

О. В. Виговський

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

ДІАГНОСТИКА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ БЛОКІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Запропоновано методику діагностування вироблення підшипників ковзання асинхронних двигунів на основі змінення амплітудних значень електромагнітної індукції у повітряному проміжку машини. Методика є економічною та простою при реалізації й дає можливість діагностування стану підшипників під час роботи електричної машини без відключення її від мережі живлення. Дано деякі рекомендації щодо розширення та автоматизації діагностування. Застосування запропонованої методики разом з іншими відомими суттєво підвищить достовірність діагностування електричних машин.

Ключові слова: асинхронний двигун, підшипники ковзання, діагностика.

Забезпечення нормальної експлуатації асинхронних двигунів є важливою задачею, так як вони використовуються більше, ніж будь-які інші електричні машини [8]. Однак під час роботи асинхронного двигуна можуть виникати різного роду uszkodження елементів, що призводить до передчасного виходу його з ладу. Як свідчать статистичні дані, uszkodження підшипникових вузлів асинхронних двигунів становлять 15 – 20 % від усіх інших видів дефектів. Тобто можна стверджувати, що вироблення підшипника є одним із дефектів, який часто виникає у практиці експлуатації асинхронних двигунів.

Ушкодження (вироблення) підшипників призводить до нерівномірності немагнітного повітряного проміжку між статором і ротором, а оскільки у асинхронного двигуна цей проміжок малий, то виникає ексцентриситет ротора, який є причиною підсилення вібрацій і прискорення подальшого спрацювання підшипників. У результаті значного ексцентриситету ротора погіршуються показники машини: коефіцієнт корисної дії знижується до 3 %, максимальний та пусковий моменти зменшуються в межах 20 і 8 % відповідно, ковзання збільшується на 10 % [5]. У найбільш важких випадках можливе торкання ротора за внутрішню поверхню статора, що у свою чергу призводить до додаткового нагрівання в місці торкання та механічних пошкоджень поверхні ротора та статора. Виникаючі при цьому пошкодження потребують проведення тривалого відновлювального ремонту двигуна. Витрати в цьому випадку близькі до вартості нової машини.

На сьогодні до числа найбільш відомих методів контролю нерівномірності повітряного проміжку можна віднести вібраційні методи [1 – 3], метод контролю за величиною синхронного індуктивного опору [6], а також метод контролю за величинами індуктивного опору короткого замикання та нульової послідовності [7]. Лише у ряді стаціонарних систем контролю вібрації *крупних машин* (переважно турбогенераторів) із підшипниками ковзання використовуються датчики коливного зсуву, що вбудовані у підшипник (по два датчики в підшипник); ці датчики дозволяють вимірювати траєкторію руху центра вала у підшипниках (його орбіту) і, тим самим, безпосередньо визначати величину зносу вкладишів. Останні ж методи не знайшли широкого застосування у промисловості через причини таких недоліків:

вимога відключення електричної машини від мережі живлення з попередньою підготовкою робочого місця;

необхідність використання зовнішніх джерел постійного чи змінного струмів;

значний час проведення діагностичного випробування (до 3 – 4 годин).

У даній роботі пропонується методика діагностування вироблення підшипників, яка виключає вказані недоліки та проста у використанні. Вона ґрунтується на аналізі змінення амплітудних значень електромагнітної індукції під час експлуатації електричної машини.

Достовірна (вірогідна) діагностика електричних машин можлива з результатів аналізу їхніх електромагнітних параметрів:

виявлення дефекту супроводжується, як правило, значним підвищенням амплітуди електромагнітних параметрів у повітряному проміжку; хоча ці змінення мають місце безпосередньо в зоні дефекту, вони можуть спостерігатися засобами діагностики й на віддаленні від цієї зони, так як вільно розповсюджуються у конструктивному об'ємі машини [9].

діагностування можна проводити без розбирання та зупину машини, у тому числі й у процесі її експлуатації.

© О. В. Виговський, 2018

Таким чином, якщо в повітряному проміжку встановити датчики магнітної індукції, зміщені в просторі по колу на деякий кут, то при дефектах підшипника, що приводять до появи ексцентриситету, показання цих датчиків будуть відрізнятися за діючими та миттєвими значеннями індукції, які вимірюються в той самий момент часу.

