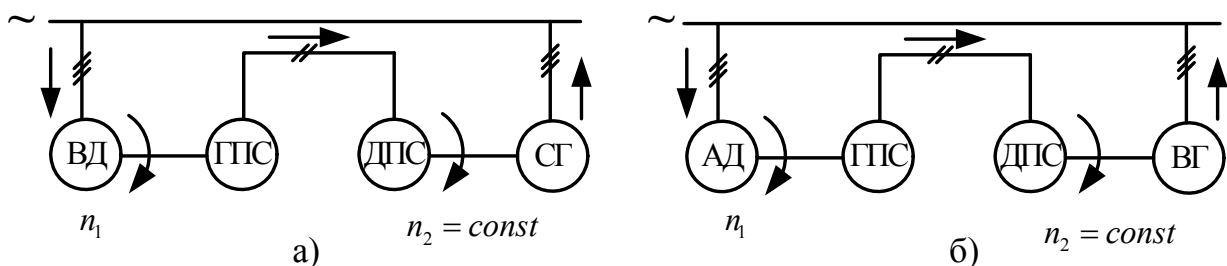


Рисунок 5.2 – Принципова схема випробування під навантаженням синхронних електричних машин
а – двигуна; б – генератора

Двигун ДПС механічно зв'язаний із синхронним генератором, який віддає енергію в мережу. Зауважимо, що навантажувальний генератор ГПС

під час запуску синхронного двигуна ВД, може використовуватись як розгінний двигун, який отримує живлення від мережі постійного струму. У цьому випадку може бути забезпечена точна синхронізація випробуваного синхронного двигуна з мережею без кидків струму.

Під випробуванням під навантаженням випробуваний синхронний генератор ВГ (рисунок 5.2, б) приводиться до обертання з незмінною частотою $n_2 = \text{const}$ двигуном постійного струму ДПС і працює паралельно з мережею. Двигун ДПС, як правило, приєднується до генератора постійного струму ГПС, який обертається синхронним двигуном АД. Навантаження генератора ВГ регулюється шляхом зміни моменту на валу двигуна ДПС.

Для узгодження напруги синхронного генератора та мережі в схему стенда може бути при необхідності введений автотрансформатор або трансформатор відповідної потужності. При наявності на випробувальній станції окремої регульовальної мережі постійного струму живлення двигуна ДПС здійснюється безпосередньо від цієї мережі, що дозволяє суттєво скоротити комплект електрообладнання для випробувань.

При використанні схеми, яка наведена на рисунку 5.2, збудження машини постійного струму ГПС і ДПС, які створюють систему “генератор-двигун”, здійснюється від джерела постійного струму, тобто машини ГПС і ДПС мають незалежне збудження.

Асинхронні машини. Випробування асинхронного двигуна ВД під навантаженням (випробування асинхронного генератора не розглядається, оскільки їх використання обмежене) проводяться аналогічно випробуванням синхронного двигуна за схемою рисунка 5.2, а. Для узгодження напруги мережі з напругою випробуваного двигуна й синхронного генератора використовуються трансформатори або автотрансформатори. У випадку нестандартної напруги двигуна використовують також індукційні регулятори.

У практиці випробувань широке розповсюдження отримали навантажувальні стенди, які використовують балансувальну машину постійного струму. Такі стенди отримали назву динамометричних гальм постійного струму та призначаються для вимірювання статичних моментів як у двигунному, так і генераторному режимах роботи випробуваної машини.

При роботі балансірної машини постійного струму БМ (рисунок 5.3) в режимі генератора (випробувана машина ВМ – двигун) як її навантаження використовується машина постійного струму МПС, яка призводить до обертання асинхронну машину АМ, що працює в режимі генератора, і збудник постійного струму З. Регулювання потужності або моменту на валу випробуваного двигуна здійснюється зміною частоти обертання асинхронного генератора за допомогою машини постійного струму. При роботі в режимі двигуна (випробувана машина-генератор)

балансирна машина БМ отримує живлення від машини постійного струму МПС, яка приводиться до обертання сумісно зі збудником 3 асинхронною машиною АМ, яка працює в режимі двигуна.

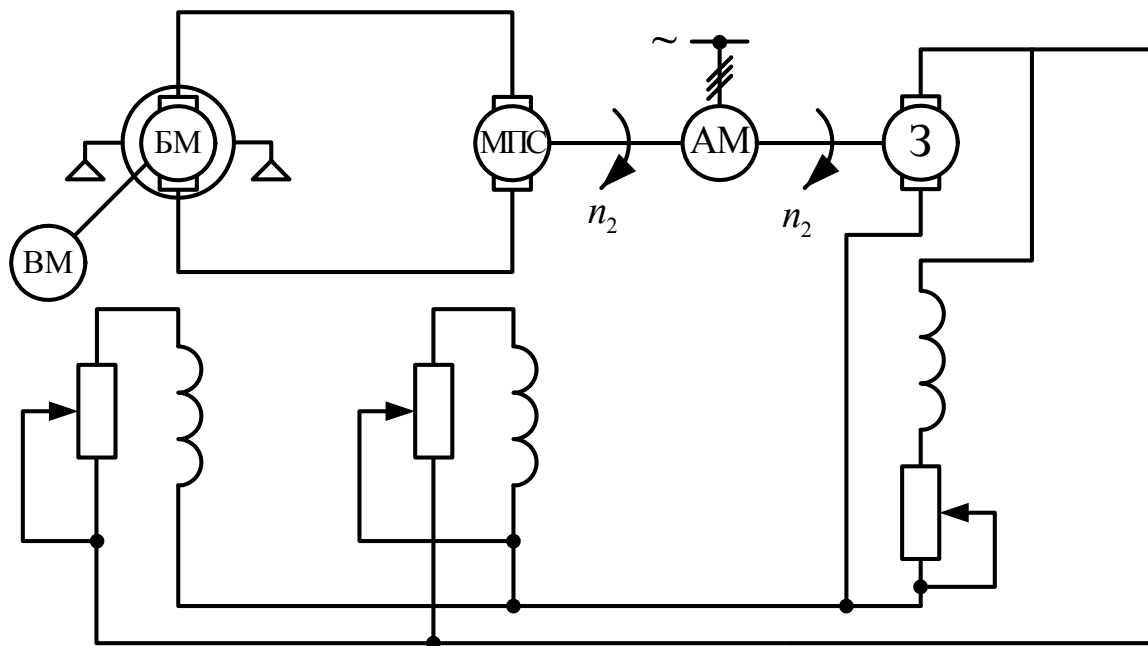


Рисунок 5.3 – Принципова схема навантажувального стенда з використанням балансирної машини (БМ) постійного струму

5.3 Метод взаємного навантаження електричних машин і трансформаторів

При випробуваннях за цим методом дві однакові електричні машини з'єднуються між собою механічно та електрично й під'єднується до зовнішнього джерела енергії. Одна з машин працює в режимі генератора й віддає вироблену електричну енергію іншій машині, яка працює в режимі двигуна й витрачає всю свою механічну енергію на обертання першої машини. При взаємному навантаженні двох однакових трансформаторів вони вмикаються паралельно, а їх первинні обмотки з'єднуються із загальним джерелом живлення або мережею.

Витрати енергії при випробуваннях визначаються сумарними втратами в обох випробуваних машинах або трансформаторах. Компенсація цих втрат здійснюється від зовнішнього джерела електричної або механічної енергії, або від обох джерел одночасно. Якщо врахувати, що ККД електричних машин середньої та великої потужності складає 90% і більше, а трансформаторів – вище 95%, то виявляється, що за допомогою обмеженого джерела потужності (10÷20% від потужності однієї випробуваної машини або трансформатора) можна випробувати дві крупні електричні машини або два трансформатори одночасно. Різке зменшення

витрат енергії при випробуваннях є важливою перевагою методу взаємного навантаження.

При випробуваннях машин змінного струму використовуються три способи введення в контур випробовуваної машини енергії, необхідної для компенсації витрат: паралельне й послідовне увімкнення джерела електричної енергії, а також під'єднання механічного джерела енергії.

При використанні способу паралельного увімкнення джерела електричної енергії обидві машини – двигун ВД і генератор ВГ (рисунок 5.4, а) з'єднуються одна з одною механічно й до них підводиться живлення від генератора постійного струму ГПС потрібної напруги, який обертається за допомогою двигуна Д. Кола збудження всіх трьох машин постійного струму вмикаються незалежно від якірних кіл і на рисунку 5.4 не показані.

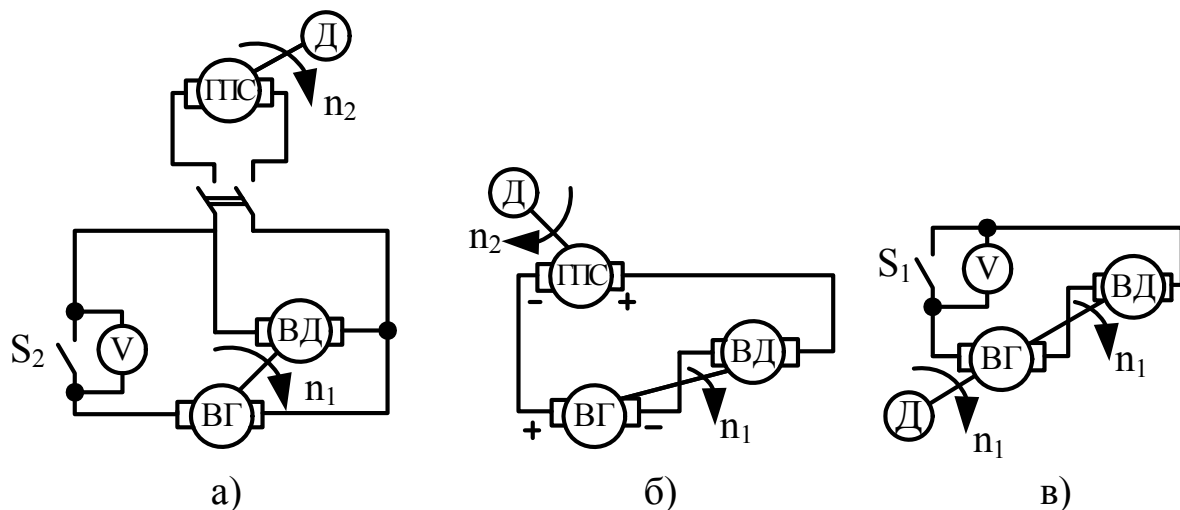


Рисунок 5.4 – Принципова схема випробувань електричних машин постійного струму за методом взаємної індукції (*mutual induction method*): а – при паралельному ввімкненні джерела електричної енергії; б – при послідовному ввімкненні; у – під час увімкнення механічного джерела енергії

Після вмикання рубильника S_1 здійснюється пуск збудженого двигуна ВД за допомогою пускового реостату або шляхом плавного збільшення напруги на виході генератора постійного струму ГПС. Після досягнення заданої частоти обертання n_1 збуджують випробуваний генератор ВГ до номінальної напруги, яка відповідає напрузі генератора ГПС. Контроль за виконанням цієї умови здійснюється за допомогою вольтметра, який вмикається на затискачі рубильника S_2 . Після вирівнювання напруг (показники вольтметра при цьому дорівнюють нулю) рубильник S_2 замикається й генератор ВГ вмикається паралельно генератору ГПС.

Навантаження випробуваних машин здійснюється шляхом підвищення збудження генератора ВГ та послаблення збудження двигуна ВД. Для підтримки заданого рівня напруги живлення одночасно необхідно регулювати збудження генератора ГПС. При паралельному увімкненні джерела живлення напруга випробуваної машини однакова й з балансу їх потужностей отримуємо:

$$\frac{U \cdot i_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}} = U \cdot i_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{д}}, \quad (5.1)$$

де $i_{\Gamma}, i_{\text{д}}$ – струм у колах якорів генератора та двигуна;

$\eta_{\Gamma}, \eta_{\text{д}}$ – ККД генератора та двигуна.

З цього виразу витікає, що відношення струмів у колах якорів двигуна та генератора більше одиниці та зворотно пропорційне добутку ККД цих машин, тому при номінальному навантаженні двигуна генератор виявляється недовантаженим, а при номінальному навантаженні генератора двигун перевантажується.

При використанні способу послідовного увімкнення джерела живлення якоря допоміжного генератора постійного струму ГПС та випробуваних машин ВГ і ВД з'єднується послідовно в замкнений контур (рисунк 5.4, б).

У колах обмоток збудження встановлюється таке значення струму, якому в режимі холостого ходу відповідає номінальна напруга $U_{\text{н}}$. Потім від двигуна з частотою обертання n_2 приводиться в рух генератор ГПС і за рахунок плавного збільшення його напруги здійснюється розгін випробуваних машин до номінальної частоти обертання n_1 . Після цього збільшують напругу машини, яка призначена до випробувань у режимі генератора, і зменшують напругу машини, яка призначена до випробувань у режимі двигуна, встановлюючи струм якорів ВД, ВГ і ГПС рівним номінальному $i_{\text{н}}$ або будь-якому потрібному значенню струму.

Оскільки збудження всіх трьох машин вважається незалежним, номінальна напруга допоміжного генератора ГПС має вигляд:

$$U_{\text{ГПС}} \geq (1 - \eta_{\Gamma} \cdot \eta_{\text{д}}) \cdot U_{\text{н}} \approx \frac{\Sigma P}{i_{\text{н}}}, \quad (5.2)$$

де ΣP – сумарні витрати в схемі без урахування витрат на збудження, оскільки збудження усіх трьох машин вважається незалежним.

На підставі другого закону Кірхгофа можна записати:

$$E_d = E_r + U_{ГПС} - i(\Sigma r_r + \Sigma r_d), \quad (5.3)$$

де E_d, E_r – ЕРС випробуваних двигуна і генератора, В;

$\Sigma r_r, \Sigma r_d$ – сумарні активні опори якірних кіл генератора й двигуна, Ом.

Оскільки $U_{ГПС}$ перевищує величину $i(\Sigma r_r + \Sigma r_d)$, при номінальному навантаженні генератора ВГ двигун ВД буде перевантажений, а при номінальному навантаженні двигун генератор виявляється недозбудженим.

При використанні *способу під'єднання механічного джерела енергії* машини ВГ і ВД, що випробовуються, механічно з'єднуються з допоміжним двигуном Д, за допомогою якого вони приводяться до обертання з номінальною частотою n_1 (рисунк 5.4, в), після чого вони збуджуються до номінальної напруги. Потужність допоміжного двигуна повинна бути не менша сумарних втрат обох машин, що випробовуються. Обмотки збудження машин під'єднується до незалежного джерела живлення.

Правильність полярності машин перевіряється за вольтметром, який вмикається на затискачі рубильника S_1 (при рівності напруг генератора й двигуна вольтметр повинен давати нульові показання). Для цього замикають рубильник S_1 , збільшують збудження машини, яка призначена до випробувань в режимі генератора, і зменшують збудження машини, яка призначена до випробувань в режимі двигуна. Для контура, який розглядається, справедливий вираз (5.3) при $U_{ГПС} = 0$, з якого витікає, що при номінальному навантаженні генератора ВГ двигун ВД буде недозбудженим, при номінальному навантаженні двигуна генератор потрібно перезбуджувати.

Спосіб під'єднання механічного джерела енергії найбільш ефективний для випробування потужних генераторів постійного струму, які випускаються у вигляді багатомашинних агрегатів з приводними двигунами змінного струму, один з яких в цьому випадку відіграє роль допоміжного двигуна Д.

При випробуваннях *синхронних машин* за методом взаємного навантаження їх пуск, як правило, здійснюється за допомогою розгінного двигуна, за рахунок якого компенсуються втрати в синхронних машинах та знижується до нуля споживання активної енергії з мережі змінного струму, паралельно з якою працюють машини. За аналогією з машинами постійного струму при випробуваннях синхронних машин використовуються способи паралельного увімкнення джерела живлення й під'єднання механічного джерела енергії.

Регулювання активної потужності двох механічно з'єднаних синхронних машин при їх паралельній роботі на загальну мережу можливе

лише шляхом взаємного зсуву роторів або статорів цих машин. Поворот статора для машини середньої та великої потужності практично не використовується через громіздкість та ненадійність пристроїв механічного повороту. Поворот роторів порівняно просто здійснити при механічному з'єднанні валів за допомогою муфт. Для розширення можливостей регулювання кількість дірок в муфтах повинна мати, можливо, більше загальних співмножників з кількістю полюсів синхронної машини. Вказаний спосіб дозволяє регулювати навантаження дискретно (ступенями). Крім того, зміну навантаження можна здійснювати тільки після зупинки машин.

В той же час поворот вектора ЕРС холостого ходу може бути здійснений електромагнітним шляхом. Зараз отримали розповсюдження синхронні машини з поздовжньо-поперечним збудженням та асинхронізовані синхронні машини, які мають на роторі не однофазну обмотку збудження постійного струму, а дво- або трифазну. Шляхом регулювання струму збудження в цих обмотках можна плавно регулювати кут між вектором потоку збудження та “повздовжньою” віссю машини й кут навантаження. Потужність електричних машин з поздовжньо-поперечним системним збудженням сягає 500 МВт, що дозволяє випробувати потужні синхронні машини.

У випадку реактивного навантаження одна з двох синхронних машин може працювати в режимі генератора, а друга – в режимі споживача реактивної потужності. Потрібно зауважити, що в режимі недозбудження з нульовим струмом збудження навіть синхронні компенсатори споживають лише (50÷60)% від номінальної потужності (*rated power*), що потребує встановлення в цьому випадку додаткового індуктивного навантаження.

При випробуваннях *асинхронних машин* за методом взаємного навантаження безпосереднє з'єднання їх валів виявляється неможливим, оскільки частота збудження обертання реалізується підбиранням діаметрів шківів, які встановлюються на валах машин, що випробовуються, або передаточного відношення редуктора. Потужність асинхронної машини при незмінній напрузі залежить тільки від величини ковзання, тому спосіб під'єднання механічного джерела енергії в даному випадку виявляється недопустимим. Використовується лише спосіб паралельного увімкнення джерела живлення.

Двигун ВД і генератор ВГ, що випробовуються, вмикаються на загальну мережу (рисунок 5.5). Їх ротори зв'язані ремінною передачею, так що частота обертання двигуна n_d виявляється менша, а частота обертання генератора n_r – більша синхронної. При цьому активна потужність генератора в схемі, яка розглядається, менша потужності двигуна на суму втрат. В результаті при номінальному навантаженні генератора ВГ двигун

ВД виявляється перевантаженим, а при номінальному навантаженні двигуна навантаження генератора менше номінального.

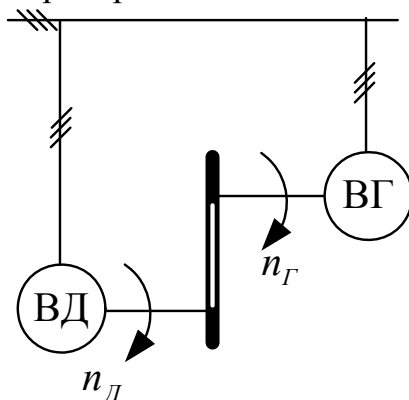


Рисунок 5.5 – Принципова схема випробування асинхронних машин за методом взаємного навантаження

При випробуваннях **трансформаторів** за методом взаємного навантаження вони вмикаються паралельно. Якщо умови увімкнення на паралельну роботу виконані, то первинними обмотками струм не протікає, а з мережі кожний трансформатор споживає лише струм холостого ходу. Для того щоб навантажити трансформатори, необхідно щоб різниця між вторинними ЕРС трансформаторів не була рівна нулю. Якщо вона дорівнює сумі напруг КЗ, то по обмотках трансформаторів будуть протікати номінальні струми, які викликають номінальні електричні втрати. Оскільки трансформатори працюють при номінальній напрузі, втрати в сталі також будуть рівні номінальним. Для компенсації втрат використовуються способи паралельного або послідовного ввімкнення джерел живлення.

Спосіб паралельного ввімкнення джерела живлення (рисунок 5.6, а) полягає в тому, що паралельно ввімкнені трансформатори T_1 і T_2 працюють на різних відпайках обмотки вищої напруги. Необхідна потужність джерела електричної енергії, яка покриває втрати в трансформаторах, коли вони однакові:

$$S_{дж} = \frac{2S_n(i_o + u_k)}{100}, \quad (5.4)$$

де S_n – номінальна потужність трансформатора;

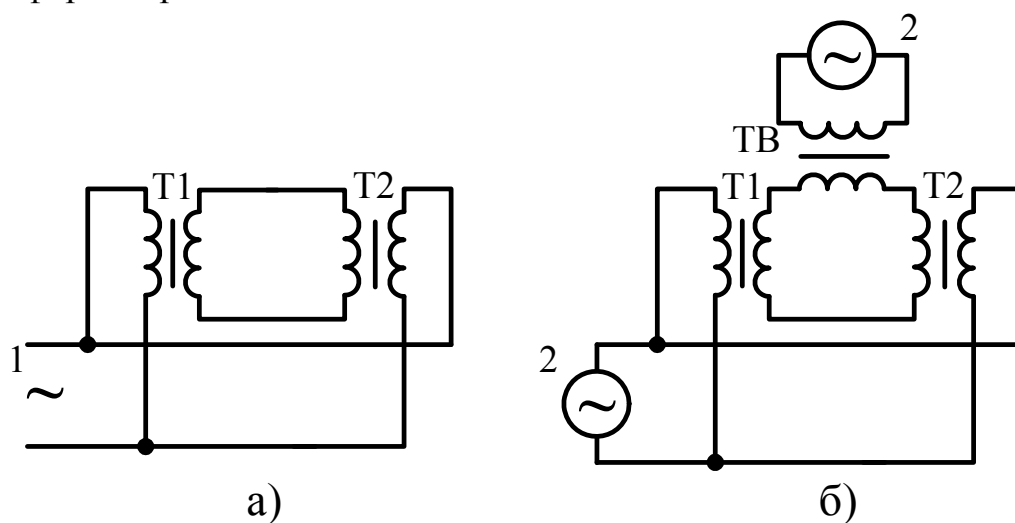
i_o – струм холостого ходу одного трансформатора, %;

u_k – напруга короткого замикання одного трансформатора, %.

Потрібно зауважити, що при цьому способі навантаження електричні втрати в обох трансформаторах неоднакові. Трансформатори з більшою кількістю витків обмотки ВН мають більші втрати, ніж трансформатори з

меншою кількістю витків обмотки ВН.

При використанні *способу послідовного ввімкнення джерела енергії* первинні обмотки трансформаторів T_1 і T_2 (як правило, це обмотки низької напруги) з'єднані з джерелом живлення 1 (рисунок 5.6, б). Між вторинними обмотками цих трансформаторів ввімкнена обмотка вольтододаточного трансформатора ТВ, а його первинна обмотка живиться від джерела регульованої напруги 2, яке має частоту, таку ж як джерело 1. Вторинна обмотка трансформатора ТВ повинна мати клас напруги ізоляції не нижче класу ізоляції вторинних обмоток випробуваних трансформаторів.



1 – джерело живлення; 2 – джерело напруги

Рисунок 5.6 – Принципова схема випробування трансформаторів за методом взаємного навантаження:

- а) – при паралельному ввімкненні джерела електричної енергії;
- б) – при послідовному ввімкненні

Плавно змінюючи напругу джерела 2, струм в обмотках трансформаторів T_1 і T_2 доводять до необхідного значення. Потужність трансформатора ТВ при однакових випробуваних трансформаторах для випадку номінального навантаження можна визначити за формулою

$$S_{ТВ} = S \cdot \frac{2u_k}{100}. \quad (5.5)$$

Звичайно потужність джерела 2 береться на 10% більша, ніж потужність вольтододаточного трансформатора.

Необхідна потужність джерела 1 в такому випадку складає:

$$S_1 = S \cdot \frac{2i_0}{100}. \quad (5.6)$$

Оскільки струм холостого ходу i_0 значно менший напруги короткого замикання u_k , то розглядувану схему можна віднести до послідовного увімкнення джерела живлення.

5.4 Метод непрямого навантаження електричних машин

При використанні цього методу в машині штучно створюється тепловий режим, який відповідає роботі в номінальних умовах, що досягається шляхом чергування режимів холостого ходу та короткого замикання. Цей спосіб навантаження може бути рекомендований при проведенні випробувань машин постійного струму та синхронних машин.

Для пояснення суті цього методу звернемось до теплових розрахунків електричних машин, які виконують за заступними тепловими схемами (рисунок 5.7). Визначення перевищень температури здійснюється за допомогою теплової заступної схеми, яка являє собою розгалужене електричне коло з постійними опорами й декількома джерелами. Розрахунок перевищень температури окремих вузлів електричної машини зводиться до визначення теплових потоків Q , які проходять через вузли ($Q_{\text{л}}$, $Q'_{\text{л}}$ – теплові потоки, які проходять через лобові частини обмоток статора й ротора, відповідно; $Q_{\text{ст}}$, $Q'_{\text{ст}}$ – теплові потоки, які проходять по сталі статора й ротора відповідно) від кожного джерела втрат P , множення цих потоків на відповідні теплові опори R ($R_{\text{пр}}$, $R_{\text{із}}$, $R_{\text{л}}$, $R_{\text{сп}}$ – опори проводу, ізоляції паза, лобових частин, межі “сталь-повітря”) для отримання часткових перевищень температури й наступного підсумовування часткових перевищень для отримання результатів перевищення температури даного вузла.

При випробуванні електричних машин потрібно створити декілька тривалих чергових режимів роботи, в яких діяли б окремі складові втрат, і виміряти часткові перевищення температури окремих вузлів. Подальше підсумовування часткових перевищень дає результуюче перевищення температури без використання безпосереднього навантаження машини.

Для того щоб окремі складові втрат були рівні втратам у номінальному режимі роботи, достатньо провести досліди в режимах холостого ходу при різному ступені збудження та короткого замикання при номінальному струмі якоря.

