

УДК 621.313.323

О.С. БЕШТА (д-р техн.наук., проф.), С. Г. ФУРСА, А. І. ПРОХОРОВ,  
О.В. БАЛАХОНЦЕВ (канд.техн.наук., доц.)

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»  
fursasergii@ukr.net

## ЗМЕНШЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ МОМЕНТУ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ НА БАЗІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВБУДОВАНИМИ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

*Розглянуто аспекти виникнення пульсацій електромагнітного моменту в електроприводі на базі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ). Виконано аналіз існуючих заходів зменшення пульсацій моменту за допомогою конструктивних змін СДПМ. За результатами аналізу та моделювання запропоновані найбільш дієві конструктивні зміни для СДПМ з вбудованими магнітами.*

**Електропривод, синхронний двигун з вбудованими постійними магнітами, пульсації моменту.**

**Вступ.** Електропривод на базі СДПМ знаходить все більшого поширення в промисловості. Це обумовлено цілою низкою його переваг: проста та надійна конструкція, низькі витрати на обслуговування, абсолютно жорстка механічна характеристика, висока перевантажувальна здатність, мінімальні габаритні розміри, а також високі енергетичні та динамічні показники. Масове розповсюдження даного типу електропривода стримується його високою вартістю, яка обумовлена використанням дорогих рідкоземельних магнітів та наявністю датчика положення ротора. Для вирішення даної проблеми в [1, 2] запропоновано створювати СДПМ на базі класичних асинхронних двигунів. При цьому ротор виконується з вбудованими магнітами. Запропонована конструкція СДПМ має низьку собівартість виготовлення, є більш технологічна у виробництві та характеризується низкою додаткових переваг.

Одним з найважливіших критеріїв електропривода на базі СДПМ є величина пульсацій моменту, які мають різні причини виникнення. Дані пульсації негативно позначаються на точності керування, динаміці електропривода та спричиняють додаткові втрати. В динамічних режимах вони викликають додаткові акустичні шуми, вібрації та резонансні явища. Тому в сучасних електроприводах накладається обмеження на рівень пульсацій електромагнітного моменту, який повинен знаходитись в межах 1-2% від номінального моменту.

**Аналіз попередніх досліджень.** Для зменшення існуючих коливань моменту існує ціла низка заходів, які умовно можливо розділити на дві групи. Перша група охоплює заходи, які пов'язані з удосконаленням конструкції об'єкту керування [3-12]. При цьому дані конструктивні зміни часто ускладнюють процес виробництва та підвищують собівартість електричної машини. Альтернативним рішенням є використання систем керування зі спеціальними законами компенсації існуючих пульсацій моменту [13-14]. Принцип їх роботи полягає в живленні СДПМ певним полігармонічним струмом статора, який визначається гармонічним складом магнітного поля ротора. Недоліком даних систем є те, що вони підвищують втрати в електричному двигуні. Тому актуальним завданням є пошук технічних рішень щодо удосконалення конструкції, які б забезпечили необхідний рівень пульсацій моменту при мінімальному підвищенні собівартості СДПМ.

**Мета роботи.** Аналіз існуючих та обґрунтування найбільш ефективних заходів зменшення пульсацій моменту в електроприводі на базі СДПМ з вбудованими магнітами, створеного на базі класичного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором шляхом удосконалення його конструкції.

**Матеріал та результати досліджень.** Спочатку розглянемо усі складові електромагнітного моменту СДПМ. З теорії електричних машин відомо, що електромагнітний момент будь-якої електричної машини можливо визначити через зміну магнітної енергії поля:

$$M = \frac{dW}{d\vartheta} = p \cdot \frac{dW}{d\vartheta_e}, \quad (1)$$

де  $W$  – запасена магнітна енергія в повітряному зазорі;  $\vartheta, \vartheta_e$  – механічний та електричний кути повороту ротора,  $p$  – число пар полюсів.

Для порівняння з традиційними електричними машинами замінимо постійні магніти еквівалентною обмоткою з струмом  $i_2 = \sqrt{2} \cdot I_2$ , що створює аналогічне магнітне поле ротора. Аналогічні дії виконаємо з системою  $m_1$  фазних обмоток статора, яка замінюється однією обмоткою з еквівалентним струмом  $i_1 = \sqrt{2} \cdot I_1$ . В такому випадку магнітна енергія електричної машини з двома обмотками незалежно від їх розташування на магнітопроводі дорівнює:

$$W = i_1 \cdot i_2 \cdot L_{12} + \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot L_{11} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot L_{22}, \quad (2)$$

де  $L_{11}, L_{22}$  – індуктивності обмоток статора та ротора,  $L_{12}$  – взаємна індуктивність між обмотками.

© Бешта О.С., Фурса С. Г., Прохоров А. І., Балахонцев О.В., 2011

Індуктивності обмоток статора  $L_{11}$  та ротора  $L_{22}$ , а також їх взаємна індуктивність  $L_{12}$  є періодичними функціями кута повороту ротора. Незалежно від того, де розташована обмотка та як виконана, її індуктивність змінюється відносно деякого середнього значення  $L_0$ . Скориставшись розкладанням в ряд Фур'є та враховуючи тільки перші два члени ряду, отримуємо:

$$L_{11} = L_{110} + L_{11m} \cdot \cos 2p \cdot \vartheta, \quad (3)$$

$$L_{22} = L_{220} + L_{22m} \cdot \cos Z \cdot \vartheta, \quad (4)$$

$$L_{12} = L_{120} + L_{12m} \cdot \cos p \cdot \vartheta. \quad (5)$$

де  $Z$  – число зубців статора.

Підставивши вирази (3) - (5) в (2) та взявши похідну за кутом повороту ротора, електромагнітний момент в повітряному зазорі дорівнює:

$$M = -p \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L_{12m} \cdot \sin \vartheta_e - p \cdot i_1^2 \cdot L_{11m} \cdot \sin 2 \cdot \vartheta_e - \frac{Z}{2} \cdot i_2^2 \cdot L_{22m} \cdot \sin Z \cdot \vartheta. \quad (6)$$

З врахуванням того, що амплітуди індуктивностей обмотки статора та ротора дорівнюють

$$L_{11m} = \frac{L_{d1} - L_{q1}}{2} \quad \text{та} \quad L_{22m} = \frac{L_{d2} - L_{q2}}{2}, \quad (7)$$

де:  $L_{d1}, L_{q1}$  – повздовжня та поперечна індуктивності обмотки статора,  $L_{d2}, L_{q2}$  – повздовжня та поперечна індуктивності обмотки ротора, а потокозчеплення поля ротора з обмоткою статора –

$$\psi_2 = L_{12m} \cdot i_2, \quad (8)$$

та прийнявши  $\theta_e = \pi/2 - \vartheta_e$ , електромагнітний момент в повітряному зазорі можливо визначити:

$$M = p \cdot i_1 \cdot \psi_2 \cdot \sin \theta_e + \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot (L_{d1} - L_{q1}) \cdot \sin 2 \cdot \theta_e + \frac{Z}{4} \cdot i_2^2 \cdot (L_{d2} - L_{q2}) \cdot \sin Z \cdot \theta. \quad (9)$$

Як видно з виразу (9) електромагнітний момент СДПМ в загальному вигляді містить три складові. Перша складова представляє собою основний електромагнітний момент  $M_{осн}$  і відображає взаємодію між полем статора та полем ротора. В ідеальному випадку при чисто синусоїдальній формі струму живлення статора  $i_1$  та потокозчеплення поля ротора з обмоткою статора  $\psi_2$ , протікає незмінний у часі електромагнітний момент. В реальній електричній машині через особливості конструкції та живлення від перетворювача частоти, струм статора  $i_1$  та потокозчеплення  $\psi_2$  містять вищі гармоніки, які обумовлюють утворення періодичних складових електромагнітного моменту  $M_{дод}$ . Їх детальний теоретичний опис наведено в роботах [3, 13].

Друга складова представляє собою реактивний момент  $M_p$  від взаємодії струму статора зі сталеним магнітопроводом ротора. Він яскраво виражений лише в СДПМ з вбудованими магнітами, які через особливості розташування постійних магнітів мають різний магнітний опір по повздовжній та поперечним осях.

Третя складова представляє собою реактивний момент  $M_R$ , який виникає від взаємодії постійних магнітів з виступами та зубцями статора [4-5, 8-9]. Даний момент можливо додатково розкласти на полюсний  $M_{2p}$  та зубцевий  $M_Z$ . Перший утворюється через асиметрію в ярмі статора, що спричинена наявністю пазів для з'єднання пакету статора з корпусом, каналів для прокладання кабелів, тощо. Амплітуда полюсного реактивного моменту  $M_{2p}$  залежить від величини індукції в ярмі та розташування дефекту. Для зменшення його впливу виконують асиметричне розташування допоміжних пазів або вибирають сприятливу комбінацію між числом полюсів та допоміжних пазів. В деяких випадках він навіть може мати значно більший вплив на пульсації електромагнітного моменту ніж зубцевий реактивний момент  $M_Z$  [5].

Зубцевий реактивний момент  $M_Z$  виникає через взаємодію країв постійних магнітів та зубців статора. Його амплітуда залежить від цілої низки параметрів електричної машини: ширини шліцапазу та повітряного зазору, а також індукції в зазорі. При цьому число періодів реактивного моменту  $M_Z$  за один оберт ротора складає:

$$n_z = \frac{2p \cdot Z}{НСД [2p, Z]}, \quad (10)$$

де  $НСД [2p, Z]$  – найбільший спільний дільник для числа зубців статора та полюсів ротора.

Існуючі заходи зменшення пульсацій моменту за допомогою удосконалення конструкції СДПМ можливо умовно розділити на чотири групи:

- скіс зубців статора або постійних магнітів на роторі;

- вибір оптимальної комбінації числа пазів статора та полюсів ротора;
- удосконалення системи збудження на роторі;
- удосконалення конструкції статора.

Розглянемо більш детально дані методи та промодуємо деякі з них для запропонованого СДПМ з вбудованими магнітами за допомогою спеціалізованої програми для розрахунку електричних машин Maxwell v12. Даний програмний продукт базується на методі кінцевих елементів і виконує точний розрахунок статичних, гармонійних електромагнітних та електричних полів, а також перехідних процесів в польових задачах. При цьому необхідно відмітити, що ярмо статора виконувалось циліндричним без різних додаткових пазів та каналів. В такому випадку пульсації електромагнітного моменту СДПМ обумовлені лише наявністю зубцевого реактивного моменту  $M_Z$  та періодичних складових основного моменту  $M_{одод}$ .

Скіс зубців статора або постійних магнітів на роторі є відомим та ефективним методом для зменшення пульсацій електромагнітного моменту [8-9]. Зазвичай даний скіс становить одне зубцеве ділення –  $\alpha_z = 360^\circ / Z$ . Використання даного способу для зубців статора значно ускладнює виробництво та збільшує собівартість СДПМ. В той же час скіс постійних магнітів на роторі є більш практичним методом. Тому він знайшов більш широкого розповсюдження. Для перевірки розглянутого метода ротор СДПМ з вбудованими магнітами був розбитий на чотири пакети, які були зсунуті в аксіальному напрямі на кут  $\alpha_z$ . Отримані результати моделювання приведені на рис. 1. З нього видно, що застосування зсуву пакетів ротора з постійними магнітами дозволяє в 3,6 рази зменшити пульсації електромагнітного моменту.

