

УДК 621.313.04

О. Нолле, Н. Нойбергер, кандидати техн. наук,
О. С. Бешта, д-р техн. наук,
М. В. Куваєв

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ПРОМИСЛОВОГО ПРЕСА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Анотація. Надані класифікації промислових пресів. Був проведений аналіз різних концепцій електричних машин з поперечним полем за трьома критеріями. Були надані рекомендації щодо оптимізації геометрії електричної машини з поперечним полем, метою якої є покращення коефіцієнта потужності. Надані загальні рекомендації щодо системи управління для даної електричної машини у складі електропривода промислового преса.

Ключові слова: електромеханічна система, електрична машина, поперечне поле, безредукторний електропривод, система керування

**E. Nolle, PhD., N. Neuberger, PhD.,
A. Beshta, ScD.,
M. Kuvayev**

ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF LOW POWER INDUSTRIAL PRESS

Abstract. The overview of the industrial press classification is given. Different concepts of the transverse flux motor are analyzed. Recommendations are given about using the methods of transverse flux motor geometry optimization. Attention is focused on using the methods of control law synthesis for transverse flux motor.

Keywords: electromechanical system, electric machine, transverse flux, PMSM, gearless drive, control system

О. Нолле, Н. Нойбергер, кандидаты техн. наук,
А. С. Бешта, д-р техн. наук,
Н. В. Куваєв

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕССА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация. Представлены классификации промышленных прессов. Был проведен анализ различных концепций электрических машин с поперечным полем по трем критериям. Даны рекомендации по оптимизации геометрии электрической машины с поперечным полем, целью которой является улучшение коэффициента мощности. Предоставлены общие рекомендации по системе управления для данной электрической машины в составе электропривода промышленного преса.

Ключевые слова: электромеханическая система, электрическая машина, поперечное поле, безредукторный электропривод, система управления

Вступ. Промисловий прес є дуже розповсюдженим та одним з основних промислових інструментів, тому питання підвищення його енергоефективності є важливим предметом для наукових досліджень. Існує декілька основних варіантів виконання привода преса в залежності від специфічної характеристики ковальсько-пресової машини, яка описує її режим роботи. Існує три основних різновиду цієї специфічної характеристики: сполучений з роботою, зі шляхом та силою. Специфічною величиною ковальсько-пресових машин, сполучених з роботою, є робоча енергія, яка накопичується у машині на початок процесу деформації деталі, що оброблюється. До таких ковальсько-пресових машин можна віднести молот та гвинтовий прес. Ковальсько-пресові машини, сполучені зі шляхом, відрізняються від інших тим, що повзун преса приводиться у рух механічно через кривошип або вал з ексцентриком. До сполучених з силою пресів можна віднести усі гідравлічні преси, де протягом всього пресового шляху можливо підтримувати достатню

силу шляхом притока машинної олії у робочий циліндр. Пресами малої потужності є, частіш за все, ковальсько-пресові машини, сполучені зі шляхом, що мають область застосування у всіх діапазонах обробки листової сталі, гарячої, холодної та напівтеплої обробки під тиском, де поряд з великою продуктивністю необхідна висока точність опрацювання деталі.

Електромеханічна система даного типу преса складається з електричного двигуна (частіш за все - асинхронного двигуна), який через пасову передачу або зубчатий редуктор, а далі – через кривошипно-шатунний механізм або через ексцентриковий вал передає рух до повзуна преса.

Даний клас ковальсько-пресових машин добре піддається механізації, має можливість досягти великої кількості робочих тактів. Завдяки реалізованій кінематиці повзуна його можливо адаптувати під різноманітні специфічні вимоги ковальсько-пресового процесу. Недоліками даного типу є те, що вплив на кінематику існуючого преса можливо здійснити лише через кілька тактів, та те, що максимальна сила залежить від шляху: максимальна номінальна сила діє тільки у нижній частині шляху повзуна.

© Нолле О., Нойбергер Н., Бешта О.С.,
Куваєв М.В., 2014

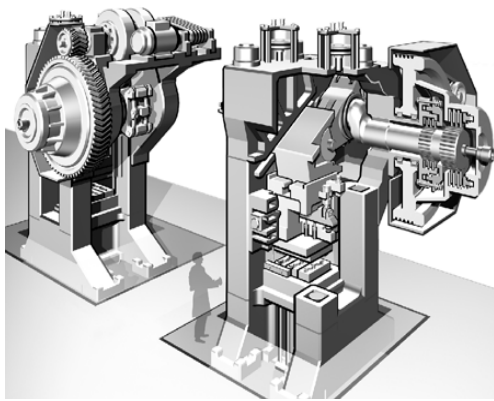


Рис. 1. Ковальсько-пресова машина, сполучена зі шляхом (джерело: SMS-Eumaco)

