

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»



Кувасєв Микола Володимирович

УДК 621.3.07: 621.313.8

**Електромеханічна система сервопреса на базі електричної
машини з поперечним полем**

05.09.03 – “Електротехнічні комплекси та системи”

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропривода Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпро) Міністерства освіти та науки України.

Наукові керівники: член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор
Бешта Олександр Степанович, проректор з науково-педагогічної і навчально-виховної роботи Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

доктор-інженер

Нолле Ойген, професор Есслінгенського університету прикладних наук (Німеччина).

Офіційні опоненти доктор технічних наук, професор
Щур Ігор Зенонович, професор кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

доктор технічних наук, професор

Чорний Олексій Петрович, директор Навчально-наукового інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться “6” жовтня 2017 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, проспект Дмитра Яворницького, 19, тел. (0562)-47-24-11).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, проспект Дмитра Яворницького, 19.

Автореферат розісланий “5” вересня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Пресові машини є одним з основних видів обладнання, що використовуються у машинобудуванні та багатьох інших галузях промисловості, тому питання підвищення їхньої енергоефективності та виробничої потужності є вельми актуальним.

Традиційні преси, що виробляються, класифікуються за режимами роботи, на яких вони спеціалізуються: за робочою енергією, яка накопичується у машині на початок процесу деформації; за шляхом пресування робочого органу; за силою тиску робочого органу. Відповідно до класу преси мають специфічну конструкцію та принцип дії. Останнім часом, набуває широкого розповсюдження новий клас ковальсько-пресових машин, так звані, сервопреси, які реалізують режими роботи, що притаманні різним типам класичних машин та перевершують останні за продуктивністю. Такі сервопреси створені на базі кривошипно-шатуних (ексцентрикових) ковальсько-пресових машин але не мають маховиків та гальм, якими оснащені преси класичних конструкцій.

Весь спектр режимів роботи в сервопресах реалізується завдяки застосуванню безредукторного високомоментного керованого електропривода, що обумовлює підвищені вимоги до його статичних та динамічних параметрів. Так, виготовлення одних деталей здійснюється на швидкостях повзуна наближених до нуля, шляхом пресування при постійній максимальній силі з мінімальними коливаннями моменту (амплітуда коливань не повинна перевищувати 2% від номінального моменту електродвигуна), а в інших режимах потрібно забезпечити велику кількість робочих періодів.

Реалізація в одному сервопресі різноманітних режимів роботи збільшує його виробниче завантаження, що висуває підвищені вимоги до ККД його електромеханічної системи (ЕМС).

Таким чином, обґрунтування науково-технічних рішень і визначення закономірностей, що забезпечують створення високомоментного електропривода з високими енергетичними, динамічними, регульовальними характеристиками та мінімізацію коливань його моменту є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» (Закон України від 11.07.2001 № 2623-III) та Державній Програмі енергонезалежності, ухвалена указом Президента України № 5/2015 Про стратегію сталого розвитку «Україна – 2020» (від 12.01.2015р.). Дослідження виконані у рамках спільного міжнародного наукового проекту Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпро, Україна) і Есслігенського університету прикладних наук (ФРН) на замовлення компанії Schuler Pressen GmbH (м. Геппінген, ФРН) відповідно тематики держбюджетних науково-дослідних робіт «Наукові засади видобутку

та переробки органічних палив комплексними енергетичними підприємствами» (№ держреєстрації 0115U002293), «Технологія створення розумних енергетичних мереж багатофункціональних споруд з метою ефективного розподілення електроенергії між споживачами» (№ держреєстрації 0116U004623) та «Удосконалення технології гібридних і суто електричних транспортних засобів і їх інтеграції в енергетичну мережу» (№ держреєстрації 0117U001126) де автор був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є підвищення динамічних, енергетичних показників електропривода промислового сервопреса шляхом створення нової ЕМС на базі електричних машин з поперечним полем та розробки нового закону і системи керування ними.

Основні завдання дослідження:

- аналіз вимог до головного електропривода промислового сервопреса;
- обґрунтування доцільності використання безредукторного електропривода на базі машини з поперечним полем;
- аналіз різних конструкцій машин з поперечним полем та вибір раціонального електромеханічного перетворювача енергії виходячи з вимог до головного електропривода промислового сервопреса;
- встановлення залежностей енергетичних показників електромеханічної системи від конструктивних параметрів машини з поперечним полем, які дозволяють отримати раціональні значення даних енергетичних показників;
- розробка математичної моделі електропривода на базі машини з поперечним полем з урахуванням зубцевого моменту;
- розробка законів керування ЕМС преса для забезпечення виконання вимог до його електропривода, а саме: висока швидкодія, точність, енергетичні показники та мінімізація коливань обертового моменту.

Об'єкт дослідження – режими роботи електропривода промислового сервопреса на базі електричної машини з поперечним полем.

Предмет дослідження – параметри електричної машини з поперечним полем, перехідні процеси та характеристики електропривода промислового сервопреса на базі електричної машини з поперечним полем.

Методи дослідження:

В основу досліджень покладено: метод кінцевих елементів та фундаментальні положення теорії електричних машин – для розрахунку та моделювання статичних та гармонічних електромагнітних полів; методи диференційного числення, чисельного інтегрування, гармонічного аналізу – для створення математичної моделі електричної машини з поперечним полем з урахуванням впливу зубцевого моменту; методи теорії автоматичного керування – для синтезу удосконаленої системи векторного керування електроприводом промислового сервопреса на базі електричної машини з поперечним полем; метод математичного моделювання – для аналізу систем векторного керування;

експериментальна перевірка адекватності математичних моделей та результатів, які були одержані аналітичними методами.

Основні наукові положення та результати, їх новизна.

Наукові положення

- використання модульного оптимуму з одночасною компенсацією статичної похибки за швидкістю за рахунок спостерігача моменту навантаження забезпечує задану динамічну і статичну точність регулювання швидкості, положення сервопресу та необхідну швидкодію, що дозволяє отримати його більшу продуктивність.

- мінімізація коливань моменту у всьому діапазоні робочих швидкостей електропривода досягається компенсацією зубцевого моменту за рахунок додаткової складової струму, що подається на відповідний регулятор по осі q з урахуванням частотних характеристик цього контуру.

Отриманні наукові результати:

1. Вперше обґрунтовано, що у складі електропривода сервопреса за електромеханічними, виробничими та експлуатаційними параметрами найбільш раціональним є використання електричних машин з поперечним полем, одним радіальним повітряним проміжком і поверхнево наклеєними магнітами.

2. Вперше запропоновано метод розрахунку і пошуку раціональної конфігурації конструктивних параметрів для машини з поперечним полем з одним радіальним повітряним проміжком та з поверхнево наклеєними магнітами, який включає теоретичний розрахунок областей раціональних параметрів машини при заданій механічній потужності з подальшим уточненням цих параметрів через моделювання, що дозволило отримати високі енергетичні показники електромеханічної системи сервопреса при заданих техніко-економічних обмеженнях.

3. Вперше було встановлено залежність повної потужності від кількості пар полюсів і висоти окремого магнітопроводу статора машини з поперечним полем з одним радіальним повітряним проміжком та з поверхнево наклеєними магнітами, що дозволило мінімізувати негативний вплив магнітних потоків розсіювання і підвищити коефіцієнт потужності.

4. Запропоновано удосконалений закон компенсації зубцевого моменту через подачу полігармонічного сигналу на вхід регулятора струму, який, на відміну від відомих, забезпечує однаково якісну компенсацію викликаних ним коливань моменту, як на низьких, так і на високих діапазонах швидкості високомоментного електромеханічного перетворювача з поперечним магнітним полем і збудженням від постійних магнітів.

5. Запропонований закон керування при налаштуванні контуру швидкості на модульний оптимум з використанням компенсації статичної похибки за швидкістю за рахунок спостерігача моменту навантаження, дозволяє отримати

більш якісні перехідні процеси в електроприводі сервопреса на базі машини з поперечним полем.

Практична цінність.

1. Розроблений електропривод сервопреса на базі електричної машини з поперечним полем має більш ніж у чотири рази менші втрати за аналогічний електропривод на базі синхронної машини з постійними магнітами, дозволяє реалізувати всі необхідні режими роботи сервопреса згідно вимог, суттєво покращити енергетичні показники, збільшити виробничу потужність сервопреса, а також отримати високу якість обробки металу при пресуванні (куванні).

2. Запропоновано технічне рішення виконання магнітопроводу розсіювання електричної машини з поперечним магнітним полем з одним радіальним повітряним проміжком та з поверхнево наклеєними магнітами, що дозволило зменшити її магнітні потоки розсіювання та, відповідно, повну потужність при збереженні незмінної активної складової.

3. Запропоновані налаштування контуру швидкості на модульний оптимум з використанням компенсації статичної похибки за швидкістю за рахунок спостерігача моменту навантаження збільшує динаміку роботи ЕМС сервопреса.

4. Створено вимірювальний стенд для дослідження електричних машин з поперечним полем та синхронних машин зі збудженням від постійних магнітів, який забезпечує комплексний аналіз параметрів цих машин.

Результати дисертаційної роботи у вигляді конструкторської документації машини з поперечним полем, розроблених алгоритмів керування та результатів експериментальних досліджень впроваджені у тимчасову експериментально-промислову експлуатацію компанією Schuler Pressen GmbH (м. Геппінген, ФРН).

Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується: коректністю припущень, які були прийняті у ході досліджень, високою точністю комп'ютерного об'ємного моделювання електромагнітних полів методом кінцевих елементів у програмному пакеті Maxwel 3D, збіжністю основних результатів аналітичного розрахунку та моделювання методом кінцевих елементів у рамках відхилення менше 10%, відповідністю розроблених математичних моделей фізичним процесам електромеханічної системи (адекватністю математичної моделі до реальних фізичних процесів електромеханічної системи), результатами моделювання методом кінцевих елементів та експериментальних стендових досліджень електричної машини з поперечним магнітним полем.

Особистий внесок здобувача полягає: у самостійному формулюванні мети роботи; отриманні наукових положень та наукових результатів; аналізі існуючих видів електромеханічних систем пресів та методів їх керування; розробці методики оцінювання різних концепцій електричних машин з поперечним полем на придатність у використанні в електроприводі сервопреса та запропонованої

методики розрахунку і оптимізації машини з поперечним полем для електропривода сервопреса; запропонованих технологічних рішеннях, які дозволяють мінімізувати споживану повну потужність машини з поперечним полем; отриманні залежності повної потужності машини з поперечним полем від її конструктивних параметрів; обґрунтуванні раціональної системи керування електроприводом сервопреса з налаштованим контуром швидкості на модульний оптимум; розробці компенсатора статичного моменту навантаження; отримання залежності зубцевого моменту від кута положення ротора по відношенню до статора; отримання рівняння для визначення сигналу компенсації зубцевого моменту складовою струму по осі q $i_{q\text{ком}}$ в залежності від частотних характеристик контуру струму, який дозволяє суттєво зменшити вплив зубцевого моменту у широкому діапазоні швидкостей; створені програмного забезпечення для вимірювального стенду; проведенні експериментальних досліджень для підтвердження теоретичних результатів роботи. Зміст дисертації викладено автором особисто.

Апробація основних результатів роботи. Основні положення та результати, одержані в дисертаційній роботі, доповідались, обговорювалися і були схвалені на науково-технічних конференціях: Міжнародний форум студентів та молодих учених «Widening our horizons» («Розширюючи обрії», м. Дніпропетровськ, 2015 рік), Міжнародна науково-технічна конференція «Форум гірників – 2016» (м. Дніпро, 2016 рік), Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості (м. Дніпро, 2016 рік).

Публікації. Основні положення дисертації і результати досліджень були опубліковані у 11 друкованих працях, з них 7 опубліковано у фахових виданнях МОН України (2 статті у виданні, що входять до міжнародних наукометричних баз), 2 у закордонних збірниках наукових праць та 2 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації – 185 сторінок, у тому числі: основний текст – 174 стор., рисунків – 90, таблиць – 16, список використаних джерел – 81 на 8 сторінках, додаток – на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, зв'язок теми роботи з науковими програмами та планами, викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** розглянуто існуючі типи пресів та їх приводів, що класифікуються за трьома основними режимами роботи: режим молота, режим

пресування з постійною силою та режим з фіксованим шляхом повзуна преса. Але сьогодні набуває розвитку новий тип пресів – сервопреси. На відміну від класичних пресів, де реалізація кожного режиму роботи здійснюється спеціалізованим за своєю конструкцією пресом, ЕМС сучасного сервопреса на базі безредукторного високомоментного електропривода дозволяє реалізувати усі основні режими роботи.

На підставі аналізу особливостей режимів роботи сервопресів і новітніх розробок електричних машин було визначено, що найперспективнішим для застосування в сервопресі є електропривод на базі електричної машини з поперечним полем, перш за все, завдяки кращому за інші машини ККД.

Виявлено недоліки існуючих рішень за конструкціями електричних машин з поперечним полем і системами керування при застосуванні їх у складі привода сервопреса та сформульовані задачі дослідження.

Другий розділ присвячений розробці високомоментної електричної машини з поперечним полем для ЕМС нового сервопреса. Наведено розроблену методику оцінювання та вибору концепції електричної машини з поперечним полем, яка найбільше підходить до застосування у ЕМС сервопреса. Методика ґрунтується на експертних оцінках різних концепцій за трьома групами критеріїв: електромеханічними, виробничими та експлуатаційними.

Проведений аналіз показав, що застосування односторонньої машини з поперечним полем з циліндричним ротором, одним повітряним проміжком та з поверхневими постійними магнітами, є найпростішим для серійного виробництва варіантом при сучасному розвитку технологій. Така конструкція має достатньо високі електромеханічні, енергетичні показники та порівняно високу механічну міцність.

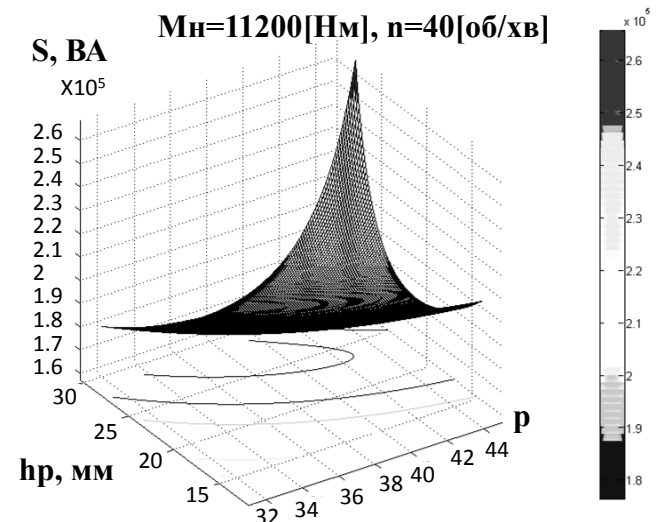


Рис. 1. Отримана залежність повної потужності

незмінних механічних параметрах була отримана поверхнева залежність повної потужності обраної конструкції електричної машини з поперечним полем від таких конструктивних параметрів, як висота пакету магнітопроводу h_p та кількість пар полюсів p (рис.1).

Для успішної інтеграції розробленої машини в ЕМС сервопреса, було запропоновано метод розрахунку обраної конструкції з раціоналізацією її конструктивних параметрів. Вхідні дані обумовлюються необхідністю забезпечення заданих механічних параметрів, розміром вільного місця в корпусі преса та особливостями перетворювача частоти. В результаті теоретичного розрахунку при

За даною залежністю була визначена область мінімальних значень повної потужності, з подальшим їх уточненням за допомогою спеціального програмного пакету для розрахунку електромагнітних полів методом кінцевих елементів (Maxwell). Визначена конфігурація конструктивних параметрів, за якою в номінальному режимі роботи забезпечується одне з самих низьких значень повної потужності, високий ККД та максимальний момент. Для зменшення впливу полів розсіювання на значення повної потужності було запропоновано нове технічне рішення виконання магнітопроводу розсіювання для обраної електричної машини з поперечним полем, яке дозволило зменшити, приблизно на 30%, один з головних потоків розсіювання. Виконано порівняння розробленої електричної машини з поперечним полем з аналогічним за механічними параметрами синхронним двигуном зі збудженням від постійних магнітів (СДПМ). В результаті було встановлено, що розроблена електрична машина має приблизно у 4 рази менші втрати за відомий аналог.

Третій розділ присвячений визначенню раціонального закону керування приводом сервопреса на базі електричної машини з поперечним магнітним полем.

Базуючись на аналізі існуючих систем керування та виходячи з вимог до електромеханічної системи преса, за базову була обрана система векторного керування в d - q координатах з датчиком положення ротора. Електрична машина з поперечним полем є різновидом СДПМ, тому його математична модель ідентична моделі СДПМ.

В даній роботі були розглянуті два режими роботи сервопреса – режим молота, який характеризується робочою енергією, та режим з постійною силою пресування.

В режимі молота повзун преса повинен до зустрічі з заготовкою розвинути необхідну задану швидкість для накопичення достатньої для обробки енергії, а електродвигун повинен короткочасно тримати великий момент для запобігання передчасного відскоку повзуна. Після процесу деформування момент двигуна обмежується, що дозволяє за рахунок відскоку повернутися повзуну преса в початкове положення. Даний робочий цикл характеризується великою швидкістю. Тому в цьому режимі роботи система керування двигуном повинна забезпечити розгін до робочої швидкості за 70 мс, а весь час робочого циклу не повинен перевищувати 130-150 мс.

В режимі роботи сервопреса, який характеризується постійною силою пресування, необхідно регулювати, окрім швидкості та моменту двигуна, ще й положення його ротора. Період роботи преса у даному режимі довший за попередній режим та не повинен перевищувати 600 мс. Процес деформування відбувається на дуже низьких швидкостях, а сила пресування забезпечується моментом електродвигуна. Додаткова мінімізація динамічної похибки при

накиді навантаження дозволить скоротити час робочого періоду та покращити якість обробки деталі.

Налаштування системи керування відбувалось за допомогою аналізу показників логарифмічно амплітудно-фазової частотної характеристики (ЛАФЧХ) для розімкнутого контуру. У таблиці 1 наведені параметри, які характеризують якість та час перехідних процесів при налаштуванні контуру швидкості на симетричний оптимум (ПІ-регулятор швидкості) та при налаштуванні на модульний оптимум (П-регулятор швидкості).

З наведеної таблиці 1 можливо зробити висновок, що при майже однакових частотах зрізу ω_3 та запасу по амплітуді ΔA , система з налаштованим на модульний оптимум контуром має значно вищий запас по фазі $\Delta\varphi_3$ у порівнянні з налаштуванням на симетричний оптимум та становить $\Delta\varphi_3 = 84.3^\circ$. Дане значення запасу по фазі є дуже близьким до значення 90° , що обумовлює практично відсутність перерегулювання та мінімальний час перехідного процесу. Система з даним налаштуванням є набагато стабільнішою та має більш високу швидкодію у порівнянні з системою з налаштуванням на симетричний оптимум при однаковому значенні сталої часу контуру швидкості $T_{\muш}$.

Таблиця 1. Порівняння параметрів ЛАФЧХ при налаштуванні на модульний та симетричний оптимум контуру швидкості

	П-регулятор швидкості	ПІ-регулятор швидкості
ω_3 , рад/сек	250	275
$\Delta\varphi_3$, °	84.3	59.2
ΔA , дБ	26	25.6

Така система з П-регулятором швидкості, на відміну від системи з ПІ-регулятором швидкості, забезпечує необхідну швидкодію і якість перехідного процесу при роботі в режимі молота.

Недоліком використання П-регулятора швидкості є наявність статичної похибки x при накиді навантаження $M_{нав}$. В роботі було запропоновано вирішення даної проблеми шляхом додавання значення похибки до сигналу завдання регулятора швидкості ω^* . Значення похибки, яке необхідно компенсувати, можливо визначити з відповідної структурної схеми (рис.2), якщо відомо значення моменту навантаження та час його накиду.

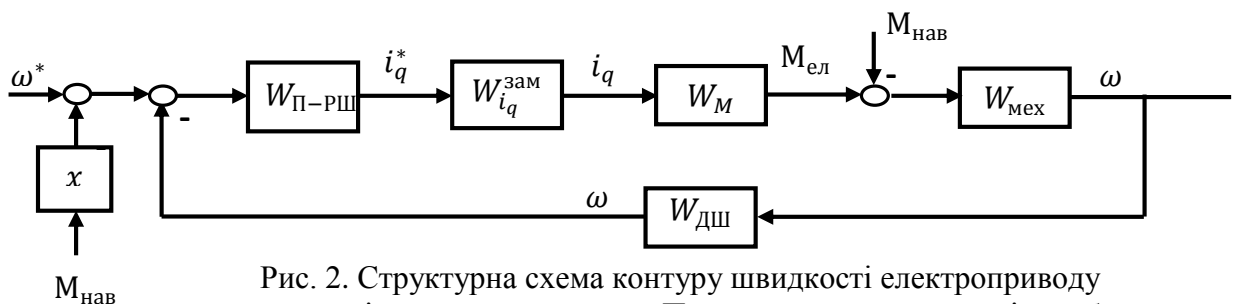


Рис. 2. Структурна схема контуру швидкості електроприводу електромеханічної системи преса з П-регулятором швидкості та з блоком розрахунку та компенсації статичної помилки, знаючи значення $M_{нав}$.

Для цього був створений компенсатор статичної похибки, який обчислює її значення за рівнянням:

$$x = \frac{\frac{1}{J(\theta)s} \cdot M_{\text{нав}}}{1 + \frac{1}{2T_{\mu\text{ш}}} \cdot \frac{1}{2T_{\mu}s + 1} \cdot \frac{1}{s}} \quad (1)$$

де $J(\theta)$ – момент інерції в залежності від кута повороту ротора, T_{μ} – некомпенсована стала часу.

Безпосередньо запропонований метод може бути використаний у системі з запрограмованим виробничим процесом з фіксованим та відомим часