

Е. А. ВОРОТЕЛЯК, канд. техн. наук, доц., Г.В. КОЛОМІЦ, асистент,
А.С. КУЗЬМЕНКО, ст. викладач, Криворізький національний університет

ПИТАННЯ ПІСЛЯРЕМОНТНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГЛИБОКОПАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Асинхронний двигун, це найпоширеніша електрична машина у світі. Режими роботи та експлуатації різноманітні, в наших умовах виробництва не завжди сприятливі до довгострокової роботи машини. Також не завжди витримуються рекомендації заводом виробником навантаження на машину. У зв'язку з цим багато машин виходять з ладу по різним причинам пов'язаних з експлуатацією. Завдяки такій розповсюдженості на наших підприємствах, багато з них мають власні майстерні з ремонту цих машин. Коли надходить асинхронний двигун до ремонту, не завжди машина проходить повну дефектацію, що призводить до того що, асинхронні двигуни з незначними внутрішніми ушкодженнями проходять повний цикл ремонту. Це призводить до значних матеріальних затрат. У даній статті проаналізовані основні види відмов глибокопазних асинхронних двигунів та способи їх виявлення та дефектації в умовах виробництва. Проаналізовано причини фактори, які впливають на надійність роботи, інтенсивність відказів післяремонтної експлуатації глибокопазного асинхронного двигуна. Дано рекомендації щодо ремонту глибокопазних асинхронних двигунів.

Якщо при цьому маємо достатню кількість станків та пристроїв для видалення і демонтажу обмоток із пазів, то це в дозволяє персоналу, з ухваленням інших причин, зберегти параметри згідно паспортних даних. В іншому разі видаляють обмотку методом «випалювання». Це погіршує екологію у цеху, знижується магнітна проникливість електротехнічної сталі і робочі параметри машин. Звичайно величина магнітної індукції для ЕМ у межах $B_0=12\div 2$ Тл. Звідси струм навантаження номінальний по первинному паспорті може бути в два рази менше при зниженні магнітної індукції 30-50%. Тому при виконанні статора і ротора машин глибокопазних АД необхідна перевірка сталі, та її втрат при термічній обробці в процесі випалювання.

Ключові слова: електрична машина, асинхронний двигун, магнітна індукція, статор, ротор.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Сьогодні серед електро-механічних пристроїв особу групу складають асинхронні машини (АМ), які найчастіше виконуються з роздільними магнітопроводами та обмотками. Магнітна взаємодія первинної (статор) і вторинної (ротор) систем в значній мірі визначає відповідний варіант конструктивного виконання магнітопроводу цих систем.

Роторна обмотка у вигляді «біляча клітка» є однією з самих простих, надійних і дешевших. Цим пояснюється найбільше розповсюдження асинхронних двигунів (АД). При цьому, крім звичайної конструкції короткозамкненого (кз) ротора у вигляді «біляча клітка», широко використовуються різні модифікації АД з потужністю більш 100 кВт, які мають різні особливості. За способом виконання ротора вони діляться на багатоклітинні (звичайні двохклітинні), з глибокими пазами (глибокопазні), або з пазами розташованими у нижчій частині ротора. З усіх модифікацій можна виділити особливу групу до якої можна віднести АД великої потужності серії А4 і ДА304, ДА30 1910-12 з номінальною потужністю $P_n=1700$ кВт, з колбоподібною формою паза ротора, які призначені для приводу механізму, які не потребують регулювання частоти обертання (димососи, насоси, вентилятори та ін.). Номінальна напруга АД основного виконання 6 кВ. Перетин стрижнів глибокопазного ротора може бути прямокутного перетину, колбоподібного, трапецеїдального, причому при трапецеїдальному профілю стрижня, пускові властивості двигуна зберігаються такими ж високими як і при прямокутній формі профілю.

Аналіз досліджень та публікацій. В останні роки, особливо для швидкохідних і потужних двигунів, обмотки з стрижнями колбоподібного і трапецеїдального профілю, рис. 1 [1].

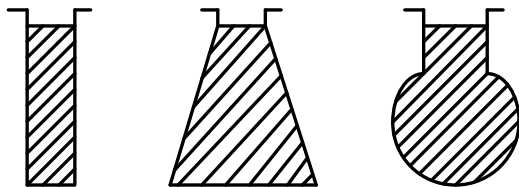


Рис. 1. Пази короткозамкнених АД з поліпшеними пусковими властивостями: а - прямокутного профілю; б - трапецеїдального профілю; в - колбоподібного профілю

При розробці моделей АД за каталожними даними враховували раніш тільки один фактор - «поверхневий ефект», тобто витискання струму в стрижнях обмотки ротора к поверхні. Це приводило до похибок, при розрахунках двигунів з неповністю розкритими пазами або з напівзакритими пазами. Крім того, в електромашиних обов'язково треба враховувати вплив повітряного зазору. Магнітне поле всередині сталі ротора є складним, але через високу магнітну проникність сталі, його розподіл можливо дослідити тільки у повітряному зазорі, чи в безпосередній близькості від ньо-

го. Звідси теорія, насамперед, цікавиться процесами, які протікають у зазорі та навколо нього. У реальній машині провідники розташовані не в самому повітряному зазорі, а в пазах осердя ротора, який набирається з листів електротехнічної сталі з присутнім між полюсним простором.

Для теоретичного аналізу дійсні провідники замінюються еквівалентними, які розташовуються на поверхні ротора і припускається, що вони мають найменший перетин.

При цьому для типів АД з поліпшеними пусковими характеристиками, внаслідок використання глибокопазного ротора, необхідно враховувати явище витискання струму до поверхні, а також насичення сталі по шляхам основного потоку і потоку розсіювання (у напрямку до повітряного зазору зменшується ширина паза) [2,3]. Ці потоки розсіювання розташовані в пазах ротора, а не на поверхні. Крім цього ще є потік зубцевого розсіювання, який не проникає в глибоке осердя, щоб створити зчеплення з обмоткою розташованою в другій частині машини. Також слід звернути увагу на те, що обмотка створює гармонічні складові потоку, які перетинають повітряний зазор. Ці потоки створюють зчеплення з другою обмоткою, але не відносяться до головного потоку, який створений основною гармонікою поля. У рівняннях АД ця особливість не враховується в зв'язку з різною частотою в контурах електрорушійної сили. Електрорушійну силу, яка наводиться гармонікою потоку, може бути враховано тільки в обмотці, що створює даний потік. Потік розсіювання, зчеплений з даною обмоткою від дії гармонійної складової, еквівалентно зростає. Таке зростання потоку називають поясове розсіювання. Такі не враховані гармоніки можуть привести к значним неточностям у розрахунках, якщо машина невдалої конструкції. Вплив вищих гармонік на криві ЕРС і магнитоерушійних сил (МРС) можливо зменшити правильним вибором числа та розмірів пазів, скосу пазів, типу та кроку обмоток, або іншими відомими засобами. Це більш детально викладено в роботі [2].

Постановка задачі. Визначити ефективні та прості способи дефектації глибокопазних асинхронних двигунів в умовах виробництва.

Викладення матеріалу та результати. Зовнішні ознаки наявності обривів стержнів - підвищена вібрація і шум при роботі, що збільшуються із зростанням навантаження. Характерно, що шум і вібрація періодично змінюються з частотою, яка дорівнює подвоєній частоті ковзання.

Стрілки амперметрів, включених в коло живлення електродвигунів з обривами стержнів короткозамкнених обмоток роторів, коливаються через періодичні зміни ефективних значень струмів в фазах. Спосіб вимірювання струмів в обмотках статора, рис. 2.

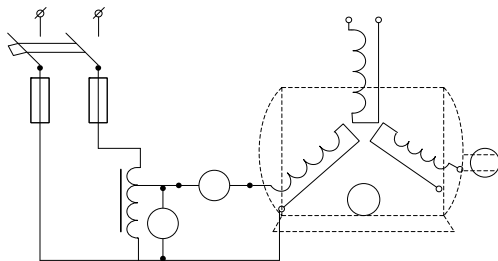


Рис. 2. Схема для визначення обривів стержнів короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів

1. При прокрутці ротора вручну вимірювання струмів в обмотках статора дозволяє встановити наявність обривів стержнів у короткозамкнених обмотках асинхронних електродвигунів. Одну або дві фази обмотки статора електродвигуна включають на напругу змінного струму, рівну 10-15 % номінальної, і при повільному обертанні ротора вручну

вимірюють струм в колі живлення. Для визначення зміни струму зручно використати самописний амперметр. Більш чутливий спосіб при подачі напруги на одну фазу обмотки, ніж на дві фази. Якщо при обертанні ротора струм в обмотці статора не змінюється, обриви в стержнях обмотки ротора відсутні. Зміна струму при обертанні ротора вказує на наявність обриву стержнів, залежить від числа пошкоджених стержнів і їх взаємного розташування, але визначити число обірваних стержнів по відхиленню стрілки амперметра важко. Після виявлення факту наявності обриву стержнів електродвигун підлягає розбиранню і точному встановленню числа обірваних стержнів [6].

2. Метод контролю стержнів короткозамкнених обмоток ротора заснований на використанні залежності ковзання електродвигунів від числа обірваних стержнів. Він полягає в тому що, при визначенні числа обірваних стержнів, вимірюють ковзання електродвигуна при заданому навантаженні та температурі і отриману величину порівнюють з контрольною, вимірною на електродвигуні з ротором, що не має обривів. Для використання цього методу необхідно мати еталонні криві залежності ковзання від навантаження для конкретних типів електродвигунів, що обмежує застосування способу на виробництві.

3. Спосіб визначення міри пошкодження короткозамкнених обмоток ротора, доступ до валів яких ускладнений або неможливий, заснований на припущенні, що при нерухомому роторі, який

має пошкодження короткозамкненої обмотки, струм в фазах залежить від положення ротора відносно статора. Для визначення технічного стану стрижнів за допомогою збудження фазової обмотки статора ротор електродвигуна повертають на певні кути (крокове обертання).

Після кожного повороту обмотку статора підключають до стабілізованої напруги змінного струму і самописним амперметром записують струм. Крокове обертання продовжують доти, поки ротор не зробить повний оберт [7].

В електродвигунах ця зміна порівняно велика. Так при обриві чотирьох розташованих поряд стрижнів при повороті ротора на один оберт ефективне значення струму змінюється на 42% середньої величини.

На рис. 3 зображено схему визначення пошкоджень короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів.

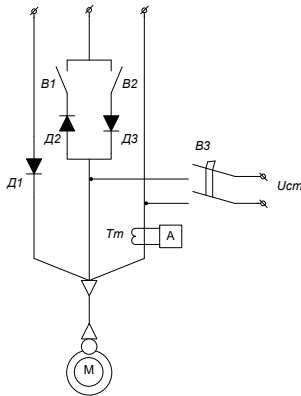


Рис. 3. Схема для визначення ступеню пошкодження короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів

Для крокового переміщення ротора статор електродвигуна М включають в мережу змінного струму через діоди Д1, Д2, Д3. Включенням і вимкненням В1 і В2, які з'єднані послідовно з діодами здійснюється крокове переміщення. Для крокового переміщення ротора можна застосовувати і інші схеми, наприклад, з керованими вентилями. Вимірювальна частина схеми складається з самопишучого амперметра А, який реєструє струм через трансформатор струму.

Після кожного переміщення ротора обмотки статора відключають від електричної мережі, на клемі вимикачем В3 подають стабілізовану напругу і амперметром А записують значення струму в обмотках.

При відсутності пошкоджень в короткозамкненій обмотці ротора струм буде однаковим при всіх положеннях ротора.

Якщо короткозамкнена обмотка ротора має обриви стрижнів, струм буде залежати від положення ротора відносно обмоток статора, при цьому зміна струму буде тим більше, чим більше число стрижнів мають пошкодження. По зміні струмів при різних положеннях ротора в межах одного оберту оцінюють технічний стан короткозамкненої обмотки.

Міру пошкодження обмотки ротора при локальному (місцевому) розташуванні дефектів визначають за формулою

$$\gamma = K_k \cdot \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100\%$$

де γ - міра пошкодження обмотки, %; K_k - коефіцієнт конструктивних особливостей електродвигуна; I_{\min} , I_{\max} - найбільше і найменше значення вимірюваних струмів, А.

Експериментальні дані показують, що для електродвигунів ($K_k=1$), обмотка ротора, яка має 24 стрижні, при обриві двох γ дорівнює 9,8 %, а при обриві чотирьох дорівнює 28 %. Допустиме значення γ для цих електродвигунів становить 10 % [10-13].

4. Спосіб визначення технічного стану короткозамкнених обмоток ротора, що не вимагає зупинки двигуна, доступ до валу якого ускладнений або неможливий, заснований на визначенні зв'язку між частотою модуляції струмів електродвигунів, у яких короткозамкнена обмотка має дефекти, і залежністю ковзання електродвигуна від навантаження і числа пошкоджених стрижнів.

У електродвигунів, що мають пошкодження стрижнів, в зв'язку з періодичною зміною магнітного опору фаз під час обертання ротора, має місце модуляція струмів, споживаних з електричної мережі. Значення модуляції струмів залежить від числа пошкоджених стрижнів і від їх взаємного розташування, а частота модуляції визначається тільки значенням ковзання [9].

Значення ковзання електродвигуна залежить від навантаження і стану короткозамкнених обмоток роторів (числа стрижнів з обривами і послабленнями). Ковзання електродвигунів збільшується із збільшенням числа пошкоджених стрижнів. Так для АД потужністю 8 кВт, при обриві 2,4,6 стрижнів ковзання збільшується відповідно 8,17 і 41 %.

З моменту початку експлуатації електричних машин багато промислових підприємств скаржаться на малий строк служби після ремонту. Це пов'язано зі специфікою ремонтних підприємств

емств, їх умов роботи, наявності ремонтного обладнання, складності ремонту, потужності великих електричних машин (ЕМ), а звідси проблеми транспортування, якщо нема спеціалізованих підприємств на місцях. Як показує статистика, ремонтуються ЕМ значно більше, ніж випускається нові заводами виробниками.

Для асинхронних машин вихід з ладу після ремонту в процесі експлуатації впродовж кількох місяців пов'язаний, крім вище вказаних причин, з відсутністю технічного рівня проведення ремонту, технічної діагностики обмоток ЕМ, технічного стану корпусної, міжфазної та міжвіткової ізоляції (її класу), визначення температурного режиму.

На багатьох електроремонтних підприємствах при ушкодженні обмоток великих і потужних АД відбувається повна заміна обмоток. Якщо при цьому маємо достатню кількість станків та пристроїв для видалення і демонтажу обмоток із пазів, то це в дозволяє персоналу, з врахуванням інших причин, зберегти параметри згідно паспортних даних. В іншому разі видаляють обмотку методом «випалювання». Це погіршує екологію у цеху, знижується магнітна проникливість електротехнічної сталі і робочі параметри машин. Звичайно величина магнітної індукції для ЕМ в межах $B_0=12\div 2$ Тл. Звідси струм навантаження номінальний по первинному паспорті може бути в два рази менше при зниженні магнітної індукції 30-50 %. Тому при виконанні статора і ротора машин глибокопазних АД необхідна перевірка сталі та її втрат при термічній обробці в процесі випалювання.

Висновки та напрямок подальших досліджень. При підготовці машини до ремонту необхідно ретельно визначатися з дефекацією АД.

Проводити післяремонтні випробування з врахуванням впливу «поверхневого ефекту», «потоків розсіювання», гармонійних складових потоку від обмоток.

Враховувати зміну типу обмоток, даних обмоток, клас ізоляції, методи її видалення.

При експлуатації проводити профілактику і технічну діагностику.

Список літератури

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины / **А.В. Иванов-Смоленский** // Москва, «Энергия», 1980.
2. **Адкинс Б.** Общая теория электрических машин / **Б. Адкинс** // Москва, «Госэнергоиздат», 1960.
3. **Воротеляк Э.А.** Прогнозирование рабочих характеристик глубокопазного асинхронного двигателя по каталожным данным / **Э.А. Воротеляк** // Академический вестник, 2007. - №19.
4. **Бергер А.Я., Поклонов С.В.** Приближенное определение параметров схемы замещения двигателя мощностью выше 100 кВт по каталожным данным / **А.Я. Бергер, С.В. Поклонов** // Электромеханика, 1974. - №3
5. **Сивокобыленко В.Ф. Костенко В.И.** Математическое моделирование глубокопазных асинхронных машин. Электричество №4, 1980г.
6. **Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин** Надежность электрических машин / **Ермолин Н. П., Жерихин И. П.** // Издательство «Энергия», Ленинград, 1976.
7. **В.П. Таран** Диагностирование электрооборудования / **Таран В.П.** // Издательство «Техника», Киев, 1983.
8. **Ю.Б. Гук** Теория надежности в электроэнергетике / **Гук Ю.Б.** // Издательство «Энергоатомиздат», Ленинград, 199.
9. **Костенко, Л.М. Пиотровский** Электрические машины / **Костенко, Л.М. Пиотровский** // Л.: «Энергия», 1973.
10. **Г.К. Жерве** «Промышленные испытания электрических машин». М.: «Госэнергоиздат», 1959.
11. **Sazhin B.I., Kaniskin V.A., Kostenko E.M., Levandovskaya Ye. V. and Tadzhibayev A.I.** Arapid Method for Determining the Servise Life of Polimerinsulated Cables // Electrical Technology, Pergamon, Elsevier Science Ltd., 1997.- №3.Р.11-17.
12. **Andrade, C. T. C.** Análise de Métodos para Determinação da Eficiência de Motores de Indução Trifásicos / **Andrade, C. T. C.** // Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2009.
13. **S. Sakamoto, T. Hirata, T. Kobayashi, and K.Kajiwara,** “Vibration analysis considering higher harmonics of electromagnetic forces for rotating electric machines,” IEEE Transaction on Magnetic, Vol. 35, No. 3, pp. 1662-1665, 1999.