

А.В. КАЛІНІЧЕНКО, ВАТ "КЗТВ", Кременчук

ВПЛИВ ДИСБАЛАНСУ РОТОРА НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

Запропоновано метод моделювання електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна (ВРД), враховуючи нерівномірність повітряного проміжку, яка обумовлена дисбалансом ротора. Проведено моделювання кривих фазного струму та електромагнітного моменту ВРД як при збалансованому роторі, так і при наявності дисбалансу. Зроблено висновки про вплив величини відхилення ротора від збалансованого стану та типу дисбалансу на параметри кривої електромагнітного моменту.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, дисбаланс ротора, електромагнітний момент.

Вступ. Явище дисбалансу ротора присутнє практично в усіх електричних машинах у різній мірі. Воно виникає при виготовленні, в результаті зношування підшипників, через зміщення опор або прогин валу. Внаслідок цього відбувається викривлення магнітного потоку у повітряному проміжку, знижується ККД, з'являються додаткові вищі гармоніки поля, знижується пусковий момент, ростуть місцеві нагриви, а також підвищується рівень вібрації. При сильно розвинутому такому дефекті можливе зачіпання магнітопроводів ротора і статора, що веде до більш серйозних ушкоджень.

Дисбаланс ротора може проявлятися у вигляді [1, 2]:

- статичного ексцентриситету, коли відбувається зміщення вісі обертання ротора, при цьому, нерівномірний повітряний проміжок залишається нерухомим (див. рис. 1, *a*);
- динамічного ексцентриситету, коли виникають поворотні коливання (див. рис. 1, *b*);
- еліпсності або конусності ротора (див. рис. 1, *в*);
- неспіввісності між статором і ротором (див. рис. 1, *г*);
- прогину ротора (див. рис. 1, *д*).

Аналіз останніх досліджень та літератури. У роботі [1] для аналізу процесів за нерівномірного повітряного проміжку по довжині (див. рис. 1, *в*, *г*, *д*), електричну машину розбивають на ряд елементарних машин, які з'єднуються паралельно, при цьому, підведені до них напруги розподіляються однаково. Однак, за такого підходу складно врахувати зміну фазного струму внаслідок нерівномірності магнітної системи. У цьому випадку, досліджувану електричну машину доцільно замінити на

© А.В. Калініченко, 2014

еквівалентну, у якій повітряний проміжок розподілений рівномірно вздовж машини, а величина дисбалансу ротора (статичного і/або динамічного) замінюється середнім значенням дисбалансу елементарних машин.

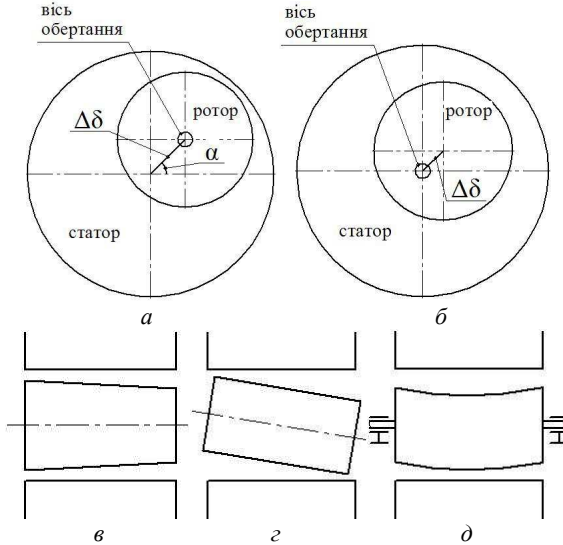


Рис. 1 – Типи дисбалансу ротора: *a* – статичний ексцентриситет; *б* – динамічний ексцентриситет; *в* – еліпсність або конусність ротора; *г* – неспіввісність між статором і ротором; *д* – прогин ротора

Мета роботи. Дослідження впливу різних типів дисбалансу ротора та величини відхилення на зміну параметрів кривих електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна (ВРД).