Одним з можливих вдосконалень електромеханічної системи є впровадження тихохідного високомомментного безредукторного електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ), що дозволить пресу зменшити залежність сили від шляху повзуна завдяки зміні моменту двигуна у будь-якій точці положення. Це також надасть більш широкі можливості автоматизації виробничого процесу та гнучкість кінематики існуючого преса. Завдяки відсутності редуктора, до важливих переваг цієї концепції можна віднести гарне співвідношення ККД-розмір, більшу надійність, зменшення експлуатаційних витрат. Потенційним видом СДПМ є електрична машина з поперечним полем.

Синхронна електрична машина з постійними магнітами та її принцип дії. Головною відмінністю електричної машини з поперечним полем від класичного СДПМ є те, що магнітний потік діє поперечно до площини обертання ротора (рис. 2).

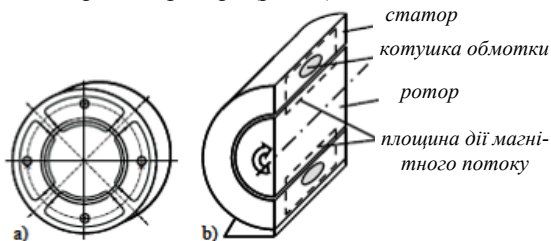


Рис. 2. Принцип дії машини (джерело:[1])
 а) звичайна; б) з поперечним полем

Принцип обертового магнітного поля зберігається за рахунок геометричного зсуву між магнітами фаз на 120 електричних градусів. Статор і ротор є явнополюсними.

За рахунок великої кількості полюсів можна отримати високий обертовий момент, що робить його придатним до використання в безредукторному приводі. Завдяки застосуванню постійних рідкоземельних високоенергетичних магнітів в системі збудження, та завдяки відсутності лобових частин обмотки, цей двигун має підвищений ККД та може розвинути дуже високий обертовий момент.

Обертовий момент створюється за рахунок взаємодії магнітопроводу статора і ротора з постійними магнітами.

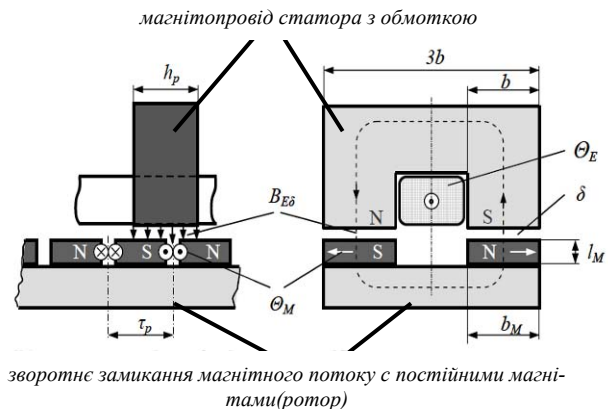


Рис. 3. Принцип дії машини з поперечним магнітним полем (джерело [1]) :

Θ_E – ампер-вітки фази статора; δ – висота повітряного проміжку; Θ_M – еквівалентні ампер-вітки постійного магніту, $B_{E\delta}$ – магнітна індукція у повітряному проміжку

Шлях підвищення коефіцієнта потужності синхронної електричної машини з поперечним полем. Головними недоліками електричної машини з поперечним полем є низький коефіцієнт потужності та складність виготовлення. Виходячи з низького коефіцієнта потужності двигуна, при розрахунку двигуна з поперечним полем треба зробити оптимізацію за повною потужністю. Підвищити коефіцієнт потужності можливо за рахунок вірного підбору кількості полюсів та розмірів геометрії. Головним завданням є зменшення долі індуктивностей розсіювання L_σ порівняно з долею головної індуктивності L_h

$$L_1 = L_h + L_\sigma \quad (1)$$

У свою чергу індуктивність можливо обчислити через магнітний спротив та кількість витків обмотки

$$L = \frac{N^2}{R_M} \quad (2)$$

де N – кількість витків обмотки, R_M – магнітний спротив, який обчислюється наступним чином:

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 \cdot S} \quad (3)$$

де l – довжина шляху магнітного потоку; S – площа дії магнітного потоку.

Як приклад такої оптимізації на рис. 4 наведена поверхнева діаграма, яка була зроблена для двигуна з поперечним полем з корисною потужністю на валу $P_2 = 85 \text{ кВт}$.

