

Ю. Н. ВАСЬКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;
А. А. ГЕРАСКИН, канд. техн. наук, ассист. НТУУ «КПИ»

ВИБРОДИАГНОСТИКА ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА АСИНХРОННЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВИБРОВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ

При длительной эксплуатации асинхронных машин часто возникает эксцентриситет ротора, в результате чего существенно ухудшаются эксплуатационные показатели машины, в частности, увеличиваются электромагнитные вибрации. Поэтому проблема своевременной диагностики эксцентриситета ротора является актуальной. Разработана новая математическая модель, проанализированы вибровозмущающие силы и исследованы диагностические признаки при появлении статического и динамического эксцентриситета ротора, которые позволяют с достаточной достоверностью диагностировать не только вид эксцентриситета, но и степень его развития.

Ключевые слова: эксцентриситет ротора, вибрация асинхронного двигателя, вибрационная диагностика, диагностические признаки, полевая математическая модель.

Введение

В асинхронных машинах (АМ) часто возникает эксцентриситет ротора, ведущий к неравномерности воздушного зазора машины[1]. Причины появления эксцентриситета обусловлены как ошибками при производстве и сборке машины, так и неблагоприятными условиями ее эксплуатации. В общем случае различают статический (СЭ) и динамический (ДЭ) эксцентриситет. При статическом эксцентриситете неравномерная конфигурация воздушного зазора не изменяется во времени при вращении ротора. Статический эксцентриситет возникает при радиальном или угловом смещении оси вращения ротора относительно продольной оси статора, при этом оси статора и ротора остаются взаимно неподвижными. При динамическом эксцентриситете конфигурация воздушного зазора при вращении ротора изменяется, что обусловлено вращением оси ротора относительно оси статора.

Ввиду малости воздушного зазора АМ даже незначительный эксцентриситет ротора, нарушая симметрию конструкции машины, значительно ухудшает ее работу. Эксцентриситет существенно ухудшает эксплуатационные характеристики машины и может быстро привести ее в неработоспособное состояние. Поэтому своевременное обнаружение эксцентриситета на ранних стадиях его развития, имеет большое практическое значение и является одной из важных задач контроля технического состояния АМ и диагностики ее дефектов. Наиболее эффективной является электромагнитная вибрационная диагностика – мониторинг и анализ изменений вибраций АМ электромагнитного происхождения в зависимости от вида и степени развития эксцентриситета.

Анализ основных достижений

На сегодняшний день существует большое количество неразрушающих методов диагностики повреждений асинхронных двигателей (эксцентриситет,

разрыв стержней ротора и др.), в частности: метод спектрального анализа потребляемого тока статора, вибрационная диагностика и другие методы. В качестве предпочтительного метода диагностики эксцентриситета является метод вибрационной диагностики (ВД), который обладает наибольшей чувствительностью и позволяет выявлять повреждения на ранних стадиях развития. Значительная чувствительность вибродиагностики обусловлена тем, что величина изменения вибровозмущающей силы ΔF , вызванная возмущением магнитного поля при наличии повреждений, пропорциональна второй степени возмущения магнитной индукции ΔB^2 в воздушном зазоре (по сравнению с первой степенью ΔB в методе спектрального анализа тока статора), что существенно повышает чувствительность метода ВД.

Исследованию эксцентриситета электрических машин посвящены работы [2–7]. Отличительной особенностью представленных исследований является то, что исследования проводятся с применением полевых методов анализа [8], что обеспечивает выявление и обоснование достоверных диагностических признаков эксцентриситета.

Цель исследований

Целью статьи является обоснование методами математического моделирования диагностических признаков, которые при появлении эксцентриситета ротора АМ возникают в электромагнитных вибровозмущающих силах и могут эффективно использоваться в системах вибродиагностики. Исследование проводится на примере асинхронного двигателя (АД).

Математическая модель

Величину эксцентриситета удобно характеризовать коэффициентом относительного эксцентриситета:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max} + \delta_{\min}},$$

где $\delta_{\max}, \delta_{\min}$ – максимальная и минимальная величины воздушного зазора АД. Коэффициент относительного эксцентриситета изменяется в пределах от 0 ($\delta_{\max} = \delta_{\min}$ – отсутствие эксцентриситета) до 1 ($\delta_{\min} = 0$ – ротор касается статора).

В системе координат ротора уравнение электромагнитного поля относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала $\dot{A}_z$ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 s \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{z\text{статор}}, \quad (1)$$

где $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ – угловая частота тока статора, s – скольжение ротора, μ – магнитная проницаемость, γ – электропроводность, $J_{z\text{статор}}$ – плотность

сторонних токов (плотности токов в пазах статора, задаваемые в соответствии со схемой обмотки).

Уравнение (1) дополняется однородными граничными условиями первого рода $\dot{A}_z \Big|_G = 0$ на линии G внешней поверхности ярма статора.

Уравнение (1) решается в пределах временного интервала $[0 \dots T]$, где T – период времени, равный времени одного полного оборота ротора АД. При решении задачи временной интервал разбивается на N равномерных шагов размером Δt . При этом, с учетом вращения ротора *функциями времени* в уравнении (1) являются:

1) плотности токов фаз обмотки статора:

$$\begin{aligned} J_{cA}(t) &= J_m \cos \omega_1(t + \Delta t), \\ J_{cB}(t) &= J_m \cos [\omega_1(t + \Delta t) + 2\pi/3], \\ J_{cC}(t) &= J_m \cos [\omega_1(t + \Delta t) + 4\pi/3], \end{aligned} \quad (2)$$

где J_m – амплитуда, определяемая по значениям фазного тока статора и площади сечения проводников;

2) координаты x, y точек ротора. Приращения $\Delta x, \Delta y$ декартовых координат ротора на временном шаге Δt задаются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \cos[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot (x - \Delta X) - \sin[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot (y - \Delta Y) - (x - \Delta X); \\ \Delta y(t) &= \sin[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot (x - \Delta X) + \cos[\omega_R(t + \Delta t)] \cdot (y - \Delta Y) - (y - \Delta Y); \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_R – угловая частота вращения ротора; $\Delta X = \Delta \delta \cdot \cos \alpha$ и $\Delta Y = \Delta \delta \cdot \sin \alpha$ – координаты смещения оси ротора относительно оси статора (величина смещения оси ротора $\Delta \delta$ и угол α показаны на рис. 1. При моделировании статического эксцентриситета угол α остается неизменным, а при моделировании динамического эксцентриситета угол α зависит от времени и равен $\alpha = \alpha_0 + \omega_R t$, где α_0 – начальный угол смещения. При этом конфигурация неравномерного воздушного зазора АМ изменяется во времени.

Таким образом, на каждом временном шаге решается квазистационарное уравнение (1) для различных согласованных между собою значений токов статора и положений ротора.

Объединение полученных решений на заданном интервале $[0 \dots T]$ дает искомые временные зависимости векторного магнитного потенциала и всех других определяемых через него величин. Такой подход к решению времязависимой задачи допустим при анализе установившихся процессов, при которых неизменными остаются скорость вращения ротора и распределение индуцированных токов в сечениях стержней ротора.

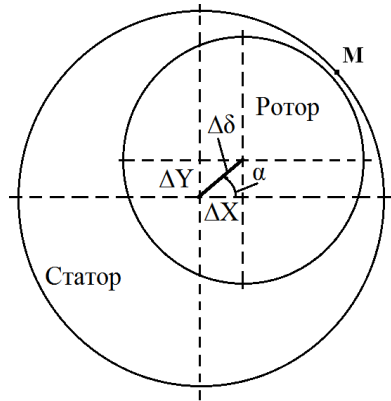


Рис. 1 – Учет изменения координат ротора при эксцентриситете

Составляющие вектора магнитной индукции B_x и B_y в декартовых координатах определяются по соотношениям:

$$B_x = \partial A_z / \partial y, \quad B_y = -\partial A_z / \partial x \quad (4)$$

Расчет электромагнитных вибровозмущающих сил выполняется с помощью тензора магнитного натяжения [9], имеющего физическую размерность (Н/м²) и отображающего давление, которое электромагнитное поле оказывает на рассматриваемую поверхность, в частности, на внутреннюю поверхность расточки статора. В произвольной точке М на коронке зубца статора рассчитываются нормальная (направленная вдоль вектора нормали к коронке зубца) T_{nM} и тангенциальная (направленная вдоль касательной к коронке зубца) $T_{\tau M}$ составляющие тензора магнитного натяжения по следующим формулам:

$$T_{nM}(t) = \frac{1}{2\mu_0} \cdot [B_{nM}^2 - B_{\tau M}^2], \quad T_{\tau M}(t) = \frac{B_{nM} \cdot B_{\tau M}}{\mu_0}, \quad (5)$$

где $B_{nM}, B_{\tau M}$ – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции в точке М. Эти составляющие индукции легко определяются по найденным из выражений (4) составляющим индукции в декартовых координатах:

$$B_n = (B_x \cdot x + B_y \cdot y) / R_\delta, \quad B_\tau = (B_x \cdot y - B_y \cdot x) / R_\delta, \quad (6)$$

где R_δ – радиус расточки статора, x, y – декартовы координаты рассматриваемой точки.

Наибольший интерес для анализа представляет нормальная составляющая тензора, которая формирует радиально направленные вибрации статора. Рассчитанные по выражениям (5) вибровозмущающие

силы в определенном масштабе отображают сигналы пьезоэлектрических датчиков виброускорения, с помощью которых определяются вибрации сердечника статора АД [10]. Анализ этих сигналов проводится не только во временной области, но и с помощью разложения их в спектры.

Результаты моделирования

Приведем результаты моделирования вибровозмущающих сил при изменении величины эксцентриситета ϵ на примере мощного АД собственных нужд электростанций типа АД-5000, имеющего следующие данные: номинальная мощность – 5000 кВт; номинальное линейное напряжение – 6000 В; номинальный фазный ток – 545 А; число пар полюсов – 1; номинальное скольжение – 0,005; диаметр расточки статора – 675 мм; воздушный зазор – 6 мм.

Моделирование СЭ. На рис. 2 показаны расчетные сигналы датчиков вибрации и их разложение в спектры, рассчитанные для разных значений эксцентриситета ϵ за время одного оборота ротора АД-5000 в точке М на внутренней поверхности статора, расположенной напротив минимального воздушного зазора (рис. 1).

Из рис. 2. видно, что с увеличением эксцентриситета существенно увеличиваются амплитуды зубцовых гармоник тензора натяжения. При появлении СЭ в области минимального зазора магнитная индукция существенно увеличивается, что сопровождается увеличением зубцовых гармоник в спектрах. Амплитуды зубцовых гармоник (для АД частота первой зубцовой гармоники равна $f_{z1} = 2,3$ кГц) зависят обратно пропорционально от величины воздушного зазора в месте расположения датчика. При смещении датчика (т. М) от точки минимального зазора к точке максимального зазора амплитуды зубцовых гармоник уменьшаются. Таким образом, результаты диагностики СЭ зависят от местоположения датчика на статоре и для достоверной диагностики СЭ необходимо наличие не менее двух датчиков, которые располагаются в двух ортогональных плоскостях.

Для анализа изменения общего уровня вибрации используется коэффициент изменения среднеквадратичного значения (СКЗ) спектра виброускорения $k_{СКЗ_a}$, характеризующий отношение СКЗ спектров виброускорения поврежденной и неповрежденной АД:

$$k_{СКЗ_a} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{ni_Y}|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{ni_HY}|^2}}, \quad (7)$$

где N – количество гармоник, учтенных в спектре; i – номер гармоники; T_{ni_Y} , T_{ni_HY} – амплитуды i -ой гармоники тензора магнитного натяжения в спектрах вибрации, соответственно, поврежденного и неповрежденного АД.

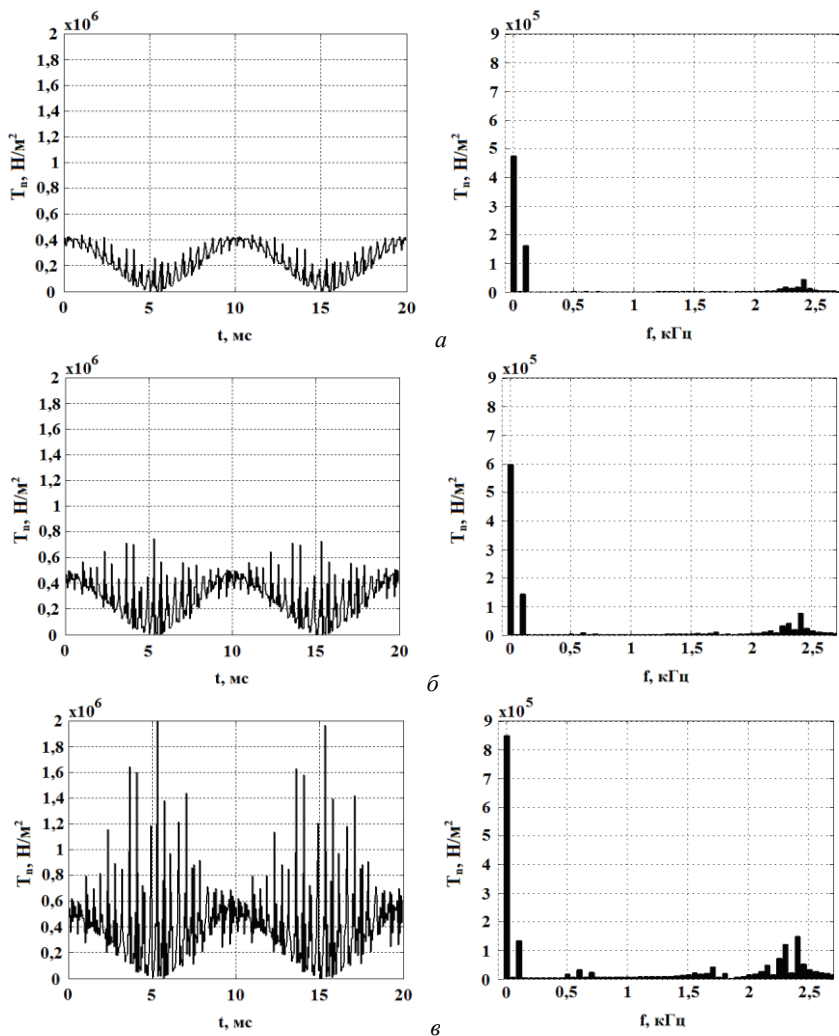


Рис. 2 – Сигналы датчиков вибрации и их спектры, рассчитанные в точке с минимальным зазором для АТД-5000:

a – неповрежденный АД, $\varepsilon = 0$; *b* – СЭ $\varepsilon = 0,36$; *v* – СЭ $\varepsilon = 0,59$

Например, при $\varepsilon = 0,59$ коэффициент изменения СКЗ спектра виброускорения увеличивается до значения $k_{СКЗ_a} = 1,66$, т.е. общий уровень вибрации двигателя увеличивается в 1,66 раз, что легко фиксируется системой вибродиагностики.

При увеличении эксцентриситета кроме увеличения общего уровня вибраций наблюдается также увеличение постоянной составляющей спектра, которая зависит от общего уровня амплитуд зубцовых гармоник. При $\varepsilon = 0,59$ постоянная составляющая увеличивается в 1,75 раз, при этом возникает одностороннее притяжение ротора к статору в направлении малого зазора. Диагностическим признаком СЭ является также отсутствие в спектре сигнала гармоник частоты вращения.

Моделирование ДЭ. На рис. 3 для АТД-5000 показаны сигналы датчиков вибрации и их спектры за время одного оборота ротора при различных значениях ДЭ. На рис. 3, а приведен сигнал и его спектр при отсутствии ДЭ.

Аналогичные результаты приведены на рис.4 для тягового АД типа СТА – 1200, имеющего следующие данные: номинальная мощность – 1200 кВт; номинальное линейное напряжение – 1080 В; номинальный фазный ток – 452 А; число пар полюсов – 3; номинальное скольжение – 0,01; диаметр расточки статора – 510 мм; воздушный зазор – 2 мм.

Из анализа рис. 3 и рис. 4 следует вывод о появлении существенных искажений сигнала в те моменты времени, когда вращающийся минимальный зазор оказывается над датчиком в т. М. При прохождении над датчиком, расположенном в точке с меньшим воздушным зазором амплитуды зубцовых гармоник существенно возрастают, причем с ростом ε увеличивается амплитуда зубцовых гармоник на одной половине сигнала (второе колебание сигнала на рис. 3) и уменьшается на другой. При этом в отличие от СЭ основным диагностическим признаком ДЭ является *появление в спектре гармоники частоты вращения*.

В отличие от СЭ, при ДЭ отсутствует влияние местоположения датчика вибрации на его сигнал, поскольку минимальный воздушный зазор вращается относительно статора вместе с ротором. Это позволяет использовать в системе вибродиагностики для обнаружения ДЭ только один датчик виброускорения.