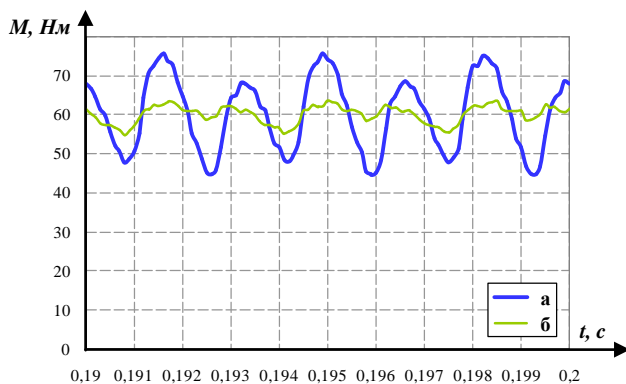


Рисунок 1 – Електромагнітний момент СДПМ:  
а) без зсуву пакетів ротора; б) з зсувом пакетів ротора

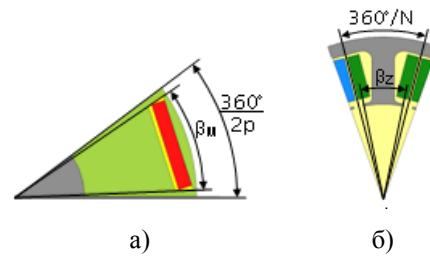


Рисунок 2 – Визначення відносної ширини магніту  $\alpha_m$  та відносної ширини зубця  $\alpha_z$

Вибір оптимальної комбінації числа пазів статора та полюсів ротора характеризується найбільшим спільним дільником НСД  $[2p, Z]$ . При цьому справедливе наступне правило: чим більший НСД, тим більша амплітуда коливальності моменту та менша їх частота за один оберт ротора [8]. Даний метод особливо актуальний для СДПМ з зосередженою обмоткою, що обумовлено принципом її побудови.

Удосконалення системи збудження на роторі об'єднує цілу низку різних заходів. Всі вони базуються на тому, щоб мінімізувати неоднорідність магнітного опору та вміст вищих гармонік магнітного поля ротора. Найбільш простим методом є вибір оптимальної відносної ширини постійного магніту

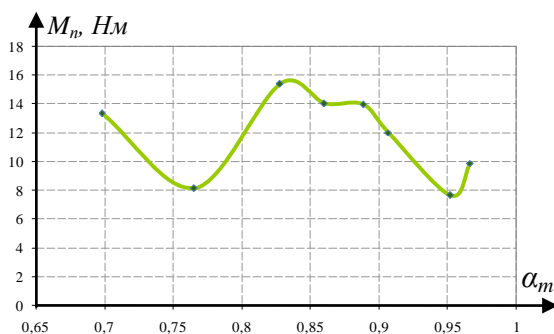


Рисунок 3 – Залежність амплітуди пульсацій моменту від відносної ширини постійного магніту  $\alpha_m$

або коефіцієнту полюсного перекриття  $\alpha_m = 2p \cdot \beta_m / 360^\circ$  (рис. 2 а). На рис. 3 представлена відповідна залежність амплітуди пульсацій моменту від відносної ширини постійного магніту  $\alpha_m$ . При цьому всі інші параметри СДПМ залишалися незмінними. В більшості випадках вважається чим вищий коефіцієнт полюсного перекриття, тим нижча амплітуда пульсацій моменту. Як видно з приведеного рис. 3, для обраного СДПМ з вбудованими магнітами існує два чітко виражені екстремуми, при яких амплітуда пульсацій моменту мінімальна. Перший підтверджує вищезгадане твердження, а другий досягається при значно нижчих значеннях  $\alpha_m$ . Це обумовлено тим, що розглянутий СДПМ з вбудованими магнітами має велику кількість зубців на один полюс. Тому при зменшенні ширини магніту виникає ситуація, коли виникає нове сприятливе взаємне розташування зубців статора та постійних магнітів ротора.