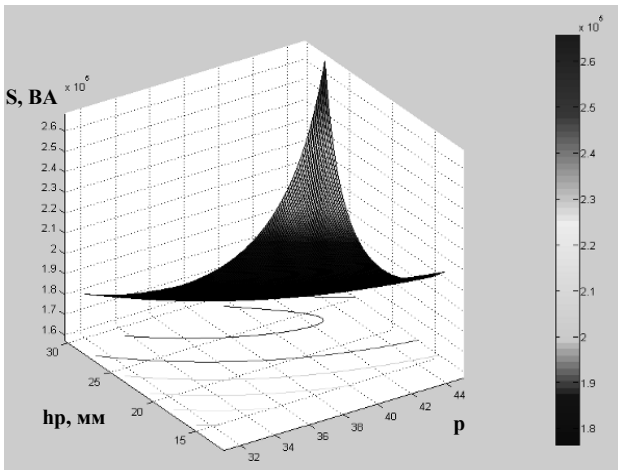


Рис. 4. Приклад діаграми оптимізації електричної машини з поперечним полем за повною потужністю в залежності від кількості пар полюсів та товщини статорного магнітопроводу

Виходячи з останніх формул та прикладу, робимо висновок, що для того, щоб зменшити індуктивність розсіювання, а з нею реактивну складову повної потужності, треба збільшити відстань по повітрю для магнітного потоку розсіювання або зменшити площину, де діють потоки розсіювання. З іншого боку, треба дивитись, щоб ККД двигуна істотно не зменшився, а його розмір суттєво не збільшився.

Оптимізація повної потужності проводилась в залежності від змінної товщини статорного магнітопроводу та кількості пар полюсів. Заздалегідь були обрані габаритні розміри та діаметр повітряного проміжку. Високий ККД та ефект магнітного насичення були також передбачені. Розрахунок виконувався виходячи з магнітних індуктивностей.

За результатом розрахунку був знайдений діапазон рішень, що дозволяють отримати найнижчу повну потужність.

Аналіз концепцій. Існує багато видів концепцій даного двигуна: з циліндричним ротором, з дисковим, з одним чи двома повітряними зазорами, з стандартно наклеєними магнітами на роторі або з тангенціальними магнітами. Був зроблений аналіз конструкцій, результат якого був наданий у вигляді таблиці по 5-бальній системі оцінювання, де 5-це найкращий показник серед усіх концепцій, а 1- найгірший. Це спрощена оцінка, яка демонструє придатність двигуна для промисловості. Аналіз надано у таблиці 1. Як видно з проведеного аналізу, найпростіша концепція при сучасному розвитку технологій виготовлення електромагнітних матеріалів є тим рішенням, яке може отримати впровадження у промисловості, де поряд з компактністю та енергоефективністю цінуються придатність до серійного виробництва та механічна міцність, що обумовлює більш низькі експлуатаційні витрати.

Висновок. Синхронна машина з поперечним полем є перспективним варіантом розвитку СДПМ, оскільки має високий ККД та потребує меншої кількості матеріалу. З усіх концепцій електромашин з поперечним полем найкращі дані для впровадження у безредукторному електроприводі промислового преса має варіант з циліндричним ротором та одним повітряним проміжком через високу міцність при значних динамічних навантаженнях та порівняно низьку ціну виготовлення. У разі розрахунку електричної машини з поперечним полем її треба оптимізувати за мінімальною повною потужністю. При використанні даного двигуна у електроприводі промислового преса необхідно застосовувати векторну систему керування, яка забезпечить високу енергоефективність та гнучкість у роботі преса.

1. Аналіз різноманітних концепцій синхронної електричної машини з поперечним полем

	ККД - розмір	Складність виготовлення, ціна	Механічна міцність	Середня оцінка
Циліндричний ротор, 1 повітряний проміжок, стандартні магніти	2	5	5	4
Циліндричний ротор, 1 повітряний проміжок, тангенціальні магніти	3	4	4	3,67
Циліндричний ротор, 2 повітряних проміжків, стандартні магніти	4	3	3	3,333
Циліндричний ротор, 2 повітряних проміжків, тангенціальні магніти	5	2	2	3
Дисковий ротор, 2 повітряних проміжків, тангенціальні магніти	5	2	1	2,67

