

УДК 621.313.333

ВПЛИВ УШКОДЖЕНЬ КОРОТКОЗАМКНЕНОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ

Ю. М. Васьковський, О. А. Гераскін

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net

Досліджено вплив пошкоджень стрижнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна на його електромагнітний момент. Розроблена польова математична модель асинхронного двигуна, який має пошкоджені стрижні ротора. Показано, що при пошкодженні стрижнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна змінюється величина і характер електромагнітного моменту. При пошкодженні стрижнів ротора середнє значення моменту зменшується і з'являється змінна складова моменту, яка пульсує з частотою ковзання. Зі збільшенням кількості пошкоджених стрижнів постійна складова моменту значно зменшується, а змінна складова моменту збільшується. При збігу частот коливань робочого механізму і низькочастотних коливань моменту пошкодженого двигуна, може виникнути негативне явище механічного резонансу. Поява змінної складової електромагнітного моменту асинхронного двигуна можна використовувати як діагностичну ознаку, що свідчить про пошкодження стрижнів ротора.

Ключові слова: асинхронний двигун, діагностика, момент, стрижень, ротор.

ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

Ю. Н. Васьковский, А. А. Гераскин

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net

Исследовано влияние повреждений стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя на его электромагнитный момент. Разработана полевая математическая модель асинхронного двигателя, который имеет поврежденные стержни ротора. Показано, что при повреждении стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя изменяется величина и характер электромагнитного момента. При повреждении стержней ротора среднее значение момента уменьшается и появляется переменная составляющая момента, которая пульсирует с частотой скольжения. С увеличением количества поврежденных стержней постоянная составляющая момента значительно уменьшается, а переменная составляющая момента увеличивается. При совпадении частот колебаний рабочего механизма и низкочастотных колебаний момента поврежденного двигателя, может возникнуть негативное явление механического резонанса. Появление переменной составляющей электромагнитного момента асинхронного двигателя можно использовать как диагностический признак, свидетельствующий о повреждении стержней ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, диагностика, момент, стержень, ротор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В практиці експлуатації короткозамкнених асинхронних двигунів (АД) доволі часто виникають випадки, коли АД продовжують виконувати відповідні технологічні функції при наявності ушкоджених стрижнів їх обмотки ротора. Це пов'язано з тим, що ушкодження такого типу, особливо на початковій стадії їх розвитку, не завжди можуть бути своєчасно і достовірно виявлені. При цьому в роботі двигуна з'являється низка змін, які відсутні в неушкодженому АД, зокрема змінюється величина і характер електромагнітного моменту двигуна. Момент ушкодженого АД набуває змінну складову, а середнє значення моменту зменшується.

Такі зміни електромагнітного моменту при ушкодженні АД потребують окремого дослідження. *По-перше*, потрібна оцінка величини зменшення середнього значення моменту з метою обґрунтування можливості подальшого виконання двигуном заданих технологічних функцій. *По-друге*, для вирішення задачі діагностики технічного стану АД потрібна оцінка взаємозв'язку величини змінної складової моменту з обсягами ушкоджень ротора (числом ушкоджених стрижнів ротора).

Сучасною тенденцією на підприємствах є заміна планово-попереджувальних ремонтів на моніторинг і діагностику технічного стану АД у режимі реального часу. Аналіз сучасних методів неруйнівного контролю технічного стану АД показав, що на сьогоднішній день існує багато різних методів діагностики ушкоджень: методи вібраційної діагностики [1–4], методи діагностики на основі спектрального складу споживаного струму [5–7] або миттєвої потужності [8], тепловізорна діагностика та ін. Усі вони мають низку переваг і недоліків.

Мета статті полягає в дослідженні впливу ушкоджених стержнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна на електромагнітний момент із використанням методів математичного моделювання.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Зазначені питання можуть бути досліджені з використанням найбільш достовірних польових математичних моделей, які і використовуються в даній статті. Діагностику ушкоджень стрижнів короткозамкненого ротора АД пропонується здійснювати на основі виявлення змін його електромагнітного моменту. Такий метод діагностики належить до методів неруйнівного контролю, що є його перевагою.

У процесі моніторингу технічного стану АД значення моменту вимірюються дискретно в часі за допомогою підключеного датчика моменту. Для своєчасного виявлення ушкоджень стрижнів ротора, необхідно аналізувати миттєві значення електромагнітного моменту, що можливо при використанні сучасних високоточних датчиків обертового моменту, причому вони мають бути розраховані на максимальні величини обертових моментів досліджуваного АД. На сьогоднішній день на ринку сучасних вимірювальних пристроїв представлена достатня кількість точних датчиків обертового моменту. Наприклад, можна використовувати датчики моменту типів ТМ 310–ТМ 313 (вимірюють обертовий момент від 50 Н·м до 500 Н·м) або ТМ 314–ТМ 317 (вимірюють обертовий момент від 1000 Н·м до 10000 Н·м), що пропонуються компанією Magtrol. Ці датчики мають таку особливість як пряма реєстрація швидкості обертання валу, що дозволить коригувати виміри моменту з поправкою на швидкість обертання валу.

Досліджуваным двигуном був обраний АД типу АТД потужністю 500 кВт. Номінальна напруга – 6 кВ, струм статора 57 А, коефіцієнт корисної дії 94,8%, коефіцієнт потужності 0,89, номінальна частота обертання 2970 об/хв. Кількість пазів статора – 36, а кількість алюмінієвих стрижнів ротора – 28.

Математична модель досліджуваного асинхронного двигуна базується на диференціальному рівнянні в часткових похідних у роторній системі координат [1], що чисельно вирішується методом скінченних елементів у програмі COMSOL Multiphysics:

$$\Delta A'_z - j\omega_1 s \mu \gamma A'_z = -\mu J'_{zs} + \mu \gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z},$$

де s – ковзання ротора; ω_1 – кутова швидкість обертання поля статора, рад/с; A'_z – аксіальна складова векторного магнітного потенціалу; μ – магнітна проникність матеріалу, Гн/м; $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$ – різниця потенціалів на кінцях ротора в аксіальному напрямку, В/м; J'_{zs} – густина сторонніх струмів, А/м².

Зазначене вище рівняння використовується для аналізу поля в асинхронному режимі.

Важливим елементом зазначеної математичної моделі є модель електромагнітних сил [2], які визначаються за допомогою *тензора магнітного натягу* Максвелла \vec{T} , що характеризує густину електромагнітної сили, прикладеної до поверхні розточки статора. В нормально-тангенціальній системі координат вектор тензора магнітного натягу розкладається на нормальну \vec{T}_n і тангенціальну \vec{T}_τ складові:

$$\vec{T} = \vec{n} T_n + \vec{\tau} T_\tau$$

Нормальна складова тензора магнітного натягу \vec{T}_n (направлена вздовж вектору нормалі до поверхні ротора) характеризує дію радіальних віброзбуджуючих сил на осердя статора, а тангенціальна скла-

дова (направлена уздовж дотичної до поверхні ротора) – *коливання обертового моменту*.

У процесі чисельних досліджень було побудовано математичну модель досліджуваного АД і проведено низку чисельних розрахунків з метою виявлення впливу ушкоджень стрижнів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна на його електромагнітний момент. Тензор магнітного натягу представлений із врахуванням довжини машини, тому його розмірність не Н/м², а Н/м. На рис. 1, 2 показано тангенціальну складову тензора магнітного натягу неушкодженого і ушкодженого АД відповідно. Густини струмів у статорі і роторі показані в кольорі, а кривими показано еквіпотенціальні лінії векторного магнітного потенціалу.

Виявлено, що середнє значення тангенціальної складової є не таким вже й малим порівняно з нормальною складовою, і воно може досягати 15–30 % від значення нормальної складової. З цих рисунків видно, що при появі двох ушкоджених стрижнів в області їх розташування зменшується тангенціальна складова (рис. 2), що призводить до зменшення інтегрального значення моменту в даний момент часу.