При наявності дефекту підшипника магнітне поле в повітряному проміжку машини, як і поле, витиснене з проміжку, змінюється, тому датчики можуть встановлюватися для зручності на гладкій торцевій частині статора (ближче до ротора) машини. Для реалізації запропонованої методики у високовольтних асинхронних двигунів датчики магнітного поля можна встановлювати у вигляді витка, навитого на зубці статора. В якості датчиків можуть бути використані індуктивні котушки. На полюсну поділку електричної машини потрібно встановлювати щонайменше два датчики магнітного поля у протилежному напрямку. За значенням магнітної індукції можна зробити висновок про наявність дефекту підшипника, якщо він присутній, - в одному з датчиків магнітна індукція збільшиться, а в іншому зменшиться. Виміряні з датчиків два значення діючої індукції порівнюються між собою. Якщо їхні значення відрізняються на $X\%$, то з бази знань індукцій датчиків, залежно від ступеня розвитку дефекту, знаходяться вироблення підшипників. Значення X знаходиться як мінімальне, коли вироблення підшипників не впливає на робочі характеристики двигунів. Схема установки датчиків визначається з урахуванням уживаних способів діагностування, причому для кожної конструкції асинхронного двигуна контрольні точки установки деяких датчиків повинні коригуватися. Також необхідно мати на увазі, що підшипники ковзання мають різну піддатливість у вертикальному та горизонтальному напрямках [4].

При діагностиці асинхронного двигуна дуже важливим є приведення контрольованих параметрів до одного режиму (наприклад, номінального). Це виконується за допомогою побудови регресійної залежності, що дозволяє отримати розрахункові параметри, необхідні для діагностування, в основі якого закладено певні процедури, у тому числі порівняння з еталонними значеннями.

Для підвищення чутливості діагностичного параметра доцільно знайти коефіцієнти співвідношення амплітудних значень магнітної індукції протилежних датчиків. У цьому випадку при збільшенні ступеня дефекту підшипника буде збільшуватися коефіцієнт співвідношення амплітудних значень магнітної індукції, що дає можливість раннього виявлення даного дефекту.

Розширення діагностики досягається за рахунок уведення діагностичних ознак, характерних для різних видів нерегулярності на частотах, відмінних від частоти обертання та, відповідно, вищих складових, кратних частоті обертання.

Селективний метод може вибірково оброблювати інформацію, яка знаходиться у вимірювальних сигналах, й аналізувати її з метою раннього виявлення пошкоджень. У часовій області вимірювальний сигнал визначається багатьма періодами (обертанням вала), щоб за допомогою сигналу від тригера виділити із сумарного сигналу комплексні амплітуди (величину та фазу) гармонійних складових.

Побудований на швидкому перетворенні Фур'є аналіз у частотній області дозволяє зіставити даний спектр з «еталонним», причому для кожного пікового значення визначають тенденцію розвитку дефекту. Ця тенденція змінення конкретної характеристики є чутливим інструментарієм для раннього розпізнавання систематичних змін.

Порівняння двох методів спостереження в часовій і частотних областях дає підставу для ствердження, що перевага діагностики в часовій області лежить у спонтанному розпізнаванні дефектів, які швидко розвиваються (цифрова обробка даних із кроком 1 с; виділення аномалій, що викликають увагу, наприклад процеси торкання поверхонь, нестабільність масляної плівки в підшипниках ковзання та ін.). Методика спостереження в частотній області має чітку перевагу при розпізнаванні дефектів на ранній стадії (цифрова обробка даних із кроком 1 год; використання повної динаміки сигналу, наприклад процеси зносу у підшипниках).

Для обробки даних із датчиків можна використовувати розроблену фірмою «Береста» систему вводу та накоплення первинних даних *DeepSee*, яка забезпечує в реальному часі багатоканальний синхронний ввід та збереження в комп'ютері необроблену інформацію від усіх датчиків. Уведення та накоплення первинних даних забезпечується спеціалізованим багатоканальним програмно-апаратним комплексом, який складається з попередніх підсилювачів, схеми синхронізації, аналого-цифрових перетворювачів, вбудованого промислового комп'ютера та програм оперативного відображення вихідних даних, а також підпрограм попередньої обробки даних у реальному часі.