Анализ спектров сигналов датчиков вибрации АТД-5000 и СТА-1200 показывает, что при появлении ДЭ ротора в спектре возникает гармоника частоты вращения без ее боковых гармоник. При возникновении в АТД-5000 ДЭ при $\varepsilon = 0,59$ коэффициент изменения среднеквадратичного значения спектра виброускорения увеличивается до значения $k_{СКЗ_a} = 1,26$, а для СТА-1200 при ДЭ $\varepsilon = 0,52$ коэффициент равен $k_{СКЗ_a} = 1,36$.

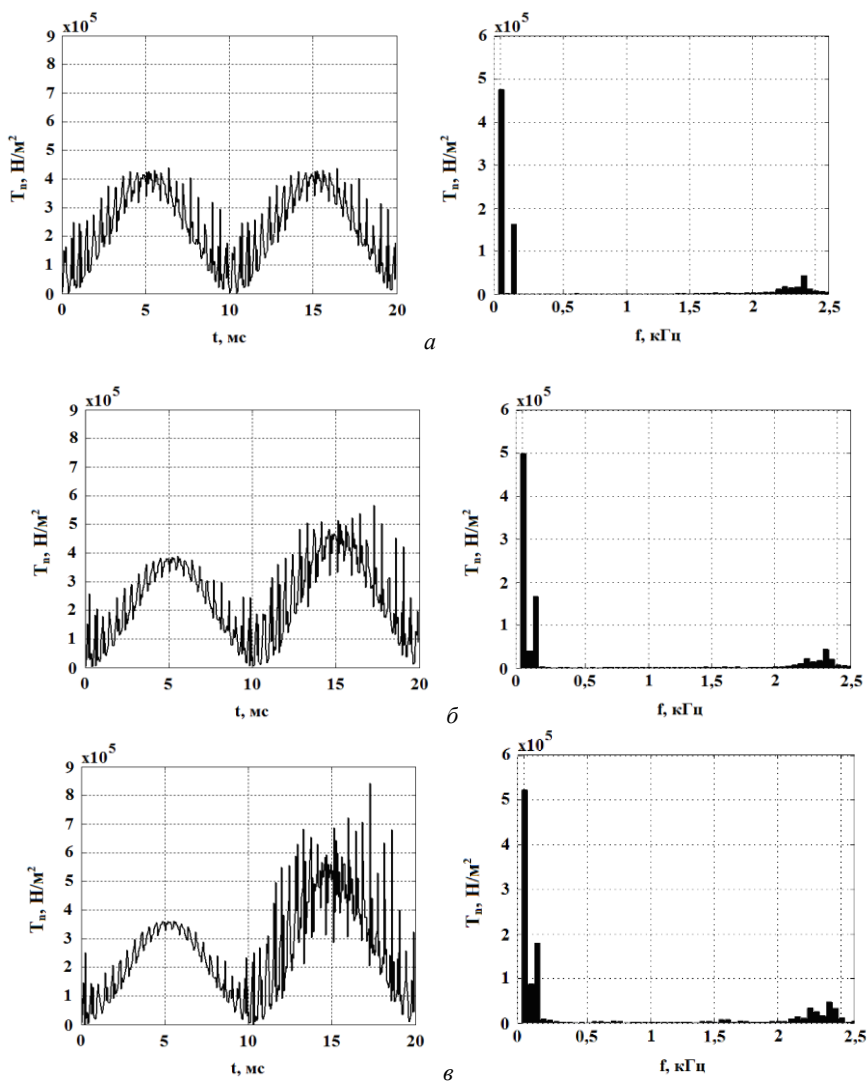


Рис. 3 – Сигналы датчиков вибрации и их спектры за время одного оборота ротора АД-5000:
а – неповрежденный АД, $\epsilon = 0$; *б* – ДЭ при $\epsilon = 0,36$; *в* – ДЭ при $\epsilon = 0,59$