Також для зменшення коливань моменту використовують цілеспрямоване асиметричне розміщення магнітів або неповне намагнічування магнітів [8, 10]. Обидва методи не позбавлені недоліків, так перший ускладнює процес монтажу, а другий призводить до підвищення вартості постійних магнітів. Іншим заходом є округлення країв постійних магнітів при розташуванні їх на поверхні ротора. Це дозволяє зменшити змінення індукції в зазорі, а з нею і амплітуди пульсацій моменту.

Для СДПМ з вбудованими магнітами створюють ротор з спеціальною формою зовнішнього контуру, яка забезпечує розподілення магнітної індукції ротора з мінімальним вмістом вищих гармонік [11]. Даний метод дозволяє суттєво зменшити пульсації моменту при відносно незначному підвищенні собівартості. Це пов'язано з тим, що витрати на виготовлення необхідної прес-форми для листів пакету ротора відповідного типорозміру при масовому виробництві незначні. Окрім цього дане технічне рішення не ускладнює процес монтажу.

Удосконалення конструкції статора базується на тих же принципах, що і удосконалення системи збудження на роторі. Так, розташування додаткових пазів в зубцевих наконечниках підвищує частоту коливань моменту та зменшує його амплітуду [7, 8, 12]. Недоліком даного технічного рішення є збільшення діючого повітряного зазору СДПМ, що призводить до зменшення результуючого магнітного поля. Подібного

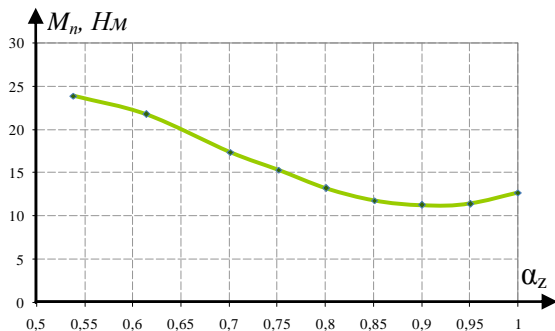


Рисунок 4 – Залежність амплітуди пульсацій моменту від відносної ширини зубця  $\alpha_z$

( $\alpha_z = 0,54$ ) до пазу без шліца ( $\alpha_z = 1,0$ ). Всі інші параметри залишалися незмінними. Отримана залежність приведена на рис. 4. Як видно з рис. 4, існує один чіткий мінімум амплітуди коливань моменту, який досягається при  $\alpha_z = 0,90$ . При цьому необхідно відмітити, що необхідність укладання обмотки в пазу накладає обмеження на мінімальну ширину шліца (максимальну ширину зубця). З врахуванням характеру приведеної залежності можливо зробити висновок, що раціональну відносну ширину зубця можливо реалізувати при мінімально допустимому, з точки зору виробництва, шліці.

Для перевірки отриманих результатів моделювання було створено експериментальний зразок електропривода на базі СДПМ з вбудованими магнітами. При цьому було виготовлено два варіанти ротора – без та з зсувом пакетів. Практична реалізація та дослідження відбувались на базі компанії BAUER GmbH (м. Есслінген, ФРН), яка є одним світових лідерів з виробництва мотор-редукторів. Стенд для вимірювання пульсацій моменту представлений на рис. 5. Він складається з навантажувальної машини постійного струму з відповідною системою керування, редуктора, вимірювального валу та з'єднувальних муфт. Для вимірювання існуючих пульсацій моменту, навантажувальної машини постійного струму обертає СДПМ з вбудованими магнітами з частотою 2-3 оберти за хвилину. При цьому реєстрація моменту виконувалась за допомогою вимірювального валу. В такому випадку пульсації моменту СДПМ обумовлені лише наявністю зубцевого реактивного моменту  $M_Z$ . Відповідні



Рисунок 5 – Стенд для вимірювання зубцевого реактивного моменту  $M_Z$  СДПМ з вбудованими магнітами

отримані залежності зубцевого реактивного моменту  $M_Z$  від положення ротора приведені на рис. 6. Як бачимо зсув пакетів ротора зменшив зубцевий реактивний момент  $M_Z$  приблизно в 3 рази. Отримані результати підтверджують високу точність моделювання за допомогою спеціалізованої програми Maxwell v12.

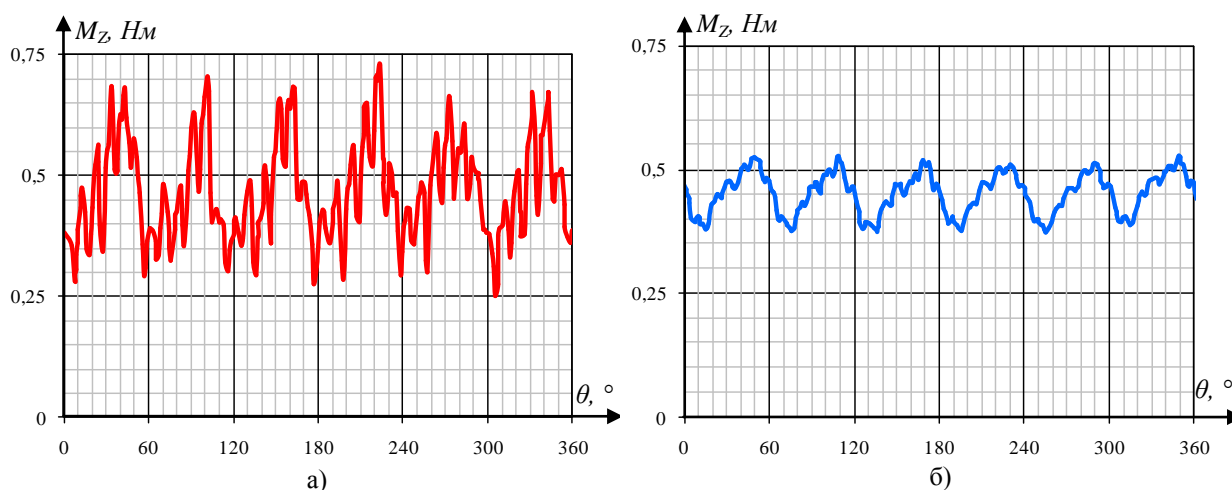


Рисунок 6 – Осцилограми зубцевого реактивного моменту  $M_Z$  :  
а) без зсуву пакетів ротора; б) з зсувом пакетів ротора