Матеріали досліджень. Для моделювання електромагнітного моменту ВРД використовується чисельний метод скінчених елементів, що реалізовано у програмному пакеті FEMM 4.2, який дозволяє проводити електромагнітні розрахунки у плоскопаралельній та вісьосиметричній двовимірній постановці, не має обмеження на число вузлів сітки скінчених елементів та є безкоштовним. Крім того, у даному програмному пакеті є можливість задавати параметри задачі програмно, на мовах Lua та MATLAB.

Моделювання електромагнітного моменту ВРД здійснюється для різних положень ротора при відповідних значеннях миттєвих фазних струмів, тому необхідною умовою для проведення електромагнітного розрахунку є визначення кривих струму для кожної фази.

Визначення кривої фазного струму ВРД.

Як відомо, живлення фаз ВРД здійснюється від інвертора, залежно від положення ротора, i є несинусоїдальним. На фазу подається заданий рівень напруги, який, при досягненні ротором заданого положення, змінює знак. Для кращого розуміння принципу формування кривої фазного струму розглянемо фізичні процеси, які відбуваються у фазі ВРД.

Еквівалентна схема однієї фази ВРД представлена на рис. 2.

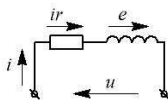


Рис. 2 – Еквівалентна електрична схема фази ВРД

Процеси, які відбуваються у фазі ВРД можна описати наступним рівнянням

$$i = \frac{u + e}{r}, \quad (1)$$

де i , u , r – струм, напруга і активний опір фази відповідно; e – наведена у фазі ЕРС (ЕРС протидії), яка направлена назустріч прикладеної до фази напруги і може бути виражена через похідну від потокозчеплення за часом ($d\Psi/dt$)

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (2)$$

Приклад кривої фазного струму ВРД, залежно від кута повороту ротора наведено на рис. 3.

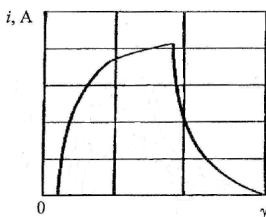


Рис. 3 – Крива фазного струму ВРД

Криву фазного струму, представлену на рис. 3 умовно розділяють на три ділянки [3]:

- ділянка різкого наростання струму ($\gamma_{on} \leq \gamma < \gamma_{1,}$);
- ділянка плавного спадання струму ($\gamma_1 \leq \gamma < \gamma_{off,}$);
- ділянка швидкого спадання струму до нульового значення ($\gamma_{off} \leq \gamma < \gamma_a,$).

Різке зростання струму відбувається за низького значенні ЕРС протидії e , яке знаходиться на інтервалі від неузгодженого положення до положення, коли полюси ротора починають перекривати полюси статора. На другій ділянці спостерігається плавне спадання струму, а в деяких випадках можливе зниження росту струму, що обумовлено наростанням ЕРС протидії. На третій ділянці відбувається спадання струму до нуля, що обумовлене інвертуванням фазної напруги.

Використовуючи математичну модель, яка представлена у [4], можна побудувати криву фазного струму ВРД. Вихідними даними для такої моделі є: значення індуктивності фази ІМ при узгодженому L_a та неузгодженому положенні ротора L_u , частота обертання ротора n , а також значення прямої $U_{ph,d}$ та інвертованої фазної напруги $U_{ph,i}$. Моделювання кривої фазного струму здійснюється для реального ВРД, у якого $n=1820$ об/хв, $U_{ph,d}=18$ В і $U_{ph,i}=22$ В. Індуктивності фази при узгодженому L_a та неузгодженому L_u положенні ротора визначаються за допомогою програмного пакету FEMM 4.2 так, як показано на рис. 4, і дорівнюють: $L_a=8,62$ мГн, $L_u=1,5$ мГн.

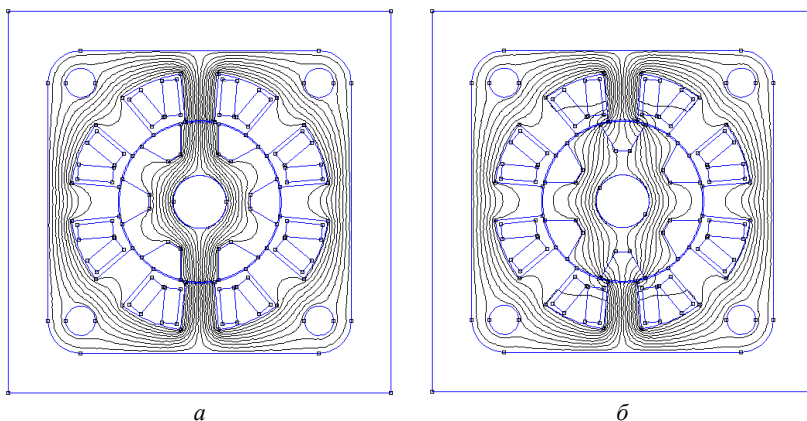


Рис. 4 – Визначення індуктивності фази: *а* – узгоджене положення ротора; *б* – неузгоджене положення ротора

На рис. 5 представлено криві фазного струму для одного комутаційного періоду, отримані при моделюванні, відповідно до [4], і від реального ВРД, при усередненні імпульсів струму у всіх фазах за один оберт ротора.

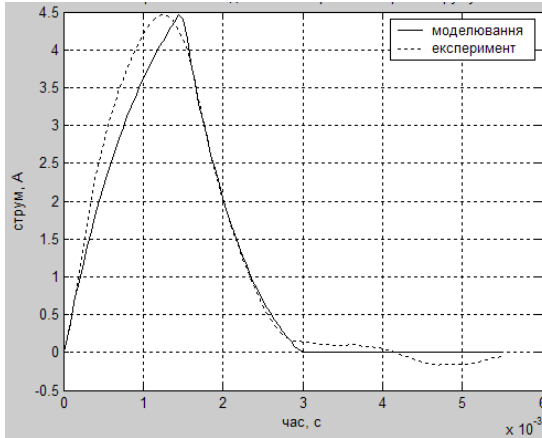


Рис. 5 – Порівняння кривої фазного струму, отриманої при моделюванні з кривою струму, отриманою експериментально

Щоб провести якісну оцінку схожості змодельованої кривої струму з реальною скористаємось такими поняттями як середньоквадратичне відхилення σ_I і коефіцієнт детермінації R_I^2

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{T_{cycle}} \sum_{t=0}^{T_{cycle}} [I_{exp}(t) - I_{mod}(t)]^2}; \quad (3)$$

$$R_I^2 = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{T_{cycle}} [I_{exp}(t) - I_{mod}(t)]^2}{\sum_{t=0}^{T_{cycle}} [I_{exp}(t) - \bar{I}_{exp}]^2}, \quad (4)$$

де $I_{exp}(t)$, $I_{mod}(t)$ – значення фазного струму у момент часу t для експериментальної і змодельованої кривої відповідно; \bar{I}_{exp} – середнє значення кривої струму, отриманої експериментально, за період одного комутаційного циклу T_{cycle} .

Для даного випадку було отримано наступні значення: $\sigma_I = 0,253$ А та $R_I^2 = 0,976$.

Якісну оцінку адекватності математичної моделі кривої фазного струму можна дати за шкалою Чеддока, відповідно до коефіцієнту R_I^2 . Оскільки $R_I^2 > 0,9$, то можна сказати, що якісна характеристика сили зв'язку моделі кривої струму з реальною кривою струму є дуже високою.

Моделювання електромагнітного моменту за відсутності дисбалансу ротора.

Після моделювання кривої струму для однієї фази необхідно побудувати криві фазного струму і для інших фаз. Для симетричної магнітної системи такі криві будуть відрізнятися лише на кут повороту ротора, що відповідає куту такту комутації

$$\gamma_i = \frac{2\pi}{mN_r}, \quad (5)$$

де m – число фаз ВРД; N_r – число полюсів ротора.

Тоді, криві струмів для 4-фазного ВРД за один цикл комутації зобразяться так, як показано на рис. 6.

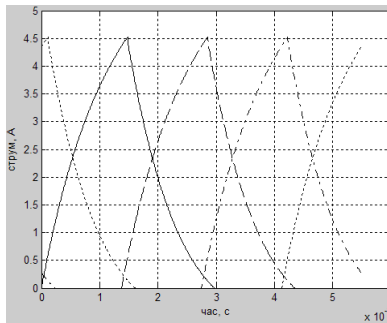


Рис. 6 – Фазний струм ВРД за один цикл за відсутності дисбалансу ротора

Моделювання електромагнітного моменту ВРД здійснюється для різних положень ротора, яким відповідають миттєві значення фазних струмів. На рис. 6 фазні струми представлені як функції від часу. Щоб виразити значення фазних струмів як функції від кута повороту ротора скористаємось наступним співвідношенням

$$\gamma = bnt, \quad (6)$$

де γ – кут повороту ротора у градусах.

При проведенні моделювання ротор займає особливі положення, які відповідають певним подія, що пов'язані з процесом комутації, або з певним положенням полюсів ротора відносно полюсів статора. Введення такого терміну обумовлене тим, що при фіксованій зміні кута повороту ротора складно визначити величину кутового кроку. При зavelикому значенні такого кроку вершини пульсацій електромагнітного моменту може бути зрізано, а при замалому – значно збільшиться час проведення розрахунку. Для даного розрахунку розглядаються наступні особливі положення:

- 1) неузгоджене положення полюсів ротора відносно полюсів статора;
- 2) подача на фазу прямої напруги;
- 3) початок перекривання полюсів статора полюсами ротора;
- 4) інвертування фазної напруги;
- 5) повне перекривання полюсів статора полюсами ротора;
- 6) кінець одного циклу комутації та початок наступного.

Розглянемо особливі положення для першої фази. Робимо припущення, що особливі положення 1) і 2) збігаються і дорівнюють нулю. Кут положення 3) розраховується за формулою

$$\gamma_c = \frac{180}{N_r} - \frac{\beta_s + \beta_r}{2}, \quad (7)$$

де β_s і β_r – полюсні кути статора і ротора у градусах відповідно.

Кут, який відповідає особливому положенню 4) визначається із математичної моделі струму для максимального значення. Кут положення 5) визначається за формулою

$$\gamma_e = \frac{180}{N_r} - \frac{\beta_s - \beta_r}{2}. \quad (8)$$

Кут положення 6) ротор займає за наступного розузгодженого положення і початку наступного такту комутації відносно даної фази, що відповідає періоду комутаційного циклу T_{cycle}

$$\gamma_f = T_{cycle} = \frac{60}{nN_r}. \quad (9)$$

Для кожної наступної фази особливі положення будуть зміщені на кут γ_i .

Електромагнітний момент у програмному пакеті FEMM 4.2 визначається для кожного положення ротора як сила через зважений тензор натягу Максвелла навколо точки (0, 0) (Torque via Weighted Stress Tensor) [5]. Картина магнітного поля ВРД для одного з положень ротора та результати моделювання електромагнітного моменту ВРД, у якому відсутній дисбаланс ротора, для одного циклу комутації представлено на рис. 7.

Моделювання електромагнітного моменту ВРД із дисбалансом ротора.

Як було сказано раніше, ВРД із дисбалансом ротора замінюється на еквівалентну машину, у якій повітряний проміжок однаковий по довжині магнітопроводу, тому при моделюванні електромагнітного моменту можна обмежитись тільки статичним і динамічним випадком. Для ВРД із рівномірним повітряним проміжком довжиною $\delta=0,4$ мм проводиться

моделювання статичного, при $\Delta\delta=0,1$ і $\Delta\delta=0,3$ мм (див. рис. 1, *а*), і динамічного, при $\Delta\delta=0,1$ і $\Delta\delta=0,3$ мм (див. рис. 1, *б*), дисбалансу ротора.

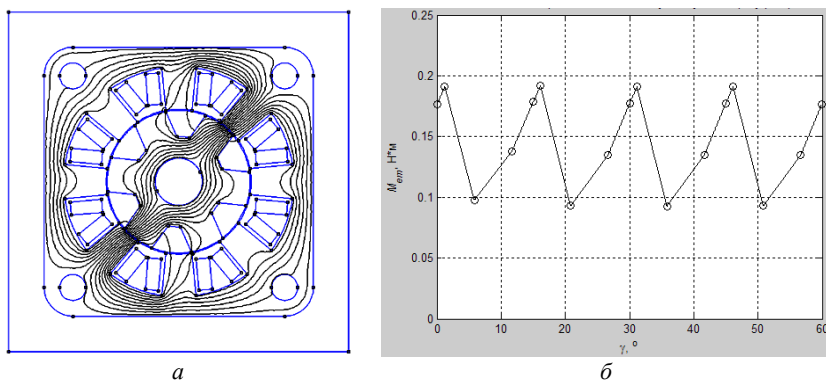


Рис. 7 – Моделювання електромагнітного моменту ВРД без дисбалансу ротора: *а* – картина магнітного поля; *б* – крива електромагнітного моменту

Так як за статичного дисбалансу повітряний проміжок не змінюється при обертанні ротора, то можна обмежитись моделюванням кривих фазних струмів (див. рис. 8) та електромагнітного моменту (див. рис. 9) для одного циклу комутації.

При динамічному дисбалансі ротора довжина повітряного проміжку змінюється залежно від кута повороту ротора, тому криві фазних струмів (див. рис. 10) та електромагнітного моменту (див. рис. 11) визначаються для повного обороту ротора.

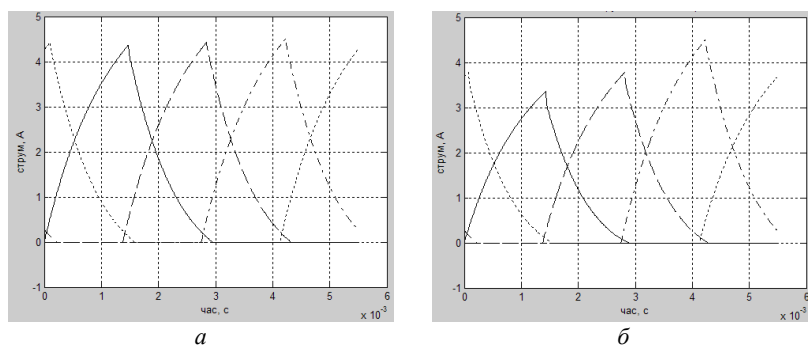


Рис. 8 – Криві фазних струмів для ВРД зі статичним дисбалансом ротора при *а* – $\Delta\delta=0,1$ мм і *б* – $\Delta\delta=0,3$ мм

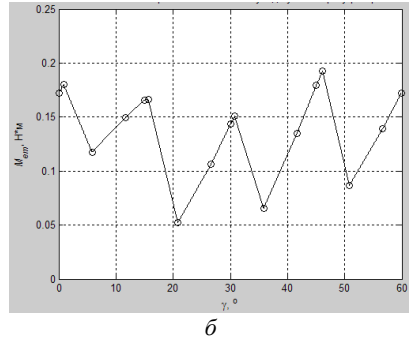
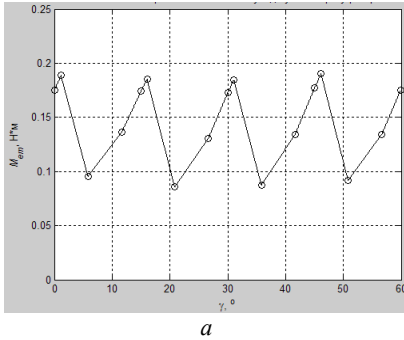