Список використаної літератури

1. Nolle E., and Beshta A., (2013), Elektrische Maschinen und Antriebe, *Lehrbuch*, Dnipropetrovsk, Ukraine, *BU* pp. 153 – 155.
2. Doege E., (2007), *Handbuch Umformtechnik*, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 711 – 836
3. Schuler, *Metal Forming Handbook*, Springer, Berlin Heidelberg 1998, pp. 33 – 83
4. Бешта О. С. Використання регульованого електропривода в задачах підвищення енергоефективності технологічних процесів, Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ : 2012. – Вип. 4. – С. 98 – 107.
5. Tseng W., (2008), Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zu einem Permanentmagneterregten Transversalfuss-Synchrolinearmotor in Sonderbauform, pp. 33 – 83.
6. Kastinger G., (2009), Design of a Novel Transverse Flux Machine, *Robert Bosch*, Buehl, Germany, pp.10 – 16.
7. Götschmann N., (2008), HochmomentßGeneratoren in Leichtbauweise, *Technik Windenergie 2008*, pp. 42 – 44
8. Hackmann W., (2003), Systemvergleich Unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienennahverkehr: Asynchronmaschine, Permanentmagneterregte Synchronmaschine, Transversalfussmaschine, Darmstädter Dissertation, Darmstadt 2003, pp. 99 – 151.
9. Doppelbauer M., (2007), Direktantrieb oder doch Besser Getriebemotor, *SEW-EURODRIVE*, Karlsruhe 2007, pp. 66 – 73
10. Werner U., (2004), Simulation und Entwurf eines Analytischen Modells für eine Permanentmagneterregte Transversalfussmaschine in Sammler-Bauweise, VDE/VDI, Fulda 2004, pp. 3 – 17

Отримано 17.07.2014

References

1. Nolle E., and Beshta A., (2013), Elektrische Maschinen und Antriebe, *Lehrbuch*, Dnipropetrovsk, Ukraine, *NBU*, pp. 153 – 155 (In German).
2. Doege E., (2007), *Handbuch Umformtechnik*, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 711 – 836 (In German).
3. Schuler, (1998), *Metal Formung Handbook*, Springer, Berlin Heidelberg, pp.33 – 83(In English).
4. Beshta A. Viktoristannya regul'ovanogo elektroprivoda v zadachakh pidvishchennya energoefektivnosti tekhnologichnikh protsesiv, [The Frequency-Controlled Electric Drives Application in Tasks of Higher Power-Efficient of Technological Processes], (2012), *Scientific Bulletin of the National Mining University*, Dnepropetrovsk, Ukraine, Issue 4, pp. 98 – 107 (In Ukrainian).
5. Wan-Tsun Tseng, (2008), Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zu einem Permanentmagneterregten Transversalfuss-Synchrolinearmotor in Sonderbauform, pp. 33 – 83 (In German).

6. Kastinger G., (2009), Design of a Novel Transverse Flux Machine, *Robert Bosch*, Buehl, Germany, pp.10 – 16 (In English).
7. Götschmann N., (2008), Hochmoment-Generatoren in Leichtbauweise, *Technik Windenergie*, pp. 42 – 44 (In German).
8. Hackmann, (2003), Systemvergleich Unterschiedlicher Radnabenantriebe für den Schienennahverkehr: Asynchronmaschine, Permanentmagneterregte Synchronmaschine, Transversalfussmaschine, Darmstädter Dissertation, Darmstadt, pp. 99 – 151 (In German).
9. Doppelbauer M., (2007), Direktantrieb oder doch Besser Getriebemotor, *SEW-EURODRIVE*, Karlsruhe, pp. 66 – 73 (In German).
10. Werner U., (2004), Simulation und Entwurf eines Analytischen Modells für eine Permanentmagneterregte Transversalfussmaschine in Sammler-Bauweise, VDE/VDI, Fulda, pp. 3 – 17 (In German).



Нолле Ойген,
д-р інженер, почесний д-р Нац.
гірничного ун-ту Дніпропетровська,
проф. Еслінгенського ун-ту приклад-
них наук, Гёппинген, ФРГ,
+49(0)7161679-1264.
E-mail:
Eugen.Nolle@hs-esslingen.de



Нойбергер
Николай Альбертович,
канд. техн. наук, почесний проф. Нац.
гірничного ун-ту Дніпропетровська,
співробітник Еслінгенського ун-ту
прикладних наук, Гёппинген, ФРГ,
+49(0)7161 679-1271.
E-mail:Nikolaus.Neuberger@hs-
esslingen.de



Бешта
Олександр Степанович, член-корр.
НАН України, д-р техн. наук, прорек-
тор по науковій роботі, зав. каф. елек-
тропривода Державного ВНЗ Нац.
гірничного ун-ту.
Дніпропетровськ, пр. К. Маркса 19,
+38 (0562) 47 32 09.
E-mail:
beshtaa@nmu.org.ua



Куваєв
Микола Володимирович,
Аспірант каф. електропривода
Державного ВНЗ Нац. гірничного ун-
ту, Дніпропетровськ, пр. К. Маркса 19,
+38(056) 372 07 71.
E-mail:
kuvayevnv@ukr.net