Інші методи діагностики електричних машин (контроль температури вузлів, що мають найбільше нагрівання; аналіз складу відроблених мастил та ін.) при використанні запропонованої методики мають допоміжну роль. Однак це не означає, що контроль інших важливих параметрів і застосування інших методів контролю, особливо методів неруйнівного контролю, є надлишковим – для забезпечення гарантованої надійності експлуатації асинхронних двигунів бажано проводити комплексну діагностику параметрів різної фізичної природи.

Казати про наявність дефекту можна тільки у порівнянні з асинхронним двигуном такого ж типу, який нормально функціонує. Це порівняння повинно проводитися протягом довгого проміжку часу, для того щоб не тільки оцінити усталені відзнаки параметрів діагностики, але й динаміку зростання цих відзнак у часі. За швидкістю зростання відзнак можна судити про залишковий ресурс підшипників, а також планувати профілактичні роботи з реальної необхідності, що дозволить заздалегідь замовити поставку необхідних комплектуючих для виконання наступного ремонту, а також планово-запобіжних ремонтів, що дає значну економію за рахунок скорочення часу простою.

Порівняльний аналіз результатів первинної та вторинної багатопланової обробки експериментальних даних для бездефектного підшипника та підшипника з дефектом дозволить виявити сукупність усталених відзнак параметрів сигналів із прив'язкою аномалій.

Після формального опису відмінностей параметрів створюються алгоритми для автоматичного знаходження аномалій та розроблюються відповідні прикладні програми для їхнього використання в якості стандартних.

У майбутньому, на основі досвіду експлуатації, можуть бути введені оцінки ступеню відхилення від норми.

Діагностична методика може удосконалюватися з урахуванням її експлуатації на різних атомних електростанціях.

Рекомендації щодо використання запропонованої методики:

надійна діагностика вимагає врахування максимальної кількості інформації поведінки машини в усіх режимах роботи;

для одержання відповідних даних необхідно накопити та обробити первинні дані від датчиків, розміщених у найбільш інформативних точках;

записування даних з усіх датчиків необхідно проводити одночасно (синхронно);

результати представляються у вигляді звіту з відповідними графіками, таблицями та висновками;

із результатів обробки даних уточняється методика подальшого дослідження для автоматичного виявлення ознак дефектів підшипників асинхронного двигуна.

Висновки та рекомендації

1. Забезпечення нормальної експлуатації асинхронних двигунів є важливою задачею, бо вони використовуються більше, ніж будь-які інші електричні машини. Статистичні дані свідчать, що вироблення підшипників є одним із дефектів, який часто виникає у практиці експлуатації асинхронних двигунів (15 – 20 % від усіх інших видів дефектів).

2. Вироблення підшипників є причиною ексцентриситету ротора, у результаті якого виникають пошкодження, що потребують проведення тривалого відновлювального ремонту двигуна. Витрати в цьому випадку близькі до вартості нової машини.

3. Найбільш відомі на сьогодні методи контролю нерівномірності повітряного проміжку, як правило, потребують відключення електричної машини від мережі живлення та використання зовнішніх джерел постійного чи змінного струмів.

4. Достовірна (вірогідна) діагностика електричних машин можлива з результатів аналізу їхніх електромагнітних параметрів, оскільки виявлення дефекту супроводжується, як правило, значним підвищенням амплітуди електромагнітних параметрів у повітряному проміжку. Хоча ці змінення мають місце безпосередньо в зоні дефекту, вони можуть спостерігатися засобами діагностики й на віддаленні від цієї зони, тому що вільно розповсюджуються в конструктивному об'ємі машини. До того ж діагностування можна проводити без розбирання та зупину машини, у тому числі й у процесі її експлуатації.

5. Якщо в повітряному проміжку, або для зручності на гладкій торцевій частині статора, установити датчики магнітної індукції, зміщені у просторі по колу на деякий кут, то при дефектах підши-

пника, що приводять до появи ексцентриситету, показання цих датчиків будуть відрізнятися за діючими та миттєвими значеннями індукції, які вимірюються в той самий момент часу.

6. Для підвищення чутливості діагностичного параметра доцільно знайти коефіцієнти співвідношення амплітудних значень магнітної індукції протилежних датчиків. У цьому випадку при збільшенні ступеня дефекту підшипника буде збільшуватися коефіцієнт співвідношення амплітудних значень магнітної індукції, що дає можливість раннього виявлення даного дефекту.

7. Інші методи діагностики електричних машин при використанні запропонованої методики мають допоміжну роль. Для забезпечення гарантованої надійності експлуатації асинхронних двигунів бажано проводити комплексну діагностику параметрів різної фізичної природи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Барков А. В., Баркова Н. А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Тр. Петербург. энерг. ин-та повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США. – 1999. – № 9. – С. 11 - 17.
2. Барков А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Рекомендации для пользователей систем диагностики / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – С.-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2000. – 324 с.
3. Барков А. В. Современные возможности вибродиагностики машин и оборудования / А. В. Барков, В. С. Никитин. - Обзор. <http://www.vibrotek.com>
4. Нафиков А. Ф. Оценка технического состояния насосного оборудования с использованием теории детерминированного хаоса / А. Ф. Нафиков, М. М. Закиричная, И. Р. Кузеев и др. // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тез. третьей междунар. конф. – Москва, 15 - 18 октября 2004 г. – М., 2004. – С. 129.
5. Никиян Н. Г. Освоение и оценка методов электромагнитной диагностики эксцентриситета ротора асинхронных двигателей / Н. Г. Никиян, Д. В. Сурков // Вестник ОГУ. – 2005. – № 2. – С. 25 - 29.
6. Рогозин Г. Г. Контроль равномерности воздушного зазора асинхронной машины по значению синхронного индуктивного сопротивления / Г. Г. Рогозин // Электричество. – 1981. – № 5. – С. 44 - 46.
7. Рогозин Г. Г. Косвенный контроль неравномерности воздушного зазора асинхронных машин / Г. Г. Рогозин, Н. С. Лапшина // Электротехника. – 1980. – № 3. – С. 15 - 19.
8. Тэттер В. Ю. Диагностирование подшипниковых и редукторных узлов на переходных режимах / В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер, В. С. Барайшук // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля. – 2005. – № 8. – С. 45 - 49.
9. Reinhold Sunder, Alexander Kolbasseff (Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Garching) Zustandsorientierte Instandhaltung von Dampfturbosätzen, Gasturbinenanlagen und Pumpen durch frequenzselektive Verfahren im Online-Einsatz // Symposium zur schwingungsdiagnostischen Überwachung von Kraftwerksturbosätzen, Potsdam, 22 - 24.03. 2006. - P. 30.

А. В. Выговский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

ДІАГНОСТИКА АСИНХРОННИХ ДВИГАТЕЛЕЙ БЛОКОВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Предложена методика диагностирования износа подшипников скольжения асинхронных двигателей на основе изменения амплитудных значений электромагнитной индукции в воздушном зазоре машины. Методика является экономичной и простой при реализации, а также дает возможность диагностирования состояния подшипников во время работы электрической машины без отключения ее от сети питания. Даны некоторые рекомендации касательно расширения и автоматизации диагностирования. Использование предложенной методики вместе с другими известными методиками значительно увеличит достоверность диагностирования электрических машин.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, подшипники скольжения, диагностика.

O. V. Vygovskiy

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, Kyiv, 03028, Ukraine

DIAGNOSTICS THE ASYNCHRONOUS MOTORS OF NUCLEAR POWER PLANTS BLOCKS

According to statistics, the damages of asynchronous motors bearing units make up 15 – 20 % of all other types defects. The bearings damage leads to unevenness the non-magnetic air gap between the stator and rotor, which is the reason for the rotor eccentricity. It is possible in the most severe cases to touch the rotor on the stator inner surface,

which may cause mechanical damage. The most commonly known methods for control of unevenness the air gap usually require the disconnection of electric machine from the power supply and to use the external sources of direct or alternating current. For this reason, the method of damage bearings diagnostic eliminates these shortcomings and easy to use is urgent. It is based on an analysis of change the electrochemical induction amplitude values during the operation of an electric machine. In the presence of a bearing defect, the magnetic field in the machine air gap as well as the field pushed out of the gap is changes. So when the sensors are installed directly in the air gap or for convenience on the stator end zone (closer to the rotor) their values will differ on the operating and instantaneous induction, which are measured at the same time. To implement the proposed method in high-voltage asynchronous motors, magnetic field sensors can be set in the form of a wind twisted on the stator tooth. Inductive coils can be used as sensors. It is necessary to set at least two magnetic field sensors in the opposite direction at the pole division of an electric machine. By the magnetic induction value it can be concluded that there is a bearing defect. Measured the two induction values are compared with each other and depending on the degree of development of the defect are found the bearings damage. For each asynchronous motor design, the control points for the set of some sensors should be corrected. Built on a fast Fourier transform analysis allows to compare the spectrum with "reference" and for each peak value determine the tendency of defect development. This tendency is a sensual tool for early recognition of systematic changes. Other methods of electric machines diagnostics have a supporting role. To ensure guaranteed reliability of operation the asynchronous motors is desirable to carry out a comprehensive diagnosis of different physical nature parameters. To speak about a defect can only be compared with the same type asynchronous motor that functions normally. From the rate of distinctions growth can judge with respect to the residual life of bearings, as well as plans real need preventive work. Comparative analysis of results for no defect and defect bearing will allow detecting a set of well-established marks of signal parameters with the reference signal anomalies. Algorithms for automatic finding of the anomalies and appropriate applications for their use as standard can be created after the formal description of the differences in the parameters. Diagnostic method can be improved taking into account its operation at different nuclear power plants.

Keywords: asynchronous motor, sliding bearings, diagnostics.

REFERENCES

1. *Barkov A. V.* Intellectual systems of monitoring and diagnostics of machines on a vibration / A. V. Barkov, N. A. Barkova // Trudy Peterburgskogo energeticheskogo instituta povysheniya kvalifikatsii Mintopenergo Rossiyskoy federatsii i Instituta vibratsii SSHA. – 1999. – № 9. – P. 11 - 17. (Rus)
2. *Barkov A. V.* Monitoring and diagnostics of rotor machines on a vibration. Recommendations for users of diagnostic systems / A. V. Barkov, N. A. Barkova, A. Yu. Azovtsev. – S.-Peterburg: izd-vo SPbGMTU, 2000. – 324 p. (Rus)
3. *Barkov A. V.* Modern possibilities of vibration diagnostics of machines and equipment / A. V. Barkov, V. S. Nikitin. Review. <http://www.vibrotek.com>. (Rus)
4. *Nafikov A. F.* Estimation of the technical state of pumping equipment with the use of theory of the determined chaos / A. F. Nafikov, M. M. Zakirnichnaya, I. R. Kuzeev et al. // Non-destructive control and technical diagnostics are in industry: Theses of the third international conference. – Moskva 15 - 18 Oktober 2004. – Moskva, 2004. – P. 129. (Rus)
5. *Nikiyan N. G.* Development and evaluation of methods for electromagnetic diagnostics of the rotor eccentricity of induction motors / N. G. Nikiyan, D. V. Surkov // Vestnik OGU. – 2005. – № 2. – P. 25 - 29. (Rus)
6. *Rogozin G. G.* Control of the evenness of the air gap of an asynchronous machine by the value of synchronous inductive resistance / G. G. Rogozin // Elektrichestvo. – 1981. – № 5. – P. 44 - 46. (Rus)
7. *Rogozin G. G.* Indirect control of unevenness air gap of asynchronous machines / G. G. Rogozin, N. S. Lapshina // Elektrotehnika. – 1980. – № 3. – P. 15 - 19. (Rus)
8. *Tetter V. Yu.* Diagnosis of bearing and reducer units in transient modes / V. Yu. Tetter, A. Yu. Tetter, B. C. Barayshchuk // Visnyk Shidnoukrains'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya. – 2005. – № 8. – P. 45 - 49. (Rus)
9. *Reinhold Sunder, Alexander Kolbasseff* (Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Garching) Zustandsorientierte Instandhaltung von Dampfturbosätzen, Gasturbinenanlagen und Pumpen durch frequenzselektive Verfahren im Online-Einsatz // Symposium zur schwingungsdiagnostischen Überwachung von Kraftwerksturbosätzen, Potsdam, 22 - 24.03. 2006. - P. 30.

Надійшла 21.06.2018
Received 21.06.2018