Дійсно, у режимі холостого ходу без збудження при номінальній частоті обертання в машині виділяються тільки механічні втрати $P_{\text{мех}}$, які дорівнюють механічним втратам у номінальному режимі роботи. При холостому ході з напругою, яка дорівнює номінальній, крім механічних втрат виділяються втрати в сталі якоря $P_{\text{ст}}$, які відповідають номінальному

режимі роботи, і деякі втрати на збудження, які відповідають струму збудження холостого ходу (менші втрат на збудження в номінальному режимі). У режимі холостого ходу зі струмом збудження, який дорівнює номінальному, втрати на збудження (на рисунку 5.7 ці втрати розділені на пазові $P_{ПФ}$ і лобові $P_{ЛФ}$) і механічні втрати відповідають номінальному режиму роботи, а втрати в сталі перевищують їх. У режимі короткого замикання з номінальним струмом якоря втрати в обмотці якоря (на рисунку 5.7 ці втрати розділені на пазові $P_{П}$ і лобові $P_{Л}$) та додаткові втрати відповідають номінальному режиму роботи (так само, як і механічні втрати генератора), втрати на збудження та в сталі малі, механічні втрати двигуна дорівнюють нулю.

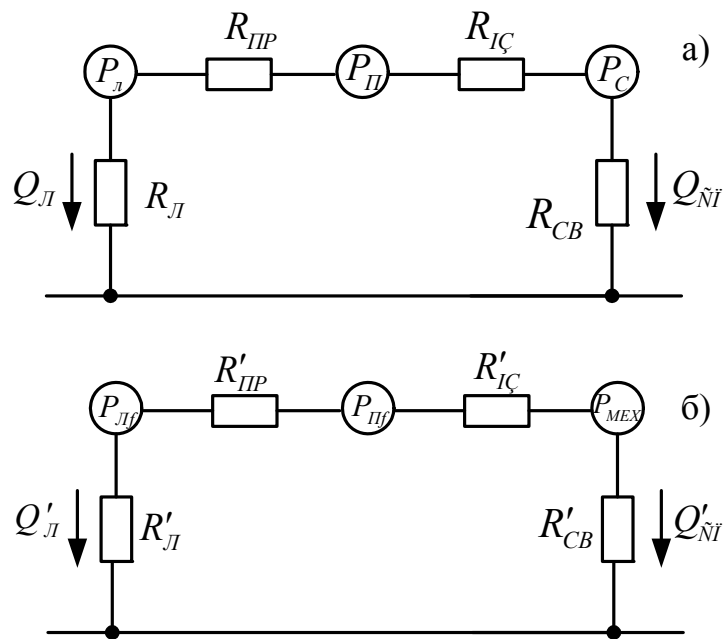


Рисунок 5.7 – Теплова заступна схема статора (а) та ротора (б) синхронної машини

Величина окремих складових втрат змінюється при різних способах охолодження. У синхронних машинах і машинах постійного струму повітряний зазор великий, що дозволяє знехтувати перетоками тепла по ньому та розглядати нагрів статора й ротора цих машин ізольовано.

Для синхронних машин і машин постійного струму при використанні методу непрямого навантаження можуть бути рекомендовані такі режими роботи:

- коротке замикання (*short circuit*) при номінальному струмі якоря;
- холостий хід (*tickover; idling*) при номінальній напрузі на обмотці якоря;
- холостий хід при номінальному струмі збудження;

- холостий хід без збудження.

Перевищення температури обмотки якоря має вигляд:

$$v_a = v_1 + A(v_2 - v_4) + B(v_3 - v_4), \quad (5.7)$$

де v_1, v_2, v_3, v_4 – перевищення температури обмотки якоря у відповідних режимах;

A і B – коефіцієнти, які враховують відхилення втрат в сталі і втрат на збудження від їхніх номінальних значень.

В ряді випадків, наприклад, для машин постійного струму, можна користуватися спрощеною формулою

$$v_a = v_1 + v_2 - v_4. \quad (5.8)$$

Дійсно, v_1 визначається електричними втратами в обмотці якоря, додатковими і механічними втратами, які відповідають номінальному режиму роботи; v_2 – втратами в сталі якоря і механічними, які відповідають номінальному режиму роботи (втрати на збудження не впливають на нагрів якоря); v_4 – механічними втратами.

Отже, використовуючи метод накладання, отримуємо, що перевищення температури обмотки якоря визначається номінальними електричними та додатковими втратами в обмотці, втратами в сталі якоря і механічними втратами.

Перевищення температури обмотки збудження машин постійного струму (нерухома обмотка) має вигляд:

$$v_f = v_1 + v_3 - v_4, \quad (5.9)$$

де v_1, v_3, v_4 – перевищення температури обмотки збудження у вищезгаданих режимах.

У синхронних машинах не завжди вдається провести третій дослід при номінальному струмі збудження через обмеження на значення напруги холостого ходу. Цей дослід приходить виконувати при зменшеному струмі збудження при напрузі до 120% від номінального. Тоді, перевищення температури обмотки збудження можна знайти екстраполяцією графічних залежностей $v_f = f(I_f)$ або $v_f = f(P_f)$, експериментальні точки яких отримують з відповідних дослідів.

Коефіцієнти, які входять в рівняння (5.7), знаходяться розрахунково-

емпіричним способом з використанням точних теплових заступних схем та результатів експериментів з реальними машинами.

Контрольні запитання

1. Можливі способи навантаження електричних машин та трансформаторів під час випробувань.
2. Енергетична ефективність способів навантаження.
3. Компенсація втрат при використанні способу взаємного навантаження.
4. Метод непрямого навантаження електричних машин.
5. Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів без видачі енергії в мережу.
6. Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів з видачею енергії в мережу.
7. Область використання способів навантаження при випробуваннях окремих видів електричних машин та трансформаторів.
8. Схеми випробувань електричних машин постійного струму під навантаженням.
9. Схеми випробувань синхронних електричних машин під навантаженням.
10. Метод взаємного навантаження електричних машин і трансформаторів.
11. Схеми випробувань електричних машин постійного струму за методом взаємної індукції.
12. Випробування синхронних машин за методом взаємного навантаження.
13. Випробування асинхронних машин за методом взаємного навантаження.
14. Випробування трансформаторів за методом взаємного навантаження.

6 ОСОБЛИВОСТІ ВИПРОБУВАНЬ ТРАНСФОРМАТОРІВ І ОКРЕМИХ ВИДІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

6.1 Випробування трансформаторів на стійкість під час раптового короткого замикання

Випробування проводяться для перевірки надійності механічного кріплення обмоток, відводів та інших деталей трансформатора, а також нагрівостійкості ізоляції обмоток при дії струмів раптового короткого замикання. Трансформатор повинен витримувати без пошкоджень зовнішні КЗ при значеннях кратності $I_{ко}$ і тривалості t_k струму КЗ.

Величина струмів КЗ при випробуваннях трансформаторів на динамічну стійкість (*dynamic (al) stability*) розраховується таким чином. Якщо найбільша допустима потужність струму КЗ не вказана в стандартах або технічних умовах, то для двообмоткових трансформаторів потужністю менше 1 МВ·А [16].

$$I_{ко} = \frac{100 \cdot U_n \cdot I_n}{U_{ко} \cdot U_{но}} \leq 25 \cdot I_n, \quad (6.1)$$

де $I_{ко}$ – усталений струм КЗ відгалуження, для якого розрахункові механічні зусилля максимальні, А;

$U_{но}$, $U_{ко}$ – номінальна напруга та напруга КЗ цього відгалуження, кВ і %, відповідно;

U_n – номінальна напруга обмотки, що розглядається, кВ;

I_n – номінальний струм обмотки на основному відгалуженні, А.

Для двообмоткових трансформаторів потужністю 1 МВ·А і більше:

$$I_{ко} = \frac{1}{\frac{U_{ко}}{100} \cdot \frac{S_n}{S_k}} \cdot \frac{U_n}{U_{но}} \cdot I_n, \quad (6.2)$$

де S_n – номінальна потужність трансформатора, МВ·А;

S_k – потужність КЗ мережі, МВ·А (таблиця 6.1).

Найбільший допустимий (ударний) струм КЗ, відносно якого виконуються випробування

$$i_{к уд} = \sqrt{2} \cdot i_{ко} \cdot K_{уд}. \quad (6.3)$$

Величина $K_{уд}$, називається ударним коефіцієнтом, який залежить

від параметрів трансформатора (активної і реактивної складових напруги короткого замикання) і складає:

$\frac{U_p}{U_a}$...	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	14,0 і більше
$K_{уд}$...	1,5	1,63	1,75	1,95	2,09	2,19	2,28	2,38	2,46	2,55

Таблиця 6.1 – Потужність короткого замикання мережі S_k , МВ·А

Клас напруги обмотки, кВ	Клас напруги трансформатора	
	нижче 110 кВ (крім трансформаторів власних потреб)	110 кВ та вище і всі трансформатори власних потреб
до 10 включно	500	2000
більше 10 до 35 включно	2500	5000
110	-	15000
150	-	20000
220	-	25000
330	-	35000
500	-	50000
750	-	75000

Найбільша тривалість КЗ $t_{k\max} = 4$ с (при КЗ на стороні з номінальною напругою 35 кВ і менше) і 3 с (при КЗ на стороні з номінальною напругою 110 кВ і вище). Для масляних і заповнених негорючим діелектриком трансформаторів тривалість КЗ дорівнює:

$$t_k = \frac{1500}{K^2} \leq t_{k\max}, \quad (6.4)$$

де $K = I_{ko}/I_n$.

Для складання програми випробувань необхідно мати:

- розрахунок трансформатора, який містить у собі розрахунок механічних зусиль;
- креслення активної частини, монтажу обмоток і всього трансформатора;
- принципову електричну схему;
- вимоги до стійкості при КЗ;
- дані про технологічне оброблення обмоток;
- розрахунок стійкості і міцності кріплень трансформатора при транспортуванні;
- значення струму і втрат холостого ходу; струму, втрат і опору КЗ;

опору ізоляції.

Програма випробувань містить такі розділи:

- аналіз розрахункових даних і попередні висновки про міцність конструкції (виконується розробником);
- обґрунтування вибору режимів КЗ, на відповідність яким проводяться випробування, і основні параметри режимів (визначаються згідно з технічними умовами на даний трансформатор);
- розрахунок параметрів КЗ в усіх режимах випробувань (найбільші значення усталених струмів КЗ, найбільші значення ударних струмів КЗ в усіх обмотках, повні опори КЗ зі сторони живлення трансформатора) для вибору схеми випробувань на випробувальному стенді;
- силові і вимірювальні схеми випробувань;
- перелік контрольних вимірювань та допоміжних випробувань;
- порядок проведення випробувань.

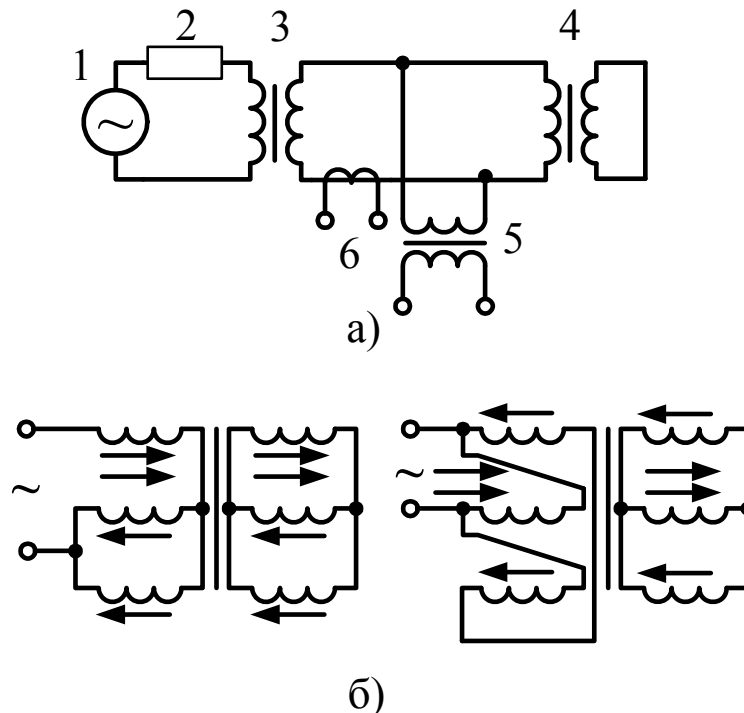
Живлення трансформатора, що випробовується, здійснюється, як правило, зі сторони ВН для зменшення струмів в схемі живлення (рисунки 6.1, а). Обмотка НН замикається накоротко до початку випробувань. Генератор змінного струму 1 збуджують до заданої напруги з урахуванням коефіцієнта трансформації проміжного підвищувального трансформатора 3 при вимкненому вимикачі 2. Потім вимикач 2 вмикається і випробувальна напруга подається на трансформатор 4, що випробовується. Значення струму і напруги вимірюють за допомогою трансформаторів струму 6 та напруги 5, які з'єднані з осцилографом. Для зменшення спаду напруги в живильній мережі шинопроводи виконуються прямими з максимальним зближенням фазних шин, а елементи схеми розташовують по можливості ближче один до одного.

Випробування на стійкість складається з п'яти залікових дослідів КЗ, у тому числі чотири тривалістю $0,5 \div 1,0$ с, п'ятий тривалістю t_k для перевірки нагрівостійкості. Якщо після п'яти дослідів ставиться під сумнів питання про позитивні результати випробувань, то допускається проведення шостого дослідів тривалістю $(0,5 \div 1,0)$ с. Трансформатор випробовують після попереднього нагріву так, щоб в кінці п'ятого дослідів температура обмоток досягла максимально допустимого значення.

Кількість режимів випробувань (для кожної обмотки), як правило, не повинна перевищувати одного, щоб не ускладнювати цих випробувань. Якщо програмою випробувань передбачено два або більше режимів випробувань, то випробування обмотки більше, ніж в одному режимі допускається за умови, що струм у будь-якій її частині дорівнює найбільшому струму КЗ для цієї частини тільки в одному з режимів, а в інших не перевищує 80% цього струму. Послідовність режимів випробувань вибирається відповідно очікуваному збільшенню розрахункових зусиль.

Для трифазних трансформаторів, які мають два й більше режимів

випробувань, а також для трансформаторів потужністю більше 1600 кВ·А з метою отримання більшого об'єму інформації про міцність конструкції віддають перевагу однофазним випробуванням на стійкість при КЗ (на рисунку 6.1, б фаза, що випробовується, позначена двома стрілками). Допускаються однофазні випробування без використання двох інших фаз, тобто кожна фаза розглядається як окремий трансформатор. У цьому випадку обмотки сусідніх фаз повинні бути замкнені накоротко, а з'єднання обмоток у трикутник повинні бути розімкнені.



1 – генератор змінного струму; 2 – вимикач; 3 – підвищувальний трансформатор; 4 – трансформатор, що випробовується; 5 – трансформатор напруги (*voltage measuring transformer*); 6 – трансформатор струму (*current transformer*)

Рисунок 6.1 – Принципова схема досліджень трансформатора на динамічну стійкість:

а) – однофазного; б) – трифазного

Випробування проводять у такому порядку: ревізія активної частини, допоміжні випробування й контрольні вимірювання (визначення опору ізоляції, втрат і напруги КЗ, втрат і струму холостого ходу, вимірювання для розрахунку фазних індуктивностей і поперечного поля розсіювання), налагоджувальні й залікові досліди КЗ, допоміжні випробування й контрольні вимірювання після кожного залікового дослідження КЗ, ревізія, й розбирання активної частини після закінчення випробувань.

Оцінювання результатів випробувань проводяться з урахуванням допоміжних випробувань після дослідів і результатів ревізії активної частини. Трансформатор вважається таким, що витримав випробування

при виконанні таких умов:

- при ревізії або розбиранні активної частини після випробувань не виявлені сповзання витків, осьові або радіальні деформації окремих котушок, деформації через поворот обмоток, зсуви або розташування деталей ярмової ізоляції, залишкові деформації пресувальної конструкції (кілець, домкратів, ярмових балок, пресувальних шпильок), залишкові деформації відводів та ошиновки, зниження зусиль запресування обмоток;
- порівняння результатів усіх вимірювань до й після випробувань не вказує на появу будь-яких електричних пошкоджень або внутрішньої деформації;
- електрична міцність ізоляції обмоток, яка пройшла випробування напругою до 0,8 випробувальної, і внутрішня ізоляція витримала випробування за ГОСТ 1516.1-76.

Температура обмоток у п'ятому заліковому досліді не повинна перевищувати 250°C для масляних трансформаторів з мідними обмотками та 200°C – з обмотками з алюмінію. Для сухих трансформаторів допустиме перевищення температури складає: з обмотками з міді – 180°C (клас нагрівостійкості ізоляції А); 250°C (клас Е), 350°C (класи В, F, Н); з обмотками з алюмінію – 180°C (клас А), 200°C (класи Е, В, F, Н). Вимірювання температури в різних частинах трансформатора здійснюється методом вбудованих давачів температури, чутливим елементом яких зазвичай є термопари.

6.2 Визначення зони безіскрової роботи машин постійного струму

Перед випробуванням щітки встановлюються в положення, яке відповідає геометричній нейтралі. Встановлення може проводитись методом реверсування (при роботі машини під навантаженням з притертими й пришліфованими до колектора щітками) або індуктивним методом (при нерухомому якорі).

При використанні *методу реверсування* вважається, що положення щіток відповідає нейтралі в тому випадку, якщо в результаті зміни напрямлення обертання у двигуна при незмінних значеннях напруги, струму навантаження й струму збудження практично не змінюється частота обертання (дослід рекомендується проводити при номінальній частоті обертання), а в генератора при незмінних значеннях частоти обертання, струму навантаження й струму збудження практично не змінюється напруга (живлення обмотки збудження повинно бути незалежним).

Для машин зі змішаним збудженням як при правому, так і при лівому напрямленні обертання згідне або зустрічне вмикання обмоток повинно зберігатись незмінним.

При використанні *індуктивного методу* положення щіток, яке

відповідає нейтралі, визначається за допомогою чутливого магнітоелектричного приладу (з нулем у середині шкали), який під'єднують до щіток різної полярності, а в обмотку головних полюсів подають імпульсами живлення від стороннього джерела постійного струму.

При положенні щіток, яке відповідає нейтралі, прилад не повинен давати відхилень або ці відхилення повинні бути мінімальними й направлені в різні сторони. Дослід повторюють при встановленні якоря в різні положення відносно полюсів. При відсутності напруги постійного струму в обмотку головних полюсів можна подавати напругу змінного струму й використовувати чутливий вольтметр змінного струму.

Випробування, які пов'язані з **визначенням області безіскрової роботи**, необхідні для настроювання додаткових полюсів машини й проводяться при номінальній частоті обертання шляхом зміни МРС обмотки додаткових полюсів. Визначення області проводять у режимі навантаження за практично усталеної температури активних частин, яка відповідає номінальному режиму роботи.

При промислових випробуваннях машин потужністю більше 500 кВт допускається проводити це випробування в режимі КЗ при номінальній частоті обертання. Зміну МРС обмотки додаткових полюсів виконують одним з таких способів за допомогою:

- стороннього джерела постійного струму, який під'єднують до затискачів обмотки додаткових полюсів (ОДП), яка вмикається в загальне коло машини (при випробуваннях машини високої напруги стороннє джерело постійного струму заземляють або, якщо це можливо, надійно ізолюють від землі);

- стороннього джерела постійного струму, який живить обмотку додаткових полюсів, яка відімкнена від інших кіл випробовуваної машини (у цьому випадку струм додаткового живлення додаткових полюсів потрібно визначити як різницю між струмом навантаження в момент відліку й струм в обмотці додаткових полюсів);

- накладеної на додаткові полюси тимчасової обмотки, яка живиться від стороннього джерела постійного струму. У цьому випадку струм додаткового живлення отримують приведенням струму живлення тимчасової обмотки до кількості витків додаткових полюсів (цей спосіб доцільно використовувати тільки в тих випадках, коли відсутня можливість використання перших двох способів);

- шунтування обмотки додаткових полюсів (у машинах із сильними додатковими полюсами).

Отже, при випробуваннях обмотку додаткових полюсів живлять додатковим струмом $\pm \Delta I$, який поступово змінюють до появи іскріння. Проводячи випробування при різних значеннях струму якоря ($I_{я}$), отримують два ряди точок, які визначають верхню та нижню границю

області безіскрової роботи машини. Границі області повинні відповідати зникненню іскріння при зміні струму підживлення, тобто в середині області машина працює зі ступенем іскріння 1 за шкалою ГОСТ 183-73.

Відхилення середньої лінії області безіскрової роботи вгору від осі абсцис (пунктирна лінія на рисунку 6.2, а) свідчить про те, що МРС обмотки додаткових полюсів є недостатньою. Відхилення середньої лінії області безіскрової роботи вниз (рисунк 6.2, б) вказує на те, що МРС обмотки додаткових полюсів є надмірною.

У першому випадку необхідно збільшити МРС обмотки додаткових полюсів шляхом збільшення кількості її витків або зменшити повітряний зазор під додатковими полюсами. У другому випадку, навпаки, потрібно збільшити повітряний зазор під додатковим полюсом або зменшити МРС обмотки додаткових полюсів.

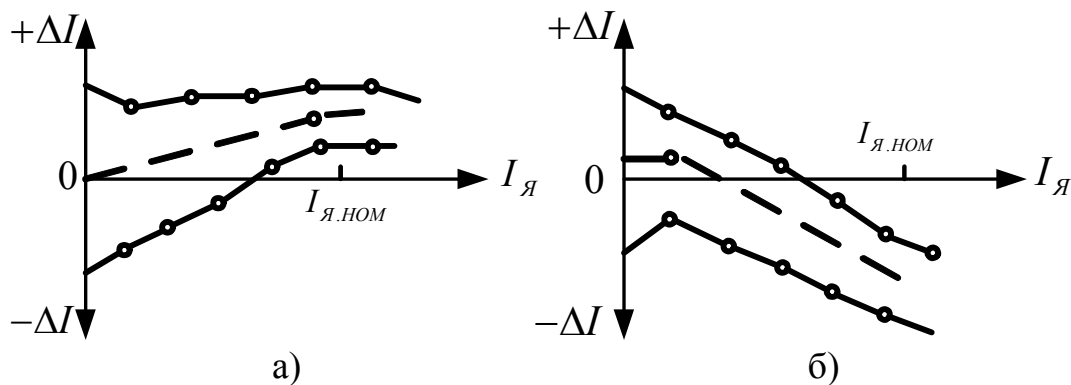


Рисунок 6.2 – Криві підживлення – відживлення машини постійного струму зі слабкими (а) та сильними (б) додатковими полюсами

6.3 Визначення індуктивних опорів та постійних часу обмоток синхронних машин

Синхронні індуктивні опори по повздовжній та поперечній осі (X_d, X_q), перехідні індуктивні опори (X'_d, X'_q), надперехідні індуктивні опори (X''_d, X''_q) та відповідні постійні часу обмоток можуть бути визначені згідно з рекомендаціями МЕК стосовно частотних характеристик. ГОСТ 10169-77 також дозволяє визначити параметри за частотними характеристиками, які отримані з досліду, при якому обмотка якоря при нерухомому роторі під'єднується до джерела напруги змінної частоти.

Частотні характеристики $X_d(j\omega)$ і $X_q(j\omega)$ являють собою залежності комплексного вхідного опору синхронної машини за вирахуваннями активного опору фази якоря по повздовжній і поперечній осях від ковзання ротора. Для їхнього отримання проводять дослід живлення обмоток якоря

нерухомої машини синусоїдальною напругою змінної частоти від $f = 0$ до $f = f_{\text{ном}}$. При визначенні $X_d(js)$ використовується схема рисунку 6.3, а, а $X_q(js)$ – рисунку 6.3, б. Обмотка збудження при проведенні цих дослідів замкнена накоротко, а потік реакції якоря направлений по повздовжній або поперечній осі машини, відповідно. Якщо необхідно знання синхронних індуктивностей опорів, то проводять ті самі два досліди при розімкненій обмотці збудження.

Встановлення ротора в потрібне положення здійснюється при зниженій напрузі номінальної частоти таким чином. Зібравши схему, яка вказана на рисунку 6.3, а, плавно повертають ротор, контролюючи струм в обмотці збудження. Потрібне положення ротора, яке необхідне для зняття частотної характеристики $X_d(js)$, буде відповідати максимальному струму в обмотці збудження. Зібравши схему, яка вказана на рисунку 6.3, б, також плавним поворотом ротора добиваються практично нульового значення сили струму в обмотці збудження, що відповідає положенню ротора при знятті частотної характеристики $X_q(js)$.

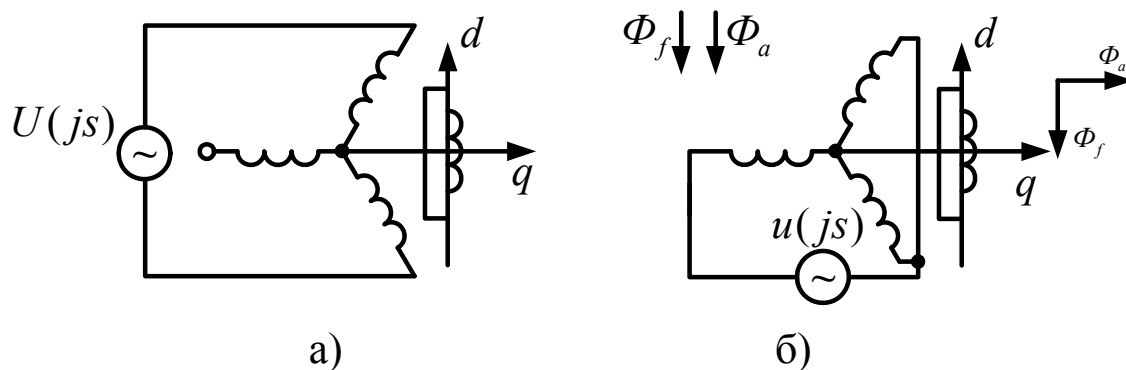


Рисунок 6.3 – Принципові схеми для зняття частотних характеристик синхронної машини

Як джерело живлення змінної частоти в діапазоні $f = (0 \div 15)$ Гц використовується генератор постійного струму, який збуджується синусоїдальним сигналом. Клас точності (*accuracy class; accuracy rating*) вимірювальних приладів повинен бути не нижче 0,5. Струм якоря синхронної машини повинен складати не менше 3% від свого номінального значення. При проведенні дослідів вимірюють силу струму й напругу якоря, фазовий кут між ними й частоту живлення. Інтервал зміни частоти при знятті характеристик в області низьких частот повинен бути достатньо малим, оскільки у цій зоні опори вельми чутливі до частоти.

Вхідні опори нерухомої машини $z_{\text{нер}}(js_i)$ для кожного значення частоти визначаються за формулою:

$$z_{\text{нєр}}(js_i) = K_{\text{сх}} \cdot \left(\frac{U_i}{I_i} \right) \cdot e^{j\varphi_i}, \quad (6.5)$$

де $K_{\text{сх}}$ – коефіцієнт, який враховує схему з'єднання фаз якоря й рівний 1/2 (рисунок 6.3, а) або 2/3 (рисунок 6.3, б);

$$s_i = f_i / f_H;$$

φ_i – кут різниці фаз напруги й струму, який визначається за осцилограмами або розрахунком за показами приладів як $\arccos\left(\frac{P_i}{U_i \cdot I_i}\right)$;

$i = 1, 2, \dots, N$ – порядковий номер точок частотної характеристики.

Комплексний опір $X(js_i)$ обертової машини за урахуванням активного опору якоря для кожної осі визначається за виразом:

$$X(js_i) = \frac{z_{\text{нєр}}(js_i) - R_a}{(js_i)}, \quad (6.6)$$

де R_a – відомий опір фази обмотки якоря постійному струму.

До частотних характеристик відноситься також характеристика $G(js_i)$, яка являє собою комплексну залежність між напругою на розімкнених затискачах фаз якоря й напругою на обмотці збудження при номінальній частоті обертання ротора від частоти струмів у колі обмотки збудження. Для визначення частотної характеристики $G(js_i)$ машини проводиться дослід живлення обмотки збудження синусоїдальною напругою різних частот від значення, близького до 0, до (5÷10) Гц при розімкненій обмотці якоря та нерухомому роторі, який встановлено по повздовжній осі відносно двох будь-яких фаз якоря (рисунок 6.3). Амплітуду струму, який подається в обмотку збудження, необхідно підтримувати в межах (0,05÷0,1) від номінального струму збудження. Джерелом живлення може служити генератор постійного струму.

Вимірювальна напруга на виводах фаз якоря U , відносно яких встановлена повздовжня вісь ротора, напруга на обмотці збудження U_f , фазового зсуву між ними γ та частоти f здійснюється за осцилографічними записами.

Точки характеристики $G(js_i)$ обертової машини за даними вимірювань при нерухомому роторі визначаються за формулою:

$$G(js_i) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_i}{jU_{\text{н}} \cdot s_i} \cdot e^{j\gamma_i}. \quad (6.7)$$

Значення $G(js_i)$ при $s=0$ визначається екстраполяцією цієї частотної характеристики. Вона повинна відповідати величині X_{ad}/r_f , де X_{ad} – індуктивний опір взаємоіндукції; r_f – приведений до обмотки якоря активний опір обмотки збудження (на постійному струмі).

Результати оброблення експериментальних даних за визначенням частотних характеристик $X_d(js)$, $X_q(js)$, $G(js_i)$ подаються в графічній або табличній формі.

Визначення параметрів за частотними характеристиками графоаналітичним способом проводиться для обох осей роздільно. За експериментальними даними в логарифмічних координатах будується графік залежності $20\lg|X_d(js)| = f(\lg s)$. Як приклад такий графік показаний на рисунку 6.4 безперервною товстою лінією. Постійні часу визначаються по точках зламу асимптотичної кривої, яка отримується в результаті апроксимації вказаної залежності відрізками горизонтальних прямих і прямих з нахилом ± 20 дБ на декаду, як вказано на рисунку 6.4 (середньоквадратична похибка апроксимації початкової кривої не повинна перевищувати 5%).

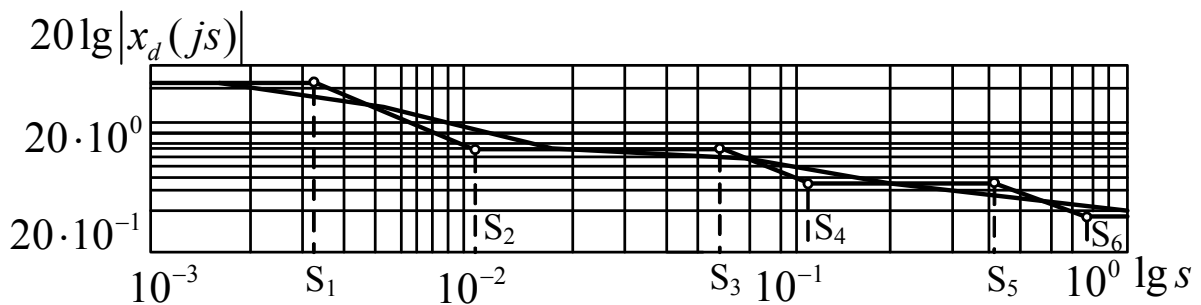


Рисунок 6.4 – Визначення параметрів синхронної машини за її частотною характеристикою

Точкам зламу відповідають ковзання s_1, s_2, \dots, s_k (на рисунку 6.4 $k=6$). Постійні часу синхронної машини з розімкненою обмоткою якоря (у секундах) визначаються за ковзаннями з непарними індексами $k=2n \pm 1$ ($n=1, 2, 3, \dots$) за формулою

$$\tau_{d_0}^{(n)} = (2p \cdot f_n \cdot s_{2n-1})^{-1}, \quad (6.8)$$

а постійні часу при замкненій накоротко обмотці якоря – за ковзаннями з парними індексами $k=2n$ за формулою:

$$\tau_d^{(n)} = (2p \cdot f_n \cdot s_{2n})^{-1}. \quad (6.9)$$

Відповідно до рисунка 6.4 є три постійні часу обмотки збудження при розімкненій обмотці якоря ($\tau_{d_0}^{(1)}, \tau_{d_0}^{(2)}, \tau_{d_0}^{(3)}$) й три – при замкненій

накоротко обмотці якоря $(\tau_d^{(1)}, \tau_d^{(2)}, \tau_d^{(3)})$, що відповідає наявності трьох еквівалентних контурів на роторі.

Синхронний індуктивний опір X_d визначається екстраполяцією частотної характеристики $1/X_d(js)$, яка знімається при розімкненій обмотці збудження, у точці $s = 0$. Екстраполяція проводиться по 4÷5 експериментальних точках характеристики, які зняті при $s = 0,01 \div 0,2$.

Перехідний та надперехідний індуктивні опори визначаються за знайденими значеннями X_d й постійних часу за формулами:

$$\left. \begin{aligned} X'_d &= X_d \cdot \frac{\tau_d^{(1)}}{\tau_{d0}^{(1)}} \\ X''_d &= X'_d \cdot \frac{\tau_d^{(2)}}{\tau_{d0}^{(2)}} \\ X_d^n &= X_d^{(n-1)} \cdot \frac{\tau_{d_n}}{\tau_{d0}^{(n)}} \end{aligned} \right\}. \quad (6.10)$$

Зауважимо, що кількість точок зламу частотної характеристики відповідає кількості еквівалентних контурів ротора. Так, у відповідності з рисунком 6.4 ротор має три контури по осі d .

Якщо ротор задається двома еквівалентними контурами, як це прийнято в загальних курсах електричних машин, то дослідну частотну характеристику (рисунок 6.4) потрібно апроксимувати ломаною лінією, яка має 4 злами. Визначивши 4 постійні часу і X_d , за формулами (6.10) визначають перехідний X'_d і надперехідний X''_d індуктивні опори.

Розрахунок параметрів і постійних часу обмоток по поперечній осі ведеться з використанням частотних характеристик $X_q(js)$ за формулами (6.8)÷(6.10) із заміною індексів (d на q).

Зараз замість графічної апроксимації експериментальної частотної характеристики з подальшим розрахунком параметрів широке розповсюдження отримали математичні методи апроксимації з використанням стандартних підпрограм дискретного опису частотної характеристики й заданням потрібної кількості еквівалентних контурів на роторі.

При пусконаладжувальних випробуваннях активні й індуктивні опори визначаються стаціонарним методом при однофазному живленні зниженою напругою змінного струму попарно всіх фаз обмотки статора (ОС).

Напруга змінного струму подається від знижувального трансформатора (12÷60) В або від мережі (220÷380) В. При цьому вимірюються струми, напруги й активні потужності ($I_{AB}, I_{BC}, I_{AC}, U_{AB}, U_{BC}, U_{AC}, P_{AB}, P_{BC}, P_{AC}$). Щоб виключити вплив опору з'єднувальних проводів і перехідних контактів, вольтметр і кола напруги ватметра приєднують окремими провідниками до затискачів машини. Обмотку ротора замикають накоротко й вимірюють у ній струм. Струм (А) і потужності (Вт) які споживаються в досліді, визначаються за формулами [16, 18]:

$$I = \frac{U \cdot S_H}{2 \cdot 0,15 \cdot U_H^2}; \quad (6.11)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi_K, \quad (6.12)$$

де U – напруга джерела живлення, В;

U_H – номінальна лінійна напруга синхронної машини, кВ;

S_H – номінальна потужність синхронної машини, МВ·А;

$\cos \varphi_K$ – коефіцієнт потужності, який приймається в діапазоні 0,2÷0,4.

На основі вимірювань визначають повні, індуктивні та активні опори, які віднесені до одної фази обмотки (Ом):

$$\left. \begin{aligned} Z_{AB} &= \frac{U_{AB}}{2I_{AB}}; & Z_{BC} &= \frac{U_{BC}}{2I_{BC}}; & Z_{AC} &= \frac{U_{AC}}{2I_{AC}} \\ R_{AB} &= \frac{P_{AB}}{2I_{AB}^2}; & R_{BC} &= \frac{P_{BC}}{2I_{BC}^2}; & R_{AC} &= \frac{P_{AC}}{2I_{AC}^2} \\ X_{AB} &= \sqrt{Z_{AB}^2 - R_{AB}^2}; & X_{BC} &= \sqrt{Z_{BC}^2 - R_{BC}^2}; & X_{AC} &= \sqrt{Z_{AC}^2 - R_{AC}^2} \end{aligned} \right\}. \quad (6.13)$$

Потім визначають середнє значення опору (Ом):

$$\left. \begin{aligned} Z_{cp} &= \frac{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}}{3} \\ X_{cp} &= \frac{X_{AB} + X_{BC} + X_{AC}}{3} \\ R_{cp} &= \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}{3} \end{aligned} \right\}. \quad (6.14)$$

Активні опори по поздовжній і поперечній осях:

$$\left. \begin{aligned} R_d'' &= R_{cp} - \Delta R \\ R_q'' &= R_{cp} + \Delta R \end{aligned} \right\}, \quad (6.15)$$

де

$$\Delta R = 0,667 \cdot \sqrt{R_{AB}(R_{AB} - R_{BC}) + R_{BC}(R_{BC} - R_{AC}) + R_{AC}(R_{AC} - R_{AB})}. \quad (6.16)$$

Приведені до статора середній активний опір ротора $R_{p,cp}''$ та активні опори ротора по повздовжній $R_{p,d}''$ і поперечній осях при частоті струму в роторі 50 Гц визначають за формулами:

$$\left. \begin{aligned} R_{p,cp} &= R_{cp} - R_{ст} \\ R_{p,d}'' &= R_d'' - R_{ст} \\ R_{p,q}'' &= R_q'' - R_{ст} \end{aligned} \right\}, \quad (6.17)$$

де $R_{ст} = (2 \div 3)R$ для генераторів, які мають безперервну ізоляцію обмотки статора, і $(4 \div 5)R$ для генераторів, які мають гільзову ізоляцію (R – опір одної фази обмотки статора постійному струму).

Активні опори статора $R_{ст}$ можна визначити, знаючи втрати в статорі генератора при номінальному струмі в режимі трифазного КЗ P_k :

$$R_{ст} = \frac{P_k}{3 \cdot I_H^2}. \quad (6.18)$$

Активні опори зворотної послідовності (*reverse sequence; inverted sequence*) ротора R_p й генератора в цілому R_2 :

$$R_p = \sqrt{2} \cdot R_{p,cp}; \quad (6.19)$$

$$R_2 = R_{ст} + \sqrt{2} \cdot R_{p,cp}. \quad (6.20)$$

Надперехідні реактивні опори по повздовжній і поперечній осях:

$$\left. \begin{aligned} X_d'' &= X_{cp} \mp \Delta X \\ X_q'' &= X_{cp} \pm \Delta X \end{aligned} \right\}, \quad (6.21)$$

де

$$\Delta X = 0,667 \sqrt{X_{AB}(X_{AB} - X_{BC}) + X_{BC}(X_{BC} - X_{AC}) + X_{AC}(X_{AC} - X_{AB})} \quad (6.22)$$

Знак перед ΔX визначають таким чином: $X''_d < X''_q$, якщо найбільшому вимірюваному опору на одній з пар лінійних затискачів ОС відповідає мінімальний з трьох струмів в колі збудження; $X''_d > X''_q$, якщо найбільшому вимірюваному індуктивному опору статора відповідає максимальний з трьох струмів в колі збудження.

Індуктивний опір (%):

$$X = \frac{P_n \cdot X_{Om}}{U_n^2} \cdot 100, \quad (6.23)$$

де P_n – номінальна потужність машини, МВ·А;

U_n – номінальна лінійна напруга, кВ;

X_{Om} – індуктивний опір, Ом.

При відомих значеннях надперехідних індуктивних опорів по поздовжній і поперечній осях (X''_d і X''_q) індуктивний опір зворотної послідовності може бути визначений за формулою:

$$X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}. \quad (6.24)$$

Для явнополюсних машин краще використовувати вираз:

$$X_2 = \sqrt{X''_d \cdot X''_q}. \quad (6.25)$$

Опір нульової послідовності (*null sequence*) при однофазному живленні обмотки статора машини, яка обертається з номінальною (або близькою до номінальної) частотою визначається таким чином. Якщо кількість виводів ОС менше 6, то індуктивний опір нульової послідовності X_0 можна визначити при паралельному з'єднанні фаз обмотки. Підведену напругу вибирають так, щоб струм в обмотці був не більше номінального. Обмотка збудження замикається накоротко.

Індуктивний опір нульової послідовності визначають за формулами:

- послідовне з'єднання фаз обмоток:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{U_{\text{п}}}{3I_{\text{с}}} \\ R_0 &= \frac{P_{\text{с}}}{3I_{\text{с}}^2} \\ X_0 &= \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \end{aligned} \right\}; \quad (6.26)$$

- паралельне з'єднання фаз обмоток:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{3U_{\text{п}}}{I_{\text{с}}} \\ R_0 &= \frac{3P_{\text{с}}}{I_{\text{с}}^2} \\ X_0 &= \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \end{aligned} \right\}, \quad (6.27)$$

$$\text{де } \left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{3U_{\text{п}}}{I_{\text{с}}}; R_0 = \frac{3P_{\text{с}}}{I_{\text{с}}^2}; \\ X_0 &= \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \end{aligned} \right\} - \text{підведена напруга, В;}$$

$I_{\text{с}}$ – струм споживання, А;

P – потужність споживання, Вт.

Перевага віддається визначенню X_0 при послідовному з'єднанні обмоток усіх фаз. Значення X_0 можна також визначити методом замикання двох фаз на нейтраль обмотки статора в режимі усталеного КЗ.

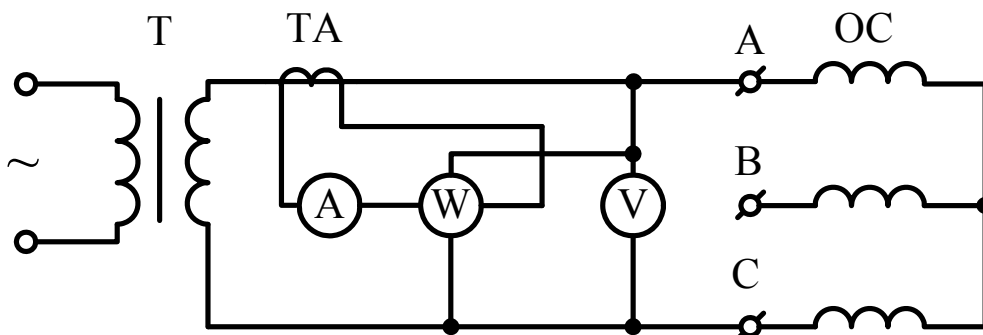
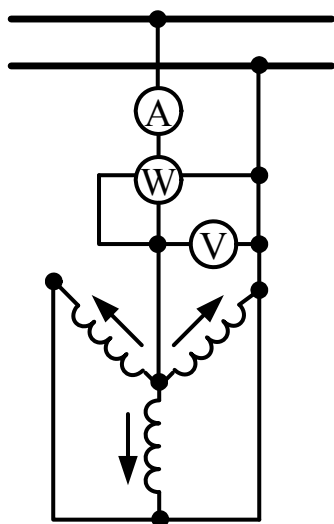
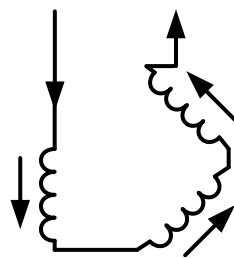


Рисунок 6.5 – Схема для визначення надперехідних активних та індуктивних опорів синхронної машини



а) паралельне з'єднання фаз



б) послідовне з'єднання фаз

Рисунок 6.6 – Визначення X_0 при однофазному живленні усіх трьох фаз статора

6.4 Випробування на короткочасне перевантаження й методи визначення максимального обертового моменту асинхронних двигунів

Випробування на *короткочасне перевантаження за струмом* й моментом проводяться при номінальних значеннях напруги, частоти живильної мережі й температури обмоток двигуна, близькій до робочої, тому їх бажано проводити зразу після випробування двигунів на нагрівання. До й після випробувань здійснюють перевірку стану ізоляції та кріплення обмоток двигуна.

При випробуваннях на короткочасне перевантаження за струмом спочатку здійснюють пуск двигуна й після чого плавно збільшують його навантаження (момент на валу), використовуючи один з засобів безпосереднього навантаження, поки струм статора не досягне значення $1,5 \cdot I_{\text{ном}}$. При цьому струмі двигун повинен працювати протягом 2 хв, після чого навантаження плавно знижують до нуля й вимикають двигун від мережі. Вважається, що двигун витримав випробування, якщо в результаті наступної перевірки не виявляють помітні пошкодження й залишкових деформацій обмоток.

Аналогічно проводять випробування на *короткочасне перевантаження за обертовим моментом*. Навантаження поступово збільшують до $(1,5 \div 1,6) M_{\text{ном}}$; при цьому моменті двигун повинен працювати не менше 15 с. Вважається, що двигун витримав випробування, якщо за цей час не спостерігалось його зупинки або різкої зміни частоти обертання.

Максимальний обертовий момент рекомендується визначати

одним з чотирьох способів [16]:

- побудовою кривої моменту за даними дослідів, які отримують при пуску двигуна;
- безпосереднім вимірюванням моменту при навантаженні двигуна;
- вирахування моменту з використанням тарованої навантажувальної машини;
- за круговою діаграмою.

Звичайно одночасно з визначенням максимального обертового моменту визначають частоту обертання або критичне ковзання двигуна $s_{кр}$, які відповідають йому. Частоту обертання двигуна визначають одним з методів, які викладені в [16], а ковзання за формулою (3.3), оскільки $s_{кр}$ складає (8÷15)%, і розрахунок за цією формулою не дає помітної похибки.

При використанні першого способу визначення обертового моменту будується крива динамічного моменту при пуску двигуна. Оскільки визначається статичний максимальний момент, процес пуску необхідно сповільнити. Якщо встановлення махової маси не дає потрібного ефекту (звичайно, для двигунів потужністю понад 100 кВт), то сповільнення здійснюється зменшенням живильної напруги. Перерахунок максимального моменту до номінальної напруги в цьому випадку проводять за формулою:

$$M_{maxn} = M_{max} \cdot \left(\frac{U_n}{U} \right)^2, \quad (6.28)$$

де M_{max} , U – максимальний момент і напруга, які отримані з дослідів.

При другому способі як навантажувальний пристрій використовують балансирні машини та моментометри, при виборі яких необхідно, щоб область критичного ковзання механічної характеристики завжди була для них статично стійкою. Якщо не вдається визначити M_{max} при номінальній напрузі, то дослід проводять при зниженій напрузі живлення.

При використанні третього способу максимальний момент не може бути виміряний безпосередньо, а визначається розрахунковим шляхом. Попередньо знімають дві характеристики тарованої машини постійного струму: характеристику холостого ходу в режимі генератора $E_0 = f(I_f)$ при постійній частоті обертання n та залежність струму холостого ходу від частоти обертання в режимі двигуна $I_0 = f(n)$ при постійному струмі збудження I_f . Це значення струму збудження залишається незмінним і при знятті механічної характеристики асинхронного двигуна, який випробовується.

Під час визначення обертового моменту регулювання потужності

тарованої машини постійного струму, яка працює в режимі генератора, здійснюється зміною напруги мережі постійного струму. В процесі досліду вимірюють струм якоря $I_{\text{я}}$ тарованої машини й частоту обертання n блока “асинхронний двигун – тарована машина”. Електромагнітна потужність генератора постійного струму дорівнює $P_{\text{ел}} = E_0 \cdot I_{\text{я}}$.

Різниця між корисною потужністю двигуна, який випробовується, P_2 та електромагнітною потужністю генератора дорівнює сумі магнітних і механічних втрат генератора (втрати на збудження не враховується при розрахунках, тому що прийнята схема незалежного збудження). Ці втрати визначаються за допомогою відомої характеристики $I_0 = f(n)$ для кожної фіксованої частоти обертання у вигляді $P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = E_0 \cdot I_0$. Тоді з балансу потужностей витікає

$$P_2 = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ел}} = E_0 \cdot (I_0 + I_{\text{я}}). \quad (6.29)$$

З іншої сторони, знаючи механічну потужність і частоту обертання, можна визначити обертовий момент:

$$M = \frac{E_0 \cdot (I_0 + I_{\text{я}})}{\omega} = \frac{9,55 \cdot (I_0 + I_{\text{я}})}{n}, \quad (6.30)$$

де M – обертовий момент, Н·м;

$E_0 \cdot (I_0 + I_{\text{я}})$ – механічна потужність на валу двигуна, Вт;

ω – кутова швидкість двигуна, 1/с;

n – частота обертання двигуна, об/хв.

За допомогою тарованої машини знімають механічну характеристику асинхронного двигуна й за нею визначають максимальний обертовий момент.

6.5 Загальна характеристика випробувань на надійність

Види випробувань. Розрізняють два види випробувань на надійність – контрольні та визначальні. Ці випробування проводять на зразках, які відбираються з серійно виготовлених електричних машин і трансформаторів, а у випадку одиничного виробництва – з виготовлених за типовою для підприємства технологією.

Контрольні випробування проводяться з метою визначення відповідності кількісних показників надійності вимогам нормативних документів, технічних умов або завдання. Періодичність їх проведення встановлена стандартами на даний технічний виріб. Контрольні випробування проводяться вибірково, тому при прийнятті рішення можливі помилки першого роду, коли добра партія бракується, і другого

роду, коли погана партія приймається. Імовірність помилки першого роду α називається ризиком виробництва, а ймовірність помилки другого роду β – ризиком замовника (споживача)

Визначальні випробування проводять для заново виготовлених виробів або після їхньої модернізації. Вони проводяться для знаходження фактичних кількісних показників надійності. Крім того, при визначальних випробуваннях можна оцінити правильність прийнятих математичних моделей надійності відповідних виробів. Результати випробувань потрібні для оцінювання відповідності фактичних показників надійності технічним умовам.

Ресурс електричних машин складає $(20 \div 50)$ тис. год, тому випробування на надійність можуть затягнутись на $(5 \div 10)$ років. Для скорочення термінів випробувань використовуються методи форсування, однак при цьому повинна бути знайдена відповідність (визначені коефіцієнти прискорення) між випробуваннями в нормальних умовах і прискореними випробуваннями. Для цього проводять дослідження з визначення коефіцієнтів прискорення, тобто відношення часу випробувань в звичайних умовах (t_n) до часу випробувань в прискорених режимах (t_ϕ). При цьому повинна використовуватись умова рівності значень ймовірностей безвідмовної роботи в обох випадках, тобто $K_\phi = t_n / t_\phi$.

Основна вимога, яка ставиться до прискорених випробувань, це ідентичність процесів старіння й зносу відносно нормальних умов, що у свою чергу, означає ідентичність законів розподілу. Для цього необхідно знати функціональні залежності коефіцієнтів прискорення K_ϕ й форсування впливових чинників Z_i , а також значення максимально можливих (з точки зору збереження адекватності фізики процесів старіння) коефіцієнтів прискорення.

Отже, в залежності від термінів і можливостей випробування можна проводити їх як в нормальних умовах, так і в прискорених режимах, базуючись на знанні коефіцієнтів прискорення.

Контрольні випробування. Розрізняють три основні методи проведення контрольних випробувань (незважаючи на залежність від рівня форсування): однократної та двократної вибірки й послідовного аналізу.

В деяких випадках проводяться прискорені контрольні випробування в нормальних умовах. Ці випробування базуються на відомій математичній моделі процесу.

Легше всього плануються контрольні випробування за методом однократної вибірки. Однак, з точки зору об'єму вибірки виробів, які необхідні для проведення випробувань, цей метод найменш економічний. Контроль за методом двократної вибірки більш економічний, але ця перевага виявляється лише при контролі великих партій з дуже низькою або дуже високою надійністю. Однак в цьому випадку оброблення

результатів більш трудомістке, тому метод двократної вибірки використовується рідко. Найбільш економічним є метод послідовного аналізу, при використанні якого середній об'єм вибірки складає $(50 \div 70)\%$ від об'єму при однократній вибірці, але при дещо більшому часі випробувань (цей недолік можна усунути шляхом більш раціональної їх організації).

Склад контрольних випробувань на надійність в загальному випадку включає перелік показників надійності, які підлягають контролю. Крім того, для визначення кожного конкретного показника надійності необхідні такі дані: приймальний P_α і бракоробний P_β рівні ймовірностей безвідмовної роботи, ризику замовника β й виробника α , метод проведення випробувань, план випробувань, перелік параметрів, що характеризують стан виробу, умови випробувань (значення впливових чинників, їх послідовність, тривалість) і вирішальне правило. Основою для планування контрольних випробувань є таблиці залежності рівня підтвердженої ймовірності безвідмовної роботи від об'єму вибірки й приймального числа. Ці таблиці складаються на базі гіпергеометричного закону розподілення (таблиці 6.1÷6.3).