Рис. 9 – Криві електромагнітного моменту ВРД зі статичним дисбалансом ротора при $a - \Delta\delta=0,1$ мм і $б - \Delta\delta=0,3$ мм

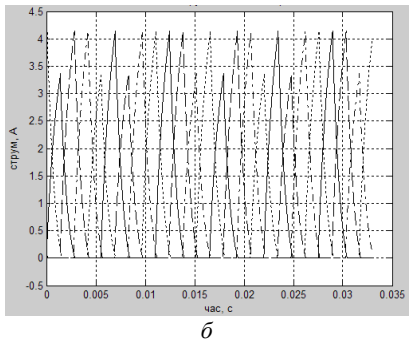
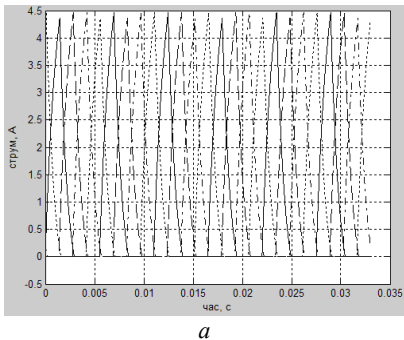


Рис. 10 – Криві фазних струмів для ВРД із динамічним дисбалансом ротора при $a - \Delta\delta=0,1$ мм і $б - \Delta\delta=0,3$ мм

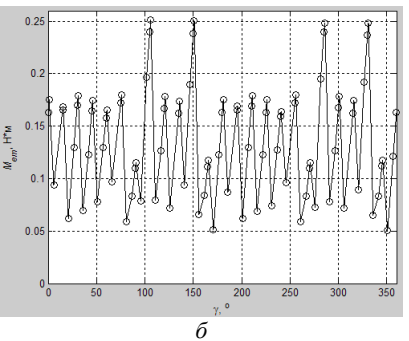
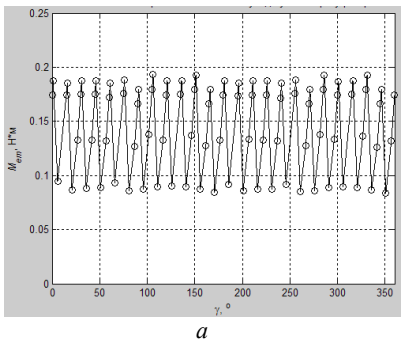


Рис. 11 – Криві електромагнітного моменту ВРД зі статичним дисбалансом ротора при $a \Delta\delta=0,1$ мм і $б \Delta\delta=0,3$ мм

Як видно з рис. 8-11, при $\Delta\delta=0,1$ мм спостерігаються незначні зміни кривих струму і електромагнітного моменту як при статичному, так і при динамічному дисбалансі ротора, порівняно з випадком, коли дисбаланс відсутній, тоді як при $\Delta\delta=0,3$ мм ці зміни проявляються більш суттєво. Порівняння параметрів кривих електромагнітного моменту ВРД як зі статичним і динамічним дисбалансом ротора, так і за відсутності дисбалансу, наведено у табл.