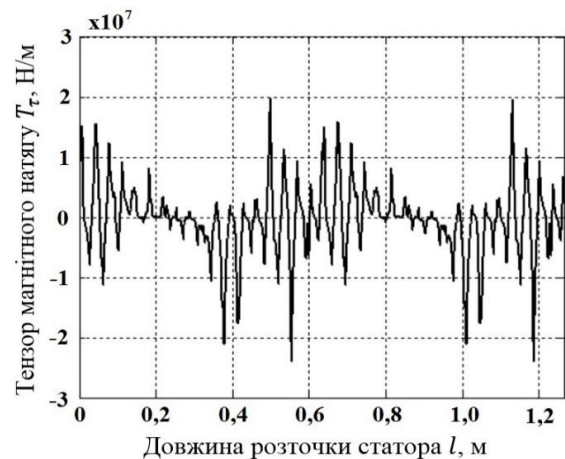


Рисунок 1 – Тангенціальна складова тензора магнітного натягу неушкодженого АД

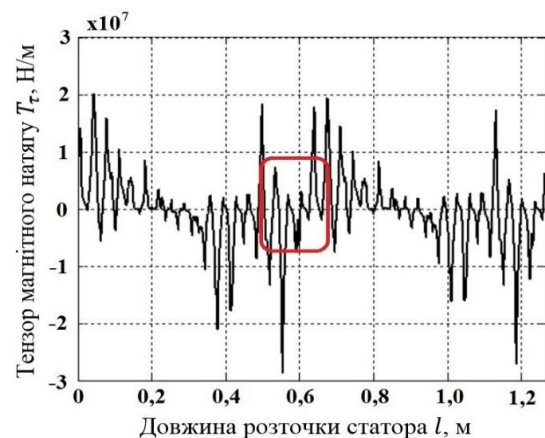


Рисунок 2 – Тангенціальна складова тензора магнітного натягу досліджуваного АД із двома ушкодженими стрижнями, що лежать в максимумі струмового полюса ротора

При появі ушкоджень ротора виникає явище амплітудної модуляції електромагнітного моменту, яке полягає в наступному. Струми в роторі рухаються відносно стрижнів ротора з частотою ковзання ($f_2 = f_1 \cdot s = 50 \text{ Гц} \cdot 0,01 = 0,5 \text{ Гц}$), й ушкоджені стрижні по чергово проходять області, в яких струми ротора або максимальні (рис. 3), або мінімальні (рис. 4). Коли ушкоджені стрижні знаходяться в області з максимальними струмами ротора, то їх вплив на електромагнітний процес є найбільшим і, тому миттєве значення моменту зменшується до величини M_{min} . Навпаки, коли ушкоджені стрижні знаходяться в області з мінімальними струмами ротора, вони практично не впливають на електромагнітний процес і, тому миттєве значення моменту буде максимальним M_{max} .

Таким чином, за наявності ушкоджених стрижнів в АД величина обертового моменту буде коливатися від мінімального до максимального значень.

На рис. 5 показано часову залежність обертового моменту для неушкодженого АД і для АД з ушкодженням двох і трьох стрижнів. Частота коливання моменту пов'язана з частотою ковзання на періоді $T=2c$, за який ротор зробить 100 обертів.

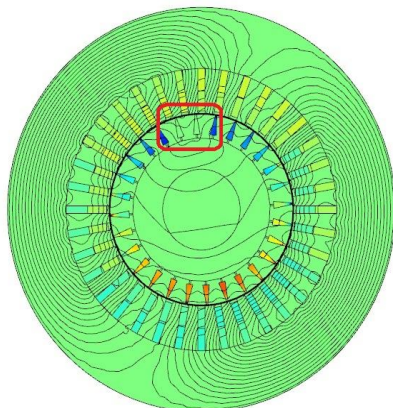


Рисунок 3 – Поперечний переріз досліджуваного АД з двома ушкодженими стрижнями, що лежать у максимумі струмового полюса ротора

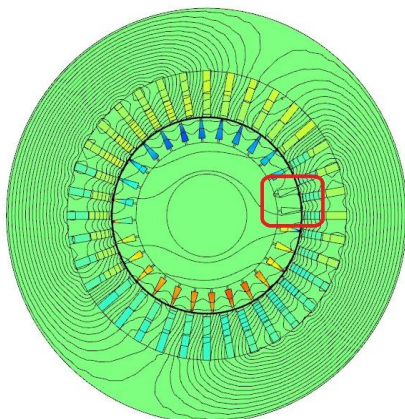


Рисунок 4 – Поперечний переріз досліджуваного АД з двома ушкодженими стрижнями, що лежать у мінімумі струмового полюса ротора