Таблиця 6.1 – Об'єм вибірки n для $\beta = 0,1$

с	$P_\beta = (t)$												
	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
0	22	20	18	17	15	14	10	8	6	5	5	4	3
1	38	34	31	29	27	25	18	15	12	10	9	8	7
2	52	47	43	40	37	34	25	20	16	14	12	10	9
3	65	59	54	50	46	43	32	25	21	18	15	13	12

Таблиця 6.2 – Об'єм вибірки n для $\beta = 0,2$

с	$P_\beta = (t)$													
	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,60
0	80	53	40	32	26	22	19	17	15	10	7	6	5	3
1	149	99	74	59	49	42	37	33	29	19	14	11	9	7
2	213	142	105	85	71	60	53	47	42	28	21	16	14	8
3	275	183	137	110	91	78	68	60	54	36	27	21	18	13

Таблиця 6.3 – Об’єм вибірки n для $\beta = 0,3$

с	$P_{\beta} = (t)$													
	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,40	0,30
0	12	10	9	8	7	5	4	3	3	2	2	2	1	1
1	24	22	19	17	16	12	10	8	7	6	5	5	4	3
2	36	33	27	25	24	18	14	12	10	9	8	7	6	5
3	47	43	36	34	31	23	19	15	13	11	10	9	7	6

Можливий **спрощений план випробувань**. В цьому випадку початковими даними є кількість допустимих відмов s (приймальна кількість за час t випробувань); ймовірність безвідмовної роботи P_{β} за час t і ризик замовника β . Перед випробуваннями проводять припрацювання машин (звичайно протягом 100 год), причому машини, які вийшли з ладу, замінюють новими. Іноді з метою зменшення об’єму вибірки збільшують тривалість випробувань. Число s вибирають невеликим, щоб не збільшувати об’єм вибірки n , який визначають за таблицями 6.1÷6.3.

В результаті випробувань кількість відмов d повинна бути не більше приймальної кількості, тобто $d \leq s$ (основне правило). Якщо правило не виконується ($d > s$), то результати випробувань визнають негативними, тобто дана партія машин не задовольняє задані показники надійності.

Прискорені випробування в нормальних режимах проводять таким чином. Допустимо, що виріб (звичайно це підсилювач, перетворювач або колекторний вузол) характеризується параметричними відмовами й має безперервну характеристику “вхід-вихід”. Як приклад задамо залежність вихідного параметра в функції часу:

$$y = y_0 + a_0 \cdot t^{\alpha}. \quad (6.31)$$

Якщо задана допустима зміна параметра $\Delta y = y - y_0 = \delta$, то можна знайти середній час t_H , який необхідний для досягнення відхилення δ . Тоді з (6.31) отримаємо

$$t_H = \left[\frac{\delta}{a_0} \right]^{1/\alpha}. \quad (6.32)$$

Для прискорених випробувань встановлюють більш вузькі межі відхилення $\delta' = \frac{\delta}{m}$, де $m = (1,5 \div 5,0)$. Отже, середній час t_{ϕ} , необхідний для досягнення δ' , буде меншим t_H , а його значення можна знайти з

виразу (6.32).

Методика контрольних випробувань на надійність, розрахована на підтвердження ймовірності безвідмовної роботи виробу $P(t)$ за час t , яке задане в технічних умовах. Комплектування вибірки здійснюється методом випадкових чисел з використанням відповідних таблиць. Методика дозволяє скоротити час випробувань за рахунок форсування впливових на зношування машини чинників під час випробувань (у випадку прискорених випробувань).

Планування випробувань. Зразки виробів для випробувань відбираються з числа прийнятих технічним контролем заводу з обов'язковим проходженням припрацювання. Випробування рекомендується проводити цілодобово у форсованому режимі. Під час випробувань проводять регламентні й профілактичні роботи, які передбачені інструкціями з експлуатації.

Задають приймальне число c і за таблицями 6.1÷6.3 при відомій з технічних умов ймовірності $P_\beta(t)$ безвідмовної роботи за час t для відповідного значення β визначають необхідний для випробувань об'єм вибірки n , яка комплектується за таблицею випадкових чисел.

Нехай необхідно підтвердити $P(t) = P_\beta(t) = 0,9$ при $\beta = 0,3$ за $t = 5000$ год. Тоді за таблицею 6.3 для $\beta = 0,3$ при $c = 0$ й $P_\beta(t) = 0,9$ знайдемо, що об'єм вибірки $n = 12$.

Всі вироби, які входять в об'єм вибірки n , випробовують протягом часу t_v й за результатами випробувань роблять висновки про відповідності даної партії машин заданим показникам надійності. Якщо кількість відмов при випробуваннях $d \leq c$, то результат вважається позитивним, якщо $d > c$ – негативним.

У випадку негативного результату іноді вдається підтвердити показники надійності партії, для чого необхідно змінити план випробувань. Нехай для попереднього випадку кількість відмов $d = 1 (d > c)$. Змінимо план випробувань, прийнявши $c_1 = 1$. Тоді за таблицею 6.3 знайдемо нове значення $n_1 = 24$. Проводимо випробування нових виробів ($n_1 - n = 12$) протягом часу t_v , оскільки при цьому об'єм вибірки зменшується в порівнянні з заданим ($t_v > t$).

Прискорені випробування є циклічними. Рівні впливових чинників вибирають так, щоб забезпечити заданий коефіцієнт прискорення. Його значення задається в залежності від інтервалу варіювання впливових чинників, припущеної тривалості випробувань і можливостей його реалізації на даному підприємстві.

Визначальні випробування, як і контрольні, можуть проводитись в нормальних режимах або прискорених. Оскільки при визначальних

випробуваннях необхідно розрахувати невідому ймовірність безвідмовної роботи P або знайти закон розподілу відмов, їх тривалість перевищує тривалість контрольних випробувань. В низці випадків можна продовжувати контрольні випробування до відмови усіх машин вибірки ($d = n$), переводячи їх тим самим в розряд визначальних.

Планування випробувань. Планування при визначенні ймовірності безвідмовної роботи зводиться до визначення мінімальної вибірки n (кількість дослідів), яка необхідна для забезпечення заданої достовірності Q і точності δ оцінювання показника P . При цьому використовуються такі співвідношення:

$$d = n(1 - P^*); \quad (6.33)$$

$$P_n = P^{*(1+\delta)}, \quad (6.34)$$

де $P^* = \left(1 - \frac{d}{n}\right)$ – точкова оцінка ймовірності безвідмовної роботи;

P_n – її нижня межа.

Очевидно, що при невідомій апріорі величині P^* об'єм вибірки n залежить від результатів випробувань. Тому при плануванні випробувань необхідно задатись деяким очікуваним значенням точкової оцінки $P_{оч.} = P^*$ на основі інформації про машину (результати розрахунків надійності, технічних умов тощо).

Потім за формулою (6.34) розраховують нижню межу P_n . За таблицею, в якій нижня й верхня межі довіри P зв'язані з величиною вибірки n і кількістю відмов d при заданій достовірності Q , відмічають всі клітинки, в яких значення n і d задовольняють умову:

$$\frac{(n - d)}{n} = P_{оч.} \quad (6.35)$$

З цих клітинок вибирають ту, значення P_n в якій найбільш близьке до розрахованого за формулою (6.34), і за нею з таблиці знаходять значення n .

Оброблення результатів випробувань. Точкова оцінка ймовірності безвідмовної роботи розраховується за формулою:

$$P^* = \frac{1 - d}{n}. \quad (6.36)$$

За відомими значеннями Q , n і d з таблиці знаходять верхню та нижню довірчі межі P_B , P_H і визначають відносну довірчу похибку δ :

$$\delta = \delta_H = \frac{\ln P_H}{\lg P^*} - 1. \quad (6.37)$$

При визначенні закону розподілу відмов випробування проводяться до виходу з ладу усіх машин ($d=n$). При цьому фіксується час напрацювання експериментальних гістограм частоти відмов в функції часу, за якою за допомогою критеріїв узгодження визначається закон розподілу відмов.

Контрольні запитання

1. Встановлення щіток машин постійного струму на геометричну нейтраль.
2. Методи визначення області безіскрової роботи електричних машин.
3. Визначення параметрів синхронних машин.
4. Методи визначення максимального обертового моменту асинхронного двигуна.
5. Встановлення ротора синхронної машини в положення, при якому потік реакції якоря буде направлений по повздовжній (поперечній) осі.
6. Види випробувань на надійність.
7. Оброблення результатів контрольних випробувань на надійність.
8. Випробування трансформаторів на стійкість під час раптового короткого замикання.
9. Метод реверсування при визначенні зони безіскрової роботи машин постійного струму.
10. Визначення параметрів синхронної машини за її частотною характеристикою.
11. Визначення параметрів синхронної машини при пусконаладжувальних випробуваннях стаціонарним методом та однофазному живленні обмоток статора.
12. Визначальні випробування електричних машин на надійність.

ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 183–74**. Машины вращающиеся электрические. Общие технические требования.
2. ГОСТ 16264.0–85*. Машины электрические малой мощности. Двигатели. Общие технические условия.
3. ГОСТ 11828–86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний.
4. ГОСТ 11929–87. Машины электрические вращающиеся. Методы определения уровня шума.
5. ГОСТ 12379–75. Машины электрические вращающиеся. Методы оценки вибрации.
6. ГОСТ 25000–81. Машины электрические. Методы испытаний на нагревание.
7. ГОСТ 25941–83*. Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия.
8. ГОСТ 7217–87*. Электродвигатели трехфазные асинхронные. Методы испытаний.
9. ГОСТ 10159–79**. Машины электрические постоянного тока. Методы испытаний.
10. ГОСТ 10169–77**. Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний.
11. ГОСТ 1677–85*. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
12. ГОСТ 3484–88**. Трансформаторы силовые. Методы испытаний.
13. ГОСТ 1516.2–97. Электрическое оборудование и электрические установки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
14. ГКД 34.20.302–2002. Норми випробування електрообладнання.
15. ГКД 34.20.507–2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила.
16. Котеленец Н. В., Акимова Н. А., Антонов М. В. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.
17. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин. – М.: Высш. шк., 1990. – 255 с.
18. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
19. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
20. Цирель Я. А., Поляков В. С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.

21. Мотыгина С. А. Эксплуатация электрической части тепловых электростанций. – М.: Энергия, 1979. – 568 с.
22. Грудинский П. Г., Мандрыкин С. Л., Улицкий М. С. Техническая эксплуатация основного электрооборудования станций и подстанций. – М.: Энергия, 1974. – 576 с.
23. Баркан Я. Д. Эксплуатация электрических систем. – М.: Высш. шк. – 1990. – 304 с.
24. Кузнецов Б. В., Сацукевич М. Ф. Асинхронные электродвигатели и аппараты управления. – Минск: Беларусь, 1982. – 222 с.
25. Забокрицкий Е. М., Холодовский Б. А., Митченко А. И. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики. – К.: Наукова думка, 1985. – 702 с.
26. Справочник по монтажу силового и вспомогательного электрооборудования на электростанциях и подстанциях / Под ред. Н. А.Иванова, Н. Г.Стуса. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.

Додаток А

Програма випробувань електричних машин і трансформаторів

Таблиця А.1 – Програма приймальних випробувань електричних машин (ГОСТ 183-74*)

Випробування та перевірки		Тип машини		
		МПС	СМ	АД
1		2	3	4
1	Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками	*	*	*
2	Вимірювання опору обмоток при постійному струмі в практично холодному стані	*	*	*
3	Випробування при підвищенні частоти обертання	*	*	*
4	Випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини та між обмотками на електричну міцність	*	*	*
5	Випробування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність	*	*	*
6	Визначення струму збудження генератора або частоти обертання двигуна при холостому ході	*	-	-
7	Перевірка комутації при номінальному навантаженні й короткочасному перевантаженні за струмом	*	-	-
8	Визначення характеристики холостого ходу	+	*	-
9	Визначення робочої (швидкісної) характеристики (для двигунів)	+	-	-
10	Визначення зовнішньої характеристики (для генераторів)	+	-	-
11	Визначення регульовальної характеристики	+	-	-
12	Випробування на нагрів	+	+	+
13	Визначення області безіскрової роботи й перевірка якості комутації	+	-	-
14	Визначення ККД	+	+	+
15	Вимірювання вібрацій	+	+	+
16	Вимірювання биття колектора (якщо це встановлено в стандартах на окремі види машин)	+	-	-
17	Вимірювання радіоперешкод	+	-	-
18	Вимірювання рівня шуму	+	+	+
19	Визначення характеристики усталеного короткого замикання	-	*	-

Продовження таблиці А.1

1		2	3	4
20	Визначення струму третьої гармоніки (при з'єднанні обмотки якоря в трикутник)	-	+	-
21	Вимірювання струму збудження в режимі ненавантаженого перезбудженого двигуна й визначення U-подібної характеристики	-	+	-
22	Визначення регульовальної характеристики, номінального значення струму збудження й зміни напруги	+	+	-
23	Випробування на короткочасне перевантаження за струмом	-	+	+
24	Випробування механічної міцності при ударному струмі КЗ	-	+	-
25	Визначення коефіцієнта викривлення синусоїдальної кривої лінійної напруги	-	+	-
26	Визначення індуктивних опорів і постійних часу обмоток (для машин з $S > 100$ кВ·А)	-	+	-
27	Випробування електромашинного збудника	-	+	-
28	Визначення швидкості зростання напруги збудника синхронного генератора й компенсатора	-	+	-
29	Визначення початкового пускового та мінімального обертового моменту й початкового пускового струму	-	+	+
30	Перевірка стану ущільнень	-	*	-
31	Визначення коефіцієнта трансформації (АД з фазним ротором)	-	-	*
32	Визначення струму й втрат холостого ходу	-	-	*
33	Визначення струму й втрат короткого замикання	-	-	*
34	Визначення коефіцієнта потужності й ковзання	-	-	+
35	Визначення максимального обертового моменту	-	-	+

Примітка. Знаком "*" позначені пункти приймальних випробувань, які входять у програму приймально-здавальних випробувань; знак "-" означає, що це випробування не проводиться; знак "+" – проводиться. МПС – машина постійного струму; СМ – синхронна машина; АД – асинхронний двигун.

Таблиця А.2 – Програма приймальних випробувань двигунів малої потужності (ГОСТ 16264-85*)

Вид випробувань і перевірок		Тип двигуна			
		АД	СД	К	БК
1	Перевірка зовнішнього вигляду	+	+	+	+
2	Перевірка приєднувальних розмірів та биття кінця вала, що виступає	+	+	+	+
3	Перевірка напрямлення обертання та маркірування вивідних кінців обмоток	+	+	+	+
4	Вимірювання опору обмоток постійному струму в практично холодному стані	+	+	+	+
5	Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу	+	+	+	+
6	Перевірка електричної міцності ізоляції обмоток відносно корпусу	+	+	+	+
7	Випробування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність	+	+	+	+
8	Визначення струму й втрат холостого ходу	+	+	-	-
9	Визначення струму й втрат КЗ	+	+	-	-
10	Перевірка струму й частоти обертання при номінальному навантаженні й максимально допустимому значенні напруги керування	-	-	-	+
11	Визначення напруги зрушування	-	-	-	+
12	Перевірка комутації в номінальному режимі та при короткочасному перевантаженні за струмом	-	-	+	-
13	Перевірка рівня звуку	+	+	+	+

Примітка. Знак "-" означає, що дане випробування не проводиться, знак "+" – проводиться; АД – асинхронні двигуни; СД – синхронні двигуни; К – колекторні; БК – безколекторні.

Таблиця А.3 – Програма типових випробувань трифазних трансформаторів потужністю 6,3 кВ·А й більше (ГОСТ 11677-85*)

Вид випробувань і перевірок		Примітка
1	Зовнішній огляд і перевірка на відповідність кресленням	*
2	Перевірка коефіцієнта трансформації й групи з'єднань обмоток	*
3	Випробування проби масла (або рідинного діелектрика) з бака трансформатора	*
4	Визначення опору обмоток постійному струму	*
5	Визначення параметрів ізоляції	*
6	Випробування електричної міцності ізоляції однохвилинною випробувальною напругою промислової частоти	*
7	Випробування електричної міцності ізоляції напругою промислової частоти з вимірюванням часткових розрядів (для класів напруги 150 кВ і вище)	*
8	Перевірка струму й втрат холостого ходу	*
9	Перевірка струму й втрат АЗ	*
10	Випробування бака трансформатора на щільність	*
11	Випробування пристроїв перемикання відгалужень обмоток	*
12	Вимірювання опору нульової послідовності	
13	Випробування внутрішньої ізоляції грозовими імпульсами напруги	
14	Випробування електричної міцності повітряних проміжків	
15	Випробування на нагрів	
16	Випробування на стійкість при КЗ (для трифазних трансформаторів потужністю 125 МВА включно)	
17	Випробування бака на механічну міцність	
18	Випробування активної частини на механічну міцність	
19	Перевірка рівня звуку	

Примітка. Зіркою позначені пункти типових випробувань, які входять у програму приймально-здавальних випробувань.

Додаток Б

Випробувальні напруги для електричних машин і трансформаторів

Таблиця Б.1 – Випробувальна напруга при перевірці електричної міцності ізоляції обмоток електричних машин (ГОСТ 183-74*)

Електричні машини або її частини		Випробувальна напруга (діюче значення)
1		2
1	Машини потужністю менше 1 кВт (кВ·А) на номінальну напругу менше 1000 В (за виключенням вказаних у п.п. 4÷8)	500 В плюс двократна номінальна
2	Машини потужністю 1 кВт і вище на номінальну напругу менше 100 В (за виключенням вказаних у п. 4)	1000 В плюс двократна номінальна
3	Машини потужністю до 1000 кВт (за виключенням вказаних у п.п. 1, 2, 4÷8)	1000 В плюс двократна номінальна, але не менша 1500 В
4	Машини потужністю 1000 кВт і вище (за виключенням вказаних у п.п. 4÷8) на номінальну напругу - до 3,3 кВ включно - більше 3,3 до 6,6 кВ включно - більше 6,6 до 17 кВ включно - більше 17 кВ	1000 В плюс двократна номінальна; 2,5 – кратна номінальна; 3000 В плюс двократна номінальна; за узгодженням між споживачем та виробником
5	Обмотки збудження машин постійного струму з незалежним збудженням	1000 В плюс двократна номінальна напруга збудження, але не менша 1500 В

Продовження таблиці Б.1

1		2
6	Обмотки збудження синхронних машин: - СМ, які пускаються спеціальними пусковими двигунами; - СМ для безпосереднього пуску з обмоткою збудження, яка замкнена на опір, але не більше 10-кратного опору обмотки збудження; - те ж, але при опорі більше 10-кратного	10-кратна номінальна напруга збудження, але не менша 1500 В і не більша 3500 В; те саме; 1000 В плюс двократна максимальна пускова, але не менша 1500 В
7	Вторинні обмотки АД, які не знаходяться постійно в короткозамкненому стані: - для АД, які допускають гальмування противвімкненням - для АД, які не призначені для гальмування противвімкненням	1000 В плюс чотири-кратна номінальна напруга цієї обмотки 1000 В плюс дво-кратна номінальна
8	Збудники	як для обмоток, до яких вони приєднуються

Таблиця Б.2 – Нормована випробувальна напруга для трансформаторів класу напруги до 35 кВ включно (ГОСТ 1516.3-96)

Напруга	Клас напруги трансформатора								
	до 0,69	3	6	10	15	20	24	27	35
Найбільша робоча	-	3,6	7,2	12	17,5	24	26,5	30	40,5
Випробувальна одноквилинна	5	18	25	35	45	55	65	70	75

Додаток В

Допустимі значення рівнів шуму та вібрації для електричних машин і трансформаторів

Таблиця В.1 – Допустимі значення середніх рівнів звуку на відстані 1 м від контура машини для електричних машин класу 1 зі ступенем захисту IP44 (IP22) у режимі холостого ходу (ГОСТ 16372-93)

Номинальна потужність, кВт	Граничні значення середніх рівнів звуку (дБА) при номинальній частоті обертання (об/хв)					
	600÷900	900÷1320	1320÷1900	1900÷2360	2360÷3150	3150÷3750
0,25÷1,1	67(64)	70(67)	71(69)	74(72)	75(75)	79(78)
1,1÷2,2	69(65)	70(68)	73(71)	78(75)	80(78)	82(81)
2,2÷5,5	72(68)	74(71)	77(75)	82(78)	83(81)	85(84)
5,5÷11	75(72)	78(75)	81(78)	86(81)	87(84)	90(87)
11÷22	78(75)	82(78)	85(81)	87(85)	91(87)	93(90)
22÷37	80(77)	84(81)	86(83)	89(85)	92(88)	95(92)
37÷55	81(79)	86(83)	88(86)	92(88)	94(90)	97(93)
55÷110	84(82)	89(85)	92(88)	93(90)	96(92)	98(95)
110÷220	87(85)	91(87)	94(90)	96(93)	98(95)	100(96)
220÷400	88(86)	92(90)	96(92)	98(94)	99(95)	102(98)
400÷630	89(88)	93(92)	97(94)	99(95)	100(96)	103(98)
630÷1000	91(90)	95(93)	98(95)	100(96)	101(97)	104(99)

Таблиця В.2 – Співвідношення між рівнями вібрації, вібраційними швидкостями та вібраційними прискореннями

L, дБ	v_{cp} , мм/с	a, м/с ²
0	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
10	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$9,49 \cdot 10^{-4}$
20	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
30	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$9,49 \cdot 10^{-3}$
40	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
50	$1,58 \cdot 10^{-2}$	$9,49 \cdot 10^{-2}$
60	$5 \cdot 10^{-2}$	0,33
70	0,158	0,949
75	0,281	1,69
79	0,446	2,67
83	0,707	4,24
87	1,12	6,72

Продовження таблиці В.2

L, дБ	v_{cp} , мм/с	a , м/с ²
91	1,77	10,6
95	2,81	16,9
99	4,46	26,7
103	7,70	42,4
107	11,2	62,7
110	15,8	94,9
120	50	300
130	158	949

Таблиця В.3 – Шум трансформаторів загального призначення з магнітопроводами з холоднокатаної сталі марок 3413, 3415 і 3416 товщиною 0,30 і 0,35 мм (ГОСТ 12.2.024-76)

Типова потужність, МВА	Допустимий рівень звуку L_A (дБА), не більше для класу напруги трансформатора (кВ)					
	6,10	35	110,154	220	330	500,750
0,10	47	52	-	-	-	-
0,16	49	54	-	-	-	-
0,25	51	55	-	-	-	-
0,40	53	57	-	-	-	-
0,63	55	59	-	-	-	-
1,00	57	60	-	-	-	-
1,60	59	62	-	-	-	-
2,50	61	63	66	-	-	-
4,00	63	65	68	-	-	-
6,30	65	67	70	-	-	-
10	-	68	71	73	-	-
16	-	70	73	75	-	-
25	-	72	75	77	-	-
40	-	74	76	78	79	-
63	-	75	77	79	80	81
100	-	-	81	83	84	85
160	-	-	83	85	86	87
250	-	-	85	87	88	89
400	-	-	86	88	89	90
630	-	-	-	89	90	91
1000	-	-	-	-	91	92

Додаток Г

Словник найбільш використовуваних термінів

вимірювання температури	temperature measurement
вимірювання шуму	audio measurement; noise measurement; noise-power measurement
випробувальний трансформатор	test(ing) transformer
випробування	test, testing
випробування періодичні	periodic test; sampling test
випробування приймальні	acceptance test; approval test
випробування типові	standard test; type test
вібрація	vibration
втрати в сталі	core loss; iron loss
в'язкість масла	oil viscosity
газохроматографія	gas chromatography
генератор	generator
давач	measuring element, sensor
динамічна стійкість	dynamic(al) stability
діагностування	maintenance diagnosis
домішки	impurity
експлуатація	operation
елегаз	sulfur hexafluoride
електрична міцність	dielectric strength
електродвигун	electric motor
еталон вторинний	secondary standard
еталон первинний	primary standard
еталон робочий	working standard
зворотна послідовність	reverse sequence; inverted sequence
зразкова ємність	calibrating capacitor; reference capacitor; standard capacitor
ізоляція міжвиткова	minor insulation
ізоляція обмотки	primary insulation
іскріння	sparking; brush sparking
кислотне число	acid number; acidity index; neutralization number

клас точності	accuracy class; accuracy rating
ковзання	slip, slipping
коефіцієнт корисної дії	efficiency
коротке замикання	short circuit
кут діелектричних втрат	dielectric loss angle; lose angle
магнітострикція	magnetostriction
машина асинхронна	asynchronous machine
машина електрична	electric machine
машина колекторна	commutator machine
машина синхронна	synchronous machine
мегомметр	megohm meter; high-resistance ohmmeter
метод взаємної індукції	mutual induction method
метод вольтметра та амперметра	voltmeter-ammeter method
метод калориметричний	calorimetric method
метод омметра	method of resistance meter
метод стробоскопічний	stroboscopic method
метод термопар	method of thermocouple
місток Віна	Wien bridge
місток Томсона	double bridge; Thomson bridge
місток Уінстона	Wheatstone bridge; resistance bridge; electric balance
момент інерції	moment of inertia
надійність	reliability
напруга змінна	ac voltage; alternating voltage
напруга постійна	dc voltage; direct voltage
напруга пробивна	punch-through voltage; disruption voltage
нульова послідовність	null sequence
обмотки	coil; winding
опір ізоляції	dielectric resistance; insulation resistance
осцилограф	oscilloscope
потужність корисна	operating power; useful power
потужність номінальна	rated power
ротор	rotor

статор	stator
струм змінний	alternating current
струм постійний	direct current
температура спалаху	flash temperature
терморезистор	temperature-sensitive resistor; thermistor
трансформатор	transformer
трансформатор напруги	voltage measuring transformer
трансформатор струму	current transformer
трансформаторне масло	transformer oil
фотодавач	photodetector; photosensor
холостий хід	tickover; idling
частота	frequency; rate
швидкість обертання	rotation(al) rate
шум аеродинамічний	aerodynamic noise
шум вентиляторів	blower noise, fan noise
шум магнітний	magnetic noise
шум підшипників	bearing noise
шум щіток	brush noise
шунт вимірювальний	instrument shunt
щітка вугільна	carbon(-baked) brush
щітка графітова	graphite brush
щіточний контакт	brush collector; brush contact
якір	armature

Навчальне видання

**Лагутін Валерій Михайлович
Зелінський Віктор Цезаревич
Бурикін Олександр Борисович**

**ВИПРОБУВАННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ТРАНСФОРМАТОРІВ
В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Навчальний посібник

Редактор О. Скалоцька

Оригінал-макет підготовлено О. Бурикіним

Підписано до друку .
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. .
Тираж прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.