Таблиця – Порівняння параметрів кривих електромагнітного моменту

| Параметр кривої електромагнітного моменту, Н·м | Тип дисбалансу | | | | |
|--|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Дисбаланс відсутній | Статичний дисбаланс | | Динамічний дисбаланс | |
| | | $\Delta\delta=0,1$ мм | $\Delta\delta=0,3$ мм | $\Delta\delta=0,1$ мм | $\Delta\delta=0,3$ мм |
| Середнє значення | 0,1381 | 0,1349 | 0,1261 | 0,1345 | 0,1255 |
| Мінімальне значення | 0,0928 | 0,0857 | 0,0524 | 0,0835 | 0,0504 |
| Максимальне значення | 0,1916 | 0,1904 | 0,1924 | 0,193 | 0,251 |
| Амплітуда пульсацій | 0,0494 | 0,0524 | 0,07 | 0,0548 | 0,1007 |

Висновки. За допомогою методу, який представлено у даній роботі, можна провести моделювання електромагнітного моменту ВРД із дисбалансом ротора, враховуючи зміну кривих фазних струмів через зміну магнітного опору повітряного проміжку.

Використовуючи аналіз кривих фазних струмів, можна встановити тип (статичний і/або динамічний дисбаланс) і ступінь дисбалансу ротора ВРД.

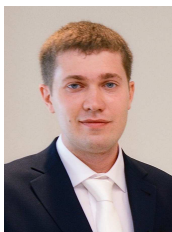
Аналіз отриманих результатів (табл.) показав, що наявність дисбалансу ротора веде до зменшення середнього електромагнітного моменту. Причому, величина такого моменту залежить від величини відхилення ротора від збалансованого стану $\Delta\delta$ і мало залежить від типу дисбалансу. При динамічному дисбалансі і при тих же значеннях $\Delta\delta$ спостерігається більша амплітуда пульсацій електромагнітного моменту, порівняно зі статичним дисбалансом.

Список літератури: 1. *Черный А.П.* Диагностика асинхронных двигателей с неуравновешенностью ротора / *А.П. Черный, Г.Ю. Сисюк, Д.И. Родькин* // Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды КГПИ. – Кременчуг: КГПИ. – 1999. – Выпуск 1. – С. 102-106. 2. *Руссов В.А.* Спектральная вибродиагностика / *В.А. Русов*. – Режим доступу: <http://vibrocenter.com/book5.htm>. 3. *Кузнецов В.А.* Вентильно-индукторные двигатели / *В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичёв*. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с. 4. *Овчинников И.Е.* Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / *И.Е. Овчинников* // Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век,

2006. – 336 с. **5. David Meeker** User's Manual. Fenite Element Method Magnetics. Version 4.2 / *David Meeker*. – Режим доступу: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>.

Bibliography (transliterated): **1. Chernyj A.P., Sisjuk G.Ju., Rod'kin D.I.** Diagnostika asinhronnyh dvigatelej s neuravnoveshennost'ju rotora. *Problemy sozdaniya novyh mashin i tehnologij: Nauchnye trudy KGPI*. Kremenchug: KGPI. 1999. Vypusk 1. 102-106. Print. **2. Rusov V.A.** Spektral'naja vibrodiagnostika. Web. <<http://vibrocenter.com/book5.htm>>. **3. Kuznecov V.A., Kuz'michjov V.A.** Ventil'no-induktornye dvigateli. Moscow: Izdatel'stvo MJeI, 2003. Print. **4. Ovchinnikov I.E.** Ventil'nye jelektricheskie dvigateli i privod na ih osnove (malaja i srednjaja moshhnost'). Kurs lekcij. – St. Peterburg.: KORONA-Vek, 2006. Print. **5. David Meeker.** User's Manual. Fenite Element Method Magnetics. Version 4.2 / *David Meeker*. Web. <<http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>>.

Надійшла (received) 10.10.2014



Калініченко Антон Вікторович, захистив диплом інженера за спеціальністю "Електричні машини і апарати" у 2010 р. в Кременчуцькому національному університеті ім. М. Остроградського. В 2010-2014 рр. навчався в аспірантурі. З серпня 2014 року є працівником Кременчуцького заводу технічного вуглецю. Наукові інтереси пов'язані з проблемами старіння та діагностики вентильних реактивних двигунів.