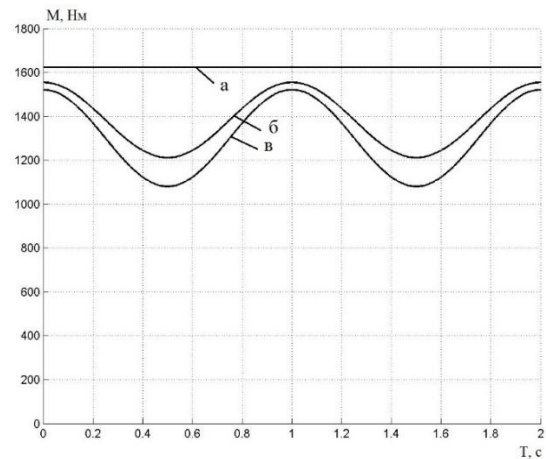


Рисунок 5 – Амплітудна модуляція обертового моменту АД на періоді частоти ковзання для: а) неушкодженого АД; б) АД з ушкодженням двох стрижнів; в) АД з ушкодженням трьох стрижнів

З рис. 5 видно, що зі збільшенням кількості ушкоджених стрижнів зменшується максимальне значення моменту, який взагалі може розвинути АД. Це значення залежить від впливу ушкоджених стрижнів на картину поля АД, коли вони розташовані в мінімумі струмового полюса ротора (рис. 4), тобто якщо там один стрижень, то він практично не впливає на картину поля в АД, а якщо там три стрижні, то їх вплив значно посилюється на картину поля і, як наслідок, дещо зменшується максимальне значення обертового моменту.

З рис. 5 видно, що у неушкодженого АД змінна складова моменту відсутня. При появі ушкоджених стрижнів ротора з'являється змінна складова моменту. Зі збільшенням кількості ушкоджених стрижнів постійна складова моменту зменшується, а змінна складова моменту збільшується (табл. 1, рис. 6). Ця особливість може бути використана при побудові систем діагностики на основі обертового моменту.

Результати чисельних досліджень приведено в табл. 1. Постійна і змінна складові моменту визначаються за наступними формулами:

$$M_{const} = M_{min} + \frac{M_{max} - M_{min}}{2};$$

$$M_{var} = \frac{M_{max} - M_{min}}{2}.$$

Для зручного оцінювання відносної зміни значення моменту доцільно ввести коефіцієнти постійної і змінної складових моменту:

а) коефіцієнт постійної складової моменту $k_{Mconst} = \frac{M_{const}}{M_{nbm}}$, що є відношенням постійної

складової моменту ушкодженого АД до значення моменту неушкодженого АД.

б) коефіцієнт змінної складової моменту $k_{Mvar} = \frac{M_{var}}{M_{nbm}}$, що є відношенням змінної складо-

вої моменту ушкодженого АД до значення моменту неушкодженого АД.

Значення моменту неушкодженого АД було розраховано як інтеграл тензора по розточці статора і складає $M_{nbm}=1624,26$ Нм.

Таблиця 1 – Результати досліджень впливу кількості ушкоджених стрижнів на момент

Вид ушкодження	Інтегральний момент, M_{min} , Н·м	k_{Mconst}	k_{Mvar}
Неушкоджений АД	1624,26	1,00	0,00
Ушкоджено 1 стрижень	1426,34	0,93	0,05
Ушкоджено 2 стрижні	1212,32	0,85	0,11
Ушкоджено 3 стрижні	1081,27	0,80	0,14
Ушкоджено 4 стрижні	780,37	0,70	0,22
Ушкоджено 5 стрижнів	503,19	0,60	0,29

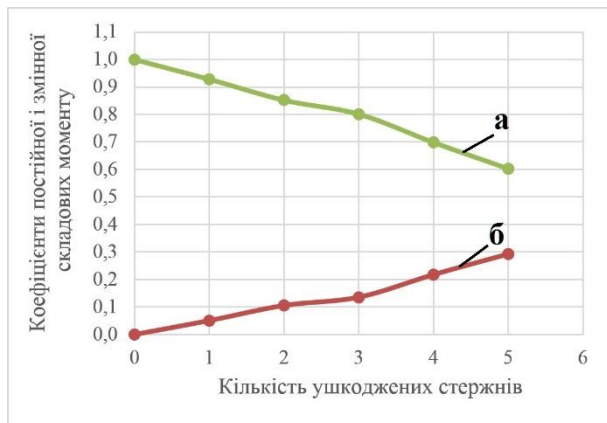


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнтів постійної k_{Mconst} (а) і змінної k_{Mvar} (б) складових моменту від кількості ушкоджених стрижнів

Результати проведених чисельних досліджень показують наступне. При появі одного ушкодженого стержня постійна складова моменту зменшується на 7 %, а змінна складова моменту досягає величини 5 % порівняно зі значенням моменту неушкодженого АД. Зменшення моменту призводить до зменшення корисної потужності двигуна, і для того, щоб АД продовжував нести теж саме навантаження з мережі буде додатково споживатися більший струм. Як наслідок, зростуть утрати в обмотках АД, збільшиться нагрів АД і погіршаться всі характеристики АД. Такі негативні явища мають місце вже при одному ушкодженому стрижні. А при трьох ушкоджених стрижнях постійна складова моменту зменшується на 20 %, а змінна складова моменту досягає величини 14 %, негативні явища будуть проявлятися ще більшою мірою. Окрім того, при появі

одного ушкодженого стрижня, інші стрижні можуть почати лавиноподібно виходити з ладу через перевантаження їх струмами, локальні перегріву і термомеханічні перевантаження.

Частота зміни обертового моменту АД залежить від величини його ковзання. Тому якщо ушкоджений АД призводить в рух механічне навантаження, яке з певних технологічних причин (наприклад, центрифуга розкачується з частотою в декілька герц) змінює свій обертовий момент із власною частотою, рівною частоті ковзання АД, то може виникнути *явище механічного резонансу*, що може призвести до механічної руйнації всього механізму. При цьому з'являються негативні низькочастотні коливання обладнання. Тому можна стверджувати, що ушкодження стержнів АД призводить не тільки до зменшення значення обертового моменту, зменшення надійності роботи АД, а й може призвести до пошкодження робочого обладнання. Це явище вносить корективи до вимог щодо якості електроприводу – необхідно уникати появи ушкоджень стрижнів ротора АД, що викликає низькочастотні коливання обертового моменту з частотою ковзання. На цю обставину раніше не зверталась увага. Безпеченню цієї умови сприяє використання методів діагностики ушкоджень АД, у тому числі на основі польових математичних моделей. При виявленні ушкоджених стрижнів рекомендується виводити АД у ремонт або хоча б зменшити його навантаження.

Отримані результати показують якісні і кількісні зміни в обертовому моменті АД при появі ушкоджених стрижнів. Ці результати можна використовувати в системах діагностики асинхронних двигунів з метою своєчасного виявлення ушкоджень ротора в режимі реального часу за результатами аналізу миттєвої складової електромагнітного моменту.

ВИСНОВКИ. При появі ушкоджених стержнів ротора відбувається зменшення середнього значення моменту і з'являється змінна складова моменту. Так, при ушкодженні навіть одного стрижня момент зменшується на 7 %, а змінна складова досягає величини 5 % від значення моменту неушкодженого АД.

Зі збільшенням кількості ушкоджених стрижнів постійна складова моменту зменшується, а змінна складова моменту збільшується.

За наявності ушкоджених стрижнів ротора змінна складова обертового моменту змінюється з частотою ковзання.

Поява змінної складової обертового моменту АД може бути використана в процесі моніторингу і діагностики як діагностична ознака, яка свідчить про наявність ушкоджених стрижнів.

При співпаданні частот коливання робочого механізму і низькочастотних коливань обертового моменту АД, що має ушкоджені стрижні, може виникнути явище механічного резонансу. Це явище вносить корективи до вимог щодо якості електроприводу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Васильовский Ю.Н., Гераскин А.А. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых

асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – Вип. 5. – С. 12–16.

2. Васьковский Ю.Н., Гераскин А.А. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – Вип. 2. – С. 56–61.

3. Калінов А.П., Мамчур Д.Г., Браташ О.В., Простак О.І. Оцінювання впливу неякісності напруги живлення на віброхарактеристики асинхронних двигунів // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. – 2009. – Вип. 4/2009 (57). – С. 78–81.

4. Мамчур Д.Г. Діагностика асинхронних двигунів на основі показників якості перетворення енергії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.

техн. наук: спец. 05.09.01. – Кременчук: КрНУ, Кременчук, 2010. – 20 с.

5. Kurek, J. and Osowski, S. (2010), “Support vector machine for fault diagnosis of the broken rotor bars of squirrel-cage induction motor”, *Neural Computing and Applications*, vol. 19. no. 4, pp. 557–564.

6. Lecointe, J.P., Cassoret, B., and Brudny, J.F. (2011), “Distinction of toothings and saturation effects on magnetic noise of induction motors”, *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 112, pp. 125–137.

7. Szabo, L., Dobai, J.B., and Biro, K.A. (2011), “Virtual Instruments for detecting rotor faults in induction motors”, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 119–122.

8. Zhen, D., Wang, T., Gu, F., and Ball, A.D. (2013), “Fault diagnosis of motor drives using stator current signal analysis based on dynamic time warping”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 34, no. 1, pp. 191–202.

INFLUENCE OF INJURIES OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS ON ELECTROMAGNETIC MOMENT

Yu. Vaskovskiy, O. Geraskin

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net

The influence of damage rods cage rotor induction motor at its electromagnetic torque. Field developed a mathematical model of the induction motor, which has a damaged rotor bars. It is shown that in case of damage rods cage rotor induction motor varies the magnitude and nature of the electromagnetic torque. If damaged rotor bars mean torque decreases and there is a variable component of the moment, which pulsates with a slip frequency. With the increase in the number of damaged rods constant component of the time is significantly reduced, and the variable component of the torque increases. When the frequencies of the oscillations of the working mechanism and low-frequency vibrations of a damaged engine torque, it may be a negative phenomenon of mechanical resonance. The appearance of the variable component of the electromagnetic torque of the induction motor can be used as a diagnostic sign, indicating the damaged rotor bars.

Key words: asynchronous motor diagnostics, point rod rotor.

REFERENCES

1. Vaskovskiy, Yu.N. and Geraskin, A.A. (2010), “Signal analysis of vibration sensors in short-circuited induction motors based on a mathematical model of vibroperturbational electromagnetic forces”, *Elektrotehnika i elektromehaniка*, vol. 5, pp. 12–16.

2. Vaskovskiy, Yu.N. and Geraskin, A.A. (2010), “Mathematical modeling of electromagnetic fields in short-circuited induction motor with a damaged rotor winding”, *Tekhnichna elektrodynamika*, vol. 2, pp. 56–61.

3. Kalinov, A.P., Mamchur, D.G., Bratash, O.V., and Prostack, O.I. (2009), “Influence evaluation of poor quality voltage on vibrocharacteristics of induction motors” // *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 4, no. 57, pp. 78–81.

4. Mamchur, D.G. (2010), “Diagnosis of induction motors based on the indicators of quality power conversion”, Thesis abstract for Cand. Sc. (Engineering.), 05.09.01, Kremenchuk Mykhailo

Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine.

5. Kurek, J. and Osowski, S. (2010), “Support vector machine for fault diagnosis of the broken rotor bars of squirrel-cage induction motor”, *Neural Computing and Applications*, vol. 19. no. 4, pp. 557–564.

6. Lecointe, J.P., Cassoret, B., and Brudny, J.F. (2011), “Distinction of toothings and saturation effects on magnetic noise of induction motors”, *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 112, pp. 125–137.

7. Szabo, L., Dobai, J.B., and Biro, K.A. (2011), “Virtual Instruments for detecting rotor faults in induction motors”, *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 119–122.

8. Zhen, D., Wang, T., Gu, F., and Ball, A.D. (2013), “Fault diagnosis of motor drives using stator current signal analysis based on dynamic time warping”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 34, no. 1, pp. 191–202.

Стаття надійшла 30.06.2014.