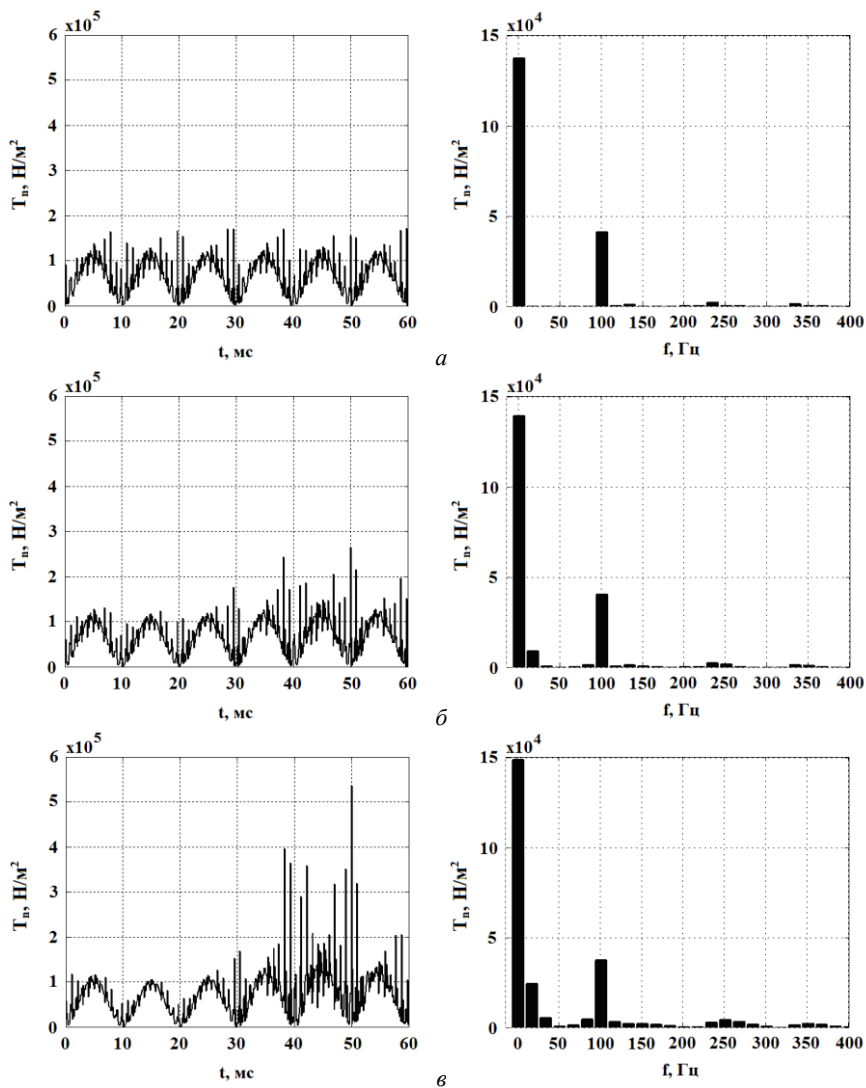


Рис. 4 –Сигналы датчиков вибрации и их спектры за время одного оборота ротора СТА-1200:
 a – неповрежденный АД, $\epsilon = 0$; b – ДЭ при $\epsilon = 0,26$; c – ДЭ при $\epsilon = 0,52$

Выводы

1. С помощью математического моделирования выявлены и проанализированы следующие диагностические признаки, возникающие в вибро-возбуждающих силах и их спектрах при появлении СЭ и ДЭ:

а) при появлении любого вида эксцентриситета ротора АМ, кроме увеличения общего уровня вибраций, наблюдается увеличение амплитуд зубцовых гармоник, а также постоянной составляющей спектра, которая приводит к одностороннему несимметричному притяжению ротора к статору. Кроме того, в отличие от СЭ при ДЭ во временном сигнале датчика вибрации зубцовые гармоники имеют разные амплитуды на разных полупериодах сигнала;

б) дополнительным диагностическим признаком возникновения СЭ является отсутствие в спектре сигнала гармоник частоты вращения;

в) дополнительным диагностическим признаком возникновения ДЭ является появление в спектре сигнала гармоники частоты вращения без ее боковых гармоник;

г) в отличие от СЭ, при ДЭ отсутствует влияние местоположения датчика вибрации на его сигнал, поскольку минимальный воздушный зазор вращается вместе с ротором.

2. Исследованные диагностические признаки можно использовать в системах вибрационной диагностики для обнаружения эксцентриситета в АД на ранней стадии их развития. При этом ДЭ может быть диагностирован с помощью только одного датчика вибрации, а для диагностики СЭ необходимо наличие не менее двух датчиков, установленных на статоре в ортогональных плоскостях.

Список литературы: 1. *Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В.* Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Высшая школа, 2001. – 390с. 2. *Потапшик С.І.* Підвищення надійності, рівня безпеки та ефективності функціонування демпферних систем потужних гідроенергетичних генераторів / *С.І.Потапшик, Ю.М. Васильовський, Г.М. Федоренко* // Гідроенергетика України. 2009. – №4. – С.28 – 34. 3. *Nandi, S., ShehadA., andH.A. Toliyat.* "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 16.3 (2001): 253-260. [Print]. 4. *Keller S., Xuan M.T., andSimond J.J.* "Large low-speed hydro-generators – unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions." *Electric Power Appl.* 1(5) (2007): 657–664. [Print]. 5. *Traxler-Samek G., Lugand T., and Schwery A.* "Additional losses in damper winding of large hydrogenerators at open-circuit and load conditions." *IEEE Trans on Indust. Elect.* 1(57) (2010): 154 – 160. [Print]. 6. *WallinM., BladhJ., and LundinU* " Damper winding in fluence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity." *IEEE TransonMagnetics*9(49) (2013): 5158–5165. [Print]. 7. *Новожилов А.Н.* Диагностика эксцентриситета ротора электрической машины переменного тока с использованием искусственных нейронных сетей / *А.Н.Новожилов, А.В. Антонцев, Е.В.Крюкова, Н.А. Исупова, Т.А. Новожилов*// Вестник ПГУ, серия Энергетическая.–2013.–№1. – С.68-75. 8. *Васильовський Ю.М.* Польовий аналіз електричних машин. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 191с. 9. *Васильовський Ю.Н.* Вибровозмущающие электромагнитные силы в короткозамкнутых асинхронных двигателях при наличии повреждений их конструкции / *Ю.Н. Васильовский, А.А. Гераскин* // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 31–38. 10. *Васильовський Ю.Н.* Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей

вibrovozmushayushchih elektromagnitnyh sil / Ю.Н. Васьковский, А.А. Гераскин // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 12-16.

Bibliography (transliterated): 1. Abramov A.I., and Ivanov-Smolenskiy A.V. *Proektirovanie gidrogeneratorov i sinhronnyih kompensatorov*. – Moskva: Vyishaya shkola, 2001. [Print]. 2. Potashnyk, S.I., Vaskovskiy, Yu.M., and Fedorenko G.M. "Pidvyshhennya nadijnosti, rivnya bezpeky ta efetyvnosti funkcionuvannya dempfirnyx system potuzhnyx gidrogeneratoriv." *Gidroenergetyka Ukrainy* 4 (2009): 28 – 34. [Print]. 3. Nandi, S., Shehada, and H.A. Toliyat "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 16.3 (2001): 253-260. [Print]. 4. Keller S., Xuan M.T., and Simond J.J. "Large low-speed hydro-generators – unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions." *Electric Power Appl.* 1(5) (2007): 657–664. [Print]. 5. Traxler-Samek G., Lugand T., and Schwery A. "Additional losses in damper winding of large hydrogenerators at open-circuit and load conditions". *IEEE Trans on Indust. Elect.* 1(57)(2010): 154 – 160. [Print]. 6. Wallin M., Bladh J., and Lundin U. "Damper winding in fluence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity." *IEEE Transon Magnetics* 9(49) (2013): 5158–5165. [Print]. 7. Novozhilov, A.N., Antontsev, A.V., Kryukova, E.V., et al. "Dyagnostika eksntsentriziteta rotora elektricheskoy mashiny peremennogo toka s ispolzovaniem iskusstvennyih neyronnyih setey." *Vestnik PGU, seriya Energeticheskaya* 1 (2013): 68-75. [Print]. 8. Vaskovskiy, Yu.M. *Poloviy analiz elektrichnih mashin*. – Kyiv: NTUU «KPI», 2007. [Print]. 9. Vaskovskiy, Yu.N. and Geraskin, A.A. "Vibrovozmuschayushchie elektromagnitnyie silyi v korotkozamknutyih asinhronnyih dvigatelyah pri nalichii povrezhdeniy ih konstruktsii." *Tekhnichna elektrodinamika* 5 (2010): 31–38. [Print]. 10. Vaskovskiy, Yu.N. and Geraskin, A.A. "Analiz signalov datchikov vibratsii v korotkozamknutyih asinhronnyih dvigatelyah na osnove matematicheskikh modeley vibrovozmuschayushchih elektromagnitnyih sil." *Elektrotehnika i elektromehanika* 5 (2010): 12-16. [Print].

Поступила (received) 13.08.2014



Васьковский Юрий Николаевич,
д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры электромеханики НТУУ «КПИ»
E-mail: vun157@gmail.com



Гераскин Александр Анатольевич,
канд. техн. наук,
ассистент кафедры электромеханики НТУУ «КПИ»
E-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net