### Висновки.

1. Пульсації електромагнітного моменту електропривода на базі СДПМ в найбільшій мірі обумовлені наявністю періодичних складових основного моменту  $M_{\text{доп}}$ , які виникають через взаємодію вищих гармонік струму та потокозчеплення поля ротора, та зубцевого реактивного моменту  $M_Z$ . Для їх зменшення необхідно використовувати цілеспрямоване удосконалення конструкції СДПМ.
2. Найбільш дієвими заходами є зсув пакетів ротора СДПМ з вбудованими магнітами на одне зубцеве ділення  $\alpha_z$ , або виконання спеціальної форми зовнішнього контуру ротора.
3. Правильний вибір відносної ширини зубця та коефіцієнту полюсного перекриття полюса ротора дозволяє досягти відчутного зниження пульсацій моменту без підвищення собівартості СДПМ.
4. За результатами експериментальної перевірки підтверджено ефективність застосування зсуву пакетів ротора СДПМ з вбудованими магнітами для зменшення пульсацій моменту, а також високу достовірність отриманих результатів моделювання за допомогою спеціалізованої програми Maxwell v12.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Бешта О.С. Обґрунтування доцільності використання СДПМ з вбудованими магнітами / Бешта О.С., Балахонцев О.В., Фурса С.Г. // Вісник КДПУ: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 4/2010(63). – Ч.2 – Кременчук: КДПУ, 2010. – С. 73-75.
2. Розробка синхронного двигуна з постійними магнітами мінімальної вартості / Півняк Г.Г., Бешта О.С., Фурса С.Г., Nolle E., Neuberger N. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, №28. – С.426-427.
3. Huth G. Nutrustung von permanenterregten AC-Servomotoren mit gestaffelter Rotoranordnung // Electrical Engineering. – 1996. – №78. – S. 391-397.
4. Jurisch F. Erfahrungsbericht: Fertigungsoptimierte geschränkte Schale // Innovative Klein- und Mikroantriebe, Darmstadt, 2004. – S. 29-34.
5. Афанасьев А.А. Влияние технологических особенностей пакета статорного сердечника магнитоэлектрического вентильного двигателя на его реактивный момент / Афанасьев А.А., Ефимов В.В., Нестерин В.А. // Электричество. – 2009. – №9. – С. 45-48.
6. Рымша В.В. Рациональные соотношения геометрических размеров в вентильном двигателе с постоянными магнитами и дополнительными полюсами / Рымша В.В., Радимов И.Н., Чан Т.Т.Х., Процына З.П. // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2008. – № 70. – С. 50-54.
7. Рымша В.В. Проектный синтез вентильного двигателя с постоянными магнитами / Рымша В.В., Радимов И.Н., Чан Т.Т.Х. // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2008. – № 70. – С. 32-37.
8. Zhu Z.Q. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines / Zhu Z.Q., Howe D. // IEEE Transaction on energy conversion, vol. 15, 2000. – S. 407-412.
9. Huth G. Nutrustung von permanenterregten AC-Servomotoren mit gestaffelter Rotoranordnung // Electrical Engineering. – 1996. – №78. – S. 391-397.
10. C.S. Koh, J.-S. Seol New cogging-torque reduction method for brushless permanent-magnet motors // IEEE Trans. Magn., vol. 39, № 6, 2003. –S. 3503-3506.
11. Патент EP 1 746 707 A1, H02K 1/27 Permanentmagneterregte bürstenlose Synchronmaschinen mit eingebetteten Magneten und mit trapezförmig verlaufender elektromagnetischer Kraft / Siemens Aktiengesellschaft.

12. Bianchi N. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors / Bianchi N., Bolognani S. // IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 38, № 5, 2002. – S. 1259-1265.

13. Grotstollen H. Die Unterdrückung der Oberwellendrehmoment von Synchronmotoren durch Speisung mit überschwingungsbehaftetem Strom // Archiv für Elektrotechnik. – 1984.– №67. – S. 17-27.

14. J. Holtz Identification and compensation of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives / J. Holtz, L. Springob // IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, April 1996., pp. 309-320.

Надійшла до редколегії 24.03.2011

Рецензент: В.Ф.Сивокобиленко

А. С. БЕШТА, С. Г. ФУРСА, А. И. ПРОХОРОВ,  
А. В.БАЛАХОНЦЕВ  
Государственное высшее учебное заведение  
«Национальный горный университет»

O. BESHTA, S. FURSA, A. PROKHOROV,  
A. BALAKHONTSEV  
State Institution of Higher Education  
«National Mining University»

**Уменьшение пульсаций момента в электроприводе на базе синхронного двигателя с встроенными постоянными магнитами.** Рассмотрены аспекты возникновения пульсаций электромагнитного момента в электроприводе на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Выполнен анализ существующих методов уменьшения пульсаций момента при помощи конструктивных изменений СДПМ. По результатам анализа и моделирования предложены наиболее эффективные конструктивные изменения для СДПМ с встроенными магнитами.  
*Электропривод, синхронный двигатель со встроенными постоянными магнитами, пульсации момента.*

**Minimization of Torque Pulsations in Electric Drive with Internal Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors.** Causes of torque pulsations in electric drive with permanent magnet synchronous motors are investigated. Construction-based approaches for pulsation minimization are analyzed. The most efficient construction modifications for internal-mounted permanent magnet synchronous motors are recommended on results of analysis and simulation.  
*Electric drive, internal-mounted permanent magnet synchronous motor, torque pulsations.*