

UDK 62-83:621.313.323

**O. Beshta¹, Korrespondierendes Mitglied der Nationalakademie der Wissenschaften der Ukraine, Dr. Sc., Prof.,
E. Nolle², Dr.-Ing., Prof.,
M. Kuvaiev¹**

1 – Nationale Bergbauuniversität, Dnipro, Ukraine, e-mail: beshtaa@nmu.org.ua; mykola.kuvaiev@ukr.net
2 – Hochschule Esslingen, Goeppingen, Bundesrepublik Deutschland, e-mail: Eugen.Nolle@hs-esslingen.de

ENTWURF EINER EINFACHEN UND MODIFIZIERTEN RASTMOMENTKOMPENSATION FÜR DIE PERMANENTERREGTE SYNCHRONMASCHINE

**O. Beshta¹, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E. Nolle², Dr.-Ing., Prof.,
M. Kuvaiev¹**

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipro, Ukraine, e-mail: beshtaa@nmu.org.ua; mykola.kuvaiev@ukr.net
2 – Hochschule Esslingen (University of Applied Sciences), Goeppingen, Federal Republic of Germany, e-mail: Eugen.Nolle@hs-esslingen.de

THE DEVELOPMENT OF THE SIMPLE MODIFIED CONTROL LAW FOR THE COMPENSATION OF THE COGGING TORQUE IN THE SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

**O. С. Бешта¹, член-кор. НАН України, д-р
техн. наук, проф.,
О. Нолле², д-р-інж., проф.,
М. В. Куваєв¹**

1 – Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпро, Україна, e-mail: beshtaa@nmu.org.ua; mykola.kuvaiev@ukr.net
2 – Есслінгенський університет прикладних наук, м. Гьоппінген, Федеративна Республіка Німеччина, e-mail: Eugen.Nolle@hs-esslingen.de

РОЗРОБКА ПРОСТОГО МОДИФІКОВАНОГО ЗАКОНУ КОМПЕНСАЦІЇ ЗУБЦЕВОГО МОМЕНТУ СИНХРОННОЇ МАШИНИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Ziel. Entwicklung einer einfachen und modifizierten Rastmomentkompensation für eine Transversalflussmaschine (TFM), die als Sonderbauform der permanenterregten Synchronmaschine (PMSM) zum Direktantrieb für C-Pressen in der Servo-Direkt-Technologie eingesetzt werden soll.

Methode. Nachfolgend werden Möglichkeiten der Rastmomentreduzierung vorgestellt, bei der man die Rastmomente durch eine geeignete Stromvorgabe reduziert bzw. weitgehend vermeidet.

Ergebnisse. Alternativ wird sowohl eine einfache als auch eine verbesserte, modifizierte Rastmomentkompensation für die TFM bzw. allg. für PMSM entwickelt.

Neuheit. Entworfen wird eine drehzahlabhängige Rastmomentkompensation, unter Berücksichtigung des Amplitudenverhältnisses und der Phasenverschiebung zwischen dem Kompensationsstromsignal und dem Drehmoment.

Vorteile, Anwendung. Verbesserung der Qualität bei Stanz- und Umformprozessen.

Stichworte: *permanenterregte Synchronmaschine, Transversalflussmaschine, Rastmoment, Drehmomentwelligkeit, Rastmomentkompensation, Amplitudenverhältnis, Phasenverschiebung*

Aufgabenstellung. Für eine neue Generation von Servopressen in der sog. Servo-Direkt-Technologie benötigt der Hersteller von Pressen möglichst kompakte, hochdynamische und hochüberlastbare elektrische Direktantriebe mit exzellentem Wirkungsgrad. Dazu werden bisher konventionelle permanenterrregte, wassergekühlte Synchronmaschinen zugekauft und eingesetzt.

Der Pressenantrieb arbeitet dabei mit einer vorgegebenen variablen Belastung. Eine Momentwelligkeit des Antriebes kann sich daher nachteilig auf die Qualität des Umformprozesses auswirken. Eine Ursache für diese Drehmomentwelligkeit bei elektrischen Maschinen mit Permanentmagnetregung ist das Rastmoment. Dieses entsteht u. a. durch das Zusammenwirken des magnetischen Rotorfeldes mit dem Statoreisen. Je stärker daher das Rotormagnetfeld ist, desto größer kann auch der Spitzenwert des überlagerten Rastmomentes werden.

Dieses Rastmoment ist bei TFM, als Folge des dort starken Rotormagnetfeldes, oft sehr groß und die Auswirkungen sind insbesondere bei Direktantrieben mit ihrer typisch kleinen Drehzahl besonders störend.

Hauptteil. Zwar kann man das Rastmoment durch konstruktive Änderungen (z. B. eine andere Zahn- oder Magnetform, durch optimale Statorzahn- bzw. Magnetzahlen, etc.) reduzieren, was aber oft zu einem erhöhten Herstellungsaufwand und somit zu höheren Motorkosten führt. Daher wird hier nachfolgend eine andere Möglichkeit der Rastmomentreduzierung untersucht, bei der man deren Entstehung z. B. durch eine geeignete Stromvorgabe vermeidet [1, 2].

In [1] wurde die Einführung einer einfachen und modifizierten Rastmomentkompensation allg. für die permanenterrregte Synchronmaschinen untersucht.

Darin wird gezeigt, dass der Verlauf des Rastmomentes bei PMSM allg. ausreichend genau mit Hilfe von FEM-Simulationen bestimmen werden kann.

Der so mittels 3D-FEM berechnete Verlauf des Rastmomentes für eine TFM ist in Bild 1 dargestellt.

Aus dem zeitlichen Verlauf des Rastmomentes nach Bild 1 lässt sich dann mit Hilfe einer Frequenzanalyse dessen Frequenzspektrum bestimmen. Diese Frequenzanalyse kann in Maxwell automatisch durchgeführt werden. Mit den so bekannten Werten der Amplituden und Phasen lässt sich der Verlauf des Rastmomentes schließlich als Fourier-Reihe (1) darstellen

$$M_R = M_{R0} + M_{R1} \cdot \cos(\theta_{el} + \gamma_1) + M_{R2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_{el} + \gamma_2) + \dots + M_{Rk} \cdot \cos(k \cdot \theta_{el} + \gamma_k) + \dots, \quad (1)$$

wobei $M_{R0}, M_{R1}, \dots, M_{Rk}$ – die Amplituden und $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ – die Phasen der Rastmomentharmonischen angeben; θ_{el} – der elektrische Winkel.

Bei der Rastmomentkompensation nach [1] mit Hilfe des Steuerungssystems wird ein geeigneter Hilfsstrom i_{qkom} zum Hauptstrom i_q vor dem Stromregler addiert, der die gleichen maßgeblichen Harmonischen wie das Rastmoment aufweist (Bild 2)

$$i_q^* = i_q + i_{qkom}. \quad (2)$$

Dieses Kompensationsstromsignal i_{qkom} wird dann auf den Eingang des Stromreglers gelegt, so dass die Simulation des Systems jetzt mit dieser Korrektur durchgeführt wird.

Die Ergebnisse dazu sind für die Bemessungsdrehzahl $n_N = 40$ U/min in Bild 3, *a*, und für eine kleine Drehzahl $n = 1$ U/min in Bild 3, *b* dargestellt.

Häufig bewertet man die Qualität eines Antriebes anhand der Drehmomentschwingungen, da deren Amplituden und Verläufe oftmals weitgehend von der Drehzahl unabhängig sind.

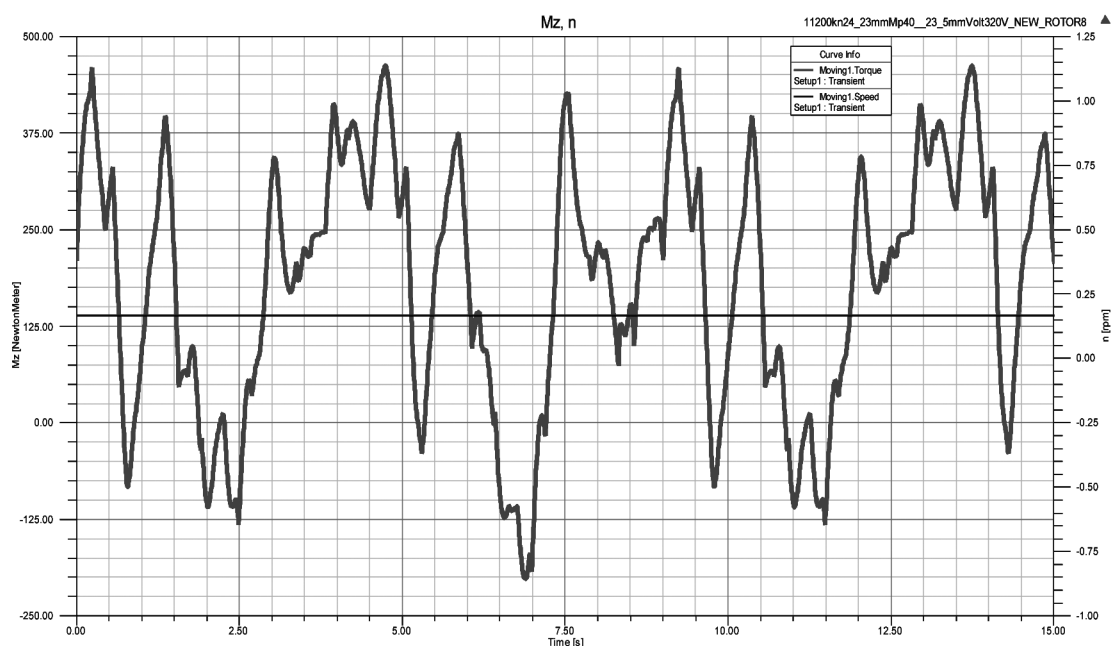


Bild 1. Mit Maxwell berechnetes Rastmoment einer TFM

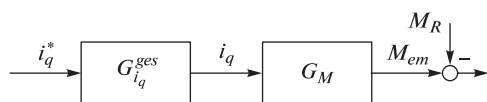


Bild 2. Strukturschaltbild des Glieds $G_{i_q}^{ges}$ und G_M :

$G_{i_q}^{ges}$ – die Übertragungsfunktion des geschlossenen Stromregelkreises und G_M – die Übertragungsfunktion für das Drehmoment

Dies zeigt sich auch bei einem Vergleich der Verläufe in den Bildern 3, a und 3, b bis jeweils 1,5 s, die sich mit dem überlagerten Rastmomentverlauf nach Bild 1 ja auffallend ähneln.

Allerdings weist dabei das maximale Rastmoment mit 450 Nm noch etwa 4 % des Bemessungsdrehmomentes auf, sollte aber laut Vorgabe des Anwenders hier 2 % des Arbeitsdrehmomentes nicht überschreiten. Dabei muss man noch berücksichtigen, dass das Arbeitsdrehmoment des Pressenantriebes betriebsbedingt (durch unterschiedliche konkrete Umformaufgaben) auch kleiner als das Bemessungsdrehmoment sein kann, wodurch sich die prozentualen Schwingweiten dann noch zusätzlich vergrößern.

Mit der einfachen Rastmomentkompensation halbiert sich etwa die Schwingungsamplitude des Drehmomentes bei Bemessungsdrehzahl nach Bild 3, a durch den Kompensationsstrom i_{qkom} und bei der kleinen Drehzahl nach Bild 3, b werden die Schwingungen praktisch vollständig eliminiert.

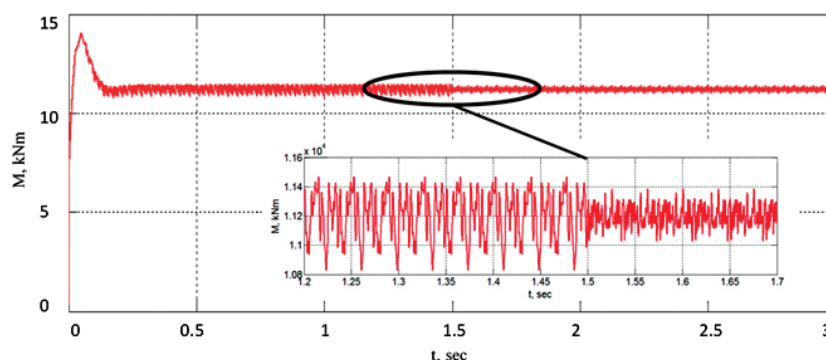
Das Ergebnis dieser Simulation, wie auch entsprechende Untersuchungen in [2] zeigen, dass die Wirksamkeit des Kompensationsstromes i_{qkom} drehzahlabhängig ist. Offensichtlich kompensiert dieser das Rastmoment besser bei kleiner Drehzahl, was eine Folge des aperiodischen Gliedes in der Übertragungsfunktion $G_{i_q}^{ges} \cdot G_M$ ist. Dieses bedeutet, dass sich das Amplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung beim Übertragungsglied $G_{i_q}^{ges} \cdot G_M$ mit zunehmender Frequenz deutlich vergrößern.

Die Amplituden der Harmonischen des Hilfsstromes bestimmt man aus dem Amplitudenverhältnis mit Hilfe des Übertragungsgliedes [3, 4], wobei dieses Verhältnis zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignal frequenzabhängig ist. Dabei kann man die Amplitude der n-ten Stromharmonischen (Stromwelle) i_{qkom-n} durch die entsprechende Rastmomentharmonische (Rastmomentwelle) M_{R-n} mit der nachfolgenden Formel berechnen

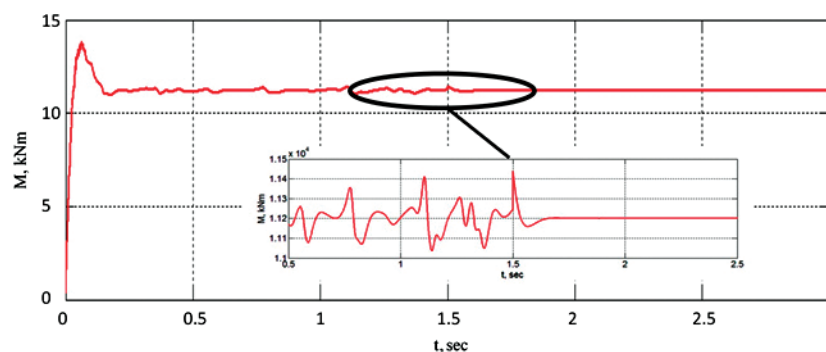
$$i_{qkom-n} = \frac{M_{R-n}}{A(\omega_{e-n})}, \quad (3)$$

mit $A(\omega_{e-n})$ – als Amplitudenverhältnis der n-ten Harmonischen und ω_{e-n} – als deren Eckfrequenz (Kreisfrequenz).

Dazu muss man zunächst die Übertragungsfunktion des Übertragungsgliedes bestimmen, wobei die Stromvorgabe i_{qkom} die Eingangsgröße und das Rastmoment M_R die Ausgangsgröße darstellt. Dazu werden aus dem



a



b

Bild 3. Simulierte Drehmomentverläufe eines TFM-Pressenantriebes bei a Bemessungsdrehzahl 40 U/min und b kleiner Drehzahl 1 U/min mit einfacher Rastmomentkompensation ab 1,5 s

Blockdiagramm in Bild 2 die Übertragungsfunktionen des geschlossenen Stromregelkreises $G_{i_q}^{ges}$ und die Übertragungsfunktion G_M verwendet.

Dieser geschlossene Stromregelkreis wird dann mit Hilfe des Betragsoptimums optimiert, wobei für $G_{i_q}^{ges}$ gilt

$$G_{i_q}^{ges} = \frac{1}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_\mu \cdot s + 1}, \quad (4)$$

mit T_μ – als kleinster (nichtkompensierter) Zeitkonstante.

Dabei hat die Übertragungsfunktion G_M die Form

$$G_M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{pm}, \quad (5)$$

wobei Ψ_{pm} – den verketteten magnetischen Fluss der Permanentmagnete und p – die Polpaarzahl angibt.

Aus den Gleichungen (4) und (5) folgt so für die benötigte Übertragungsfunktion

$$G_{i_q}^{ges} \cdot G_M = \frac{\frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{pm}}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_\mu \cdot s + 1}. \quad (6)$$

Damit wird z. B. das Amplitudenverhältnis der Übertragungsfunktion (6) für die Grundwelle definiert

$$A(\omega_{e-1}) = \frac{\frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_{pm}}{\sqrt{1 + 4 \cdot T_\mu^4 \cdot \omega_{e-1}^4}}. \quad (7)$$

Analog werden dann auch die Amplitudenverhältnisse der Übertragungsfunktionen für die anderen Harmonischen (Oberwellen, bei deren Frequenz) bestimmt. Die Ströme i_{qkom} zur Kompensation der Rastmomente müssen dann noch um 180° elektrisch (π , gegenphasig) gegenüber den Rastmomentanteilen M_R verschoben werden.

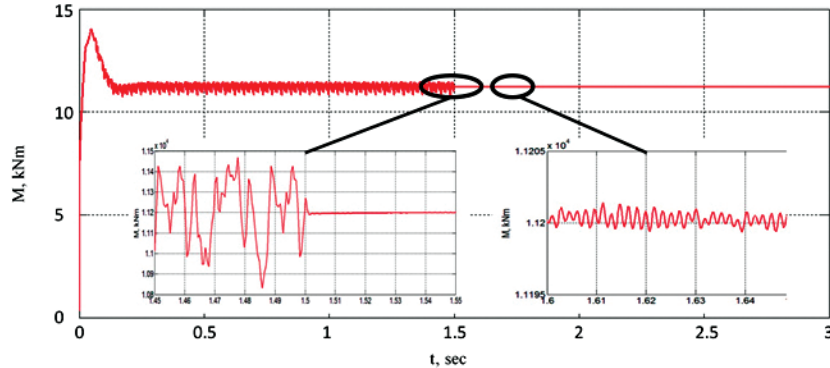
Diese Phasenverschiebung vergrößert sich deutlich beim Übertragungsglied $G_{i_q}^{ges}$ mit zunehmender Frequenz. Besonders starken Einfluss hat diese Phasenverschiebung bei den Oberwellen (höhere Harmonische), deren Frequenz (8) ja das n-fache der Grundwellenfrequenz aufweist

$$\omega_{e-n} = n \cdot \omega_{e-1}, \quad (8)$$

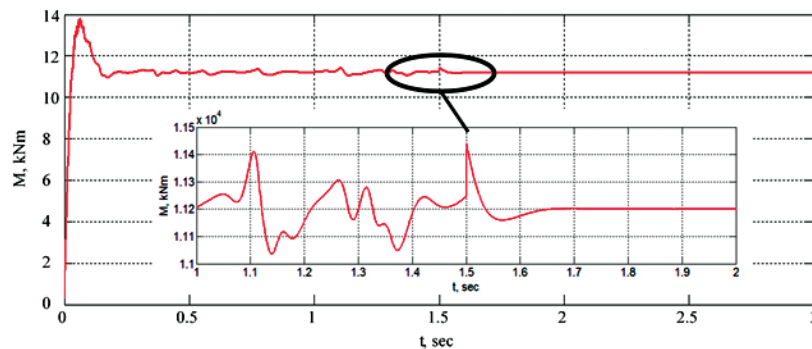
wobei n – die Ordnungszahl der betreffenden Oberwelle ist.

Damit kann die Phasenverschiebung (9) für jede einzelne Welle mit ihrer eigenen Frequenz angegeben werden, wobei nach der Steuerungstheorie [3] gilt

$$\varphi_n(\omega_{e-n}) = -\arctan \frac{2 \cdot T_\mu \cdot \omega_{e-n}}{(1 - 2 \cdot T_\mu^2 \cdot \omega_{e-n}^2)}, \quad (9)$$



a



b

Bild 4. Simulierte Drehmomentverläufe eines TFM-Pressenantriebs bei a Bemessungsdrehzahl 40 U/min und b kleiner Drehzahl 1 U/min mit modifizierter Rastmomentkompensation ab 1,5 s durch Berücksichtigung der Phasenverschiebung

mit $\varphi_n(\omega_{e-n})$ – als Phasenverschiebung der n-ten Oberwelle.

Auf diese Weise werden die Phasenverschiebungen der Übertragungsfunktion für alle Harmonischen (Oberwellen) berechnet. Zur Kompensation müssen die Kompensationsstromwellen i_{qkom-n} (10) dann den entsprechenden Rastmomentwellen M_{R-n} (1) um den zuvor berechneten Phasenverschiebungswert $\varphi_n(\omega_{e-n})$ voreilen

$$i_{qkom} = \frac{M_{R-1}}{A(\omega_{e-1})} \text{pos}(\theta_{el} + \gamma_1 + -\varphi_1(\omega_{e-1})) + \frac{M_{R-2}}{A(\omega_{e-2})} \text{pos}(2 \cdot \theta_{el} + \gamma_2 + -\varphi_2(\omega_{e-2})) + \dots + \frac{M_{R-k}}{A(\omega_{e-k})} \text{pos}(k \cdot \theta_{el} + \gamma_k + -\varphi_k(\omega_{e-k})) \dots \quad (10)$$

Mit diesem modifizierten Kompensationsstromsignal i_{qkom} nach (10) wird das System erneut simuliert. Die diesbezüglichen Ergebnisse sind in Bild 4, a (wieder für die Bemessungsdrehzahl $n_N = 40$ U/min) und in Bild 4, b (für die kleine Drehzahl $n = 1$ U/min) dargestellt, wobei die anderen Simulationsbedingungen ungeändert, wie bei den früheren Simulationen, gewählt sind.

In beiden Bildern sind die Verbesserungen durch die modifizierte Rastmomentkompensation M_R ab dessen Zuschaltung bei 1,5 s deutlich zu erkennen, was besonders bei Antrieben mit variabler Drehzahl wichtig ist.

Trotzdem sind auch dabei noch kleine Schwingungen möglich, da das aperiodische Glied $G_{i_q}^{ges} \cdot G_M$ hier wie ein Filter wirkt und deshalb die Oberwellen zur Kompensation bei höheren Drehzahlen, etwa ab der Ordnungszahl 20, infolge der dann sehr hohen Frequenz nicht übertragen werde.

Fazit. Im Rahmen einer Promotion an der NBU und der Hochschule Esslingen wurde, als eingebettete Teilaufgabe, sowohl eine einfache als auch eine modifizierte Rastmomentkompensation für TFM bzw. allg. PMSM entwickelt.

Mit der modifizierten Kompensation des Rastmomentes reduzieren sich die Momentschwingungen auch bei hohen Drehzahlen (Bemessungsdrehzahl) auf unter 2 % und somit auf hier zulässige Werte. Bekanntlich werden die Schwingungen dann mit abnehmender Drehzahl noch kleiner und bei kleinen Drehzahlen daher wieder fast vollständig kompensiert.

Zusammenfassung. Transversalflussmaschinen als besondere Ausführung der permanentenregten Synchronmaschinen weisen oft ein großes Rastmoment auf, das sich sehr nachteilig auf die Regelgenauigkeit des Drehmomentes auswirken kann. Dieses Rastmoment bestimmt dann oft wesentlich die Drehmomentwelligkeit des Antriebes, welche oft zu Nachteilen, wie z. B. Vibrationen, Geräuschen etc., bei der Anwendung führt. Daher wurde in dieser Arbeit sowohl eine einfache als auch eine modifizierte Rastmomentkompensation zur Reduzierung bzw. Vermeidung der

Drehmomentwelligkeit allg. bei PMSM entwickelt. Dieses Verfahren wurde beispielhaft für den TFM-Direktantrieb einer C-Pressen in der Servo-Direkt-Technologie untersucht und hier mit konkreten Zahlenwerten vorgestellt.

Literatur/Список літератури

1. Nolle, E., Beshta, O. and Kuvaiev, M., 2015. Compensation of the cogging torque by means of control system for transverse flux motor. In: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, annual publication, pp. 21–25.
2. Bakutin, A., 2015. The electromechanical system of the turning machine tool. In: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, annual publication, pp. 201–210.
3. Schröder, D., 2009. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebsystemen. 3rd ed. Berlin; Heidelberg: Springer.
- Schroeder, D., Electric drives – Control of drive systems. Edition 3, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009.
4. Bessekерskij, V. and Popov, E., 2003. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Theory of automatic control]. Saint Petersburg: Professija.
- Бессекерский В.А. Теория систем автоматического управления / Бессекерский В.А., Попов Е. П. – СПб.: „Профессия“, 2003. – 752 с.

Purpose. The goal is to synthesize a simple way to suppress the cogging torque in the transverse flux motor (TFM), which is a special type of the synchronous motor with permanent magnet. This TFM is meant to be used in direct drive of the C-Press with ServoDirekt-technology.

Methodology. To justify the opportunity of the cogging torque compensation via a special harmonic component of stator current.

Findings. The simple modified way of the cogging torque compensation for transverse flux motor and the synchronous motor with permanent magnet has been proposed, which minimizes ripples of the torque in broad spectrum of the operation speeds.

Originality. The presented research shows that compensation of the cogging torque depends on rotation speed of the motor. Therefore the phase delay and the amplitude ratio factor between current reference and the reproduced electromagnetic torque must be taken into account.

Practical value. Using this control law in drive with TFM or another synchronous motor with permanent magnet it is possible to improve the quality of the forming technology.

Keywords: *synchronous motor with permanent magnets, transverse flux machine, cogging torque, the phase delay and the amplitude ratio factor*

Мера. Розробка простого модифікованого закону компенсації зубцевого моменту для елек-

тричної машини з поперечним полем (TFM), що є різновидом синхронної машини з постійними магнітами у складі безредукторного електропривода промислового сервопреса, виконаного за технологією Servo-Direkt.

Методика. Була розглянута можливість компенсації зубцевого моменту шляхом завдання струму необхідної форми.

Результати. Розроблено простий модифікований закон компенсації зубцевого моменту для TFM та для синхронних машин з постійними магнітами, що дозволяє мінімізувати коливання моменту у всьому діапазоні робочих швидкостей електропривода.

Наукова новизна. Встановлено, що компенсація зубцевого моменту повинна залежати від швидкості обертання двигуна. Тому повинні враховуватися модуль та фаза частотної характеристики ланки між вхідним компенсаційним сигналом та моментом.

Практична значимість. Застосування даного закону в електроприводі сервопреса на базі TFM або іншої синхронної машини з постійними магнітами приведе до підвищення якості роботи процесів пресування/кування.

Ключові слова: синхронні машини з постійними магнітами, електрична машина з поперечним полем, зубцевий момент, коливання моменту, модуль та фаза частотної характеристики

Цель. Разработка простого модифицированного закона компенсации зубцевого момента для электрической машины с поперечным полем

(TFM), которая является разновидностью синхронной машины с постоянными магнитами в составе безредукторного электропривода промышленного сервопреса, выполненного по технологии Servo-Direkt.

Методика. Была рассмотрена возможность компенсации зубцевого момента путем задания тока необходимой формы.

Результаты. Разработан простой модифицированный закон компенсации зубцевого момента для TFM и для синхронных машин с постоянными магнитами, который позволяет минимизировать колебания момента во всем диапазоне рабочих скоростей электропривода.

Научная новизна. Установлено, что компенсация зубцевого момента должна зависеть от частоты вращения двигателя. Поэтому должны учитываться модуль и фаза частотної характеристики звена между входным компенсационным сигналом и моментом.

Практическая значимость. Применение данного закона в электроприводе сервопреса на базе TFM или другого синхронного двигателя с постоянными магнитами приведет к повышению качества процессов пресования/ковки.

Ключевые слова: синхронные машины с постоянными магнитами, электрическая машина с поперечным полем, зубцевой момент, колебания момента, модуль и фаза частотної характеристики

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В. І. Корсунем. Дата надходження рукопису 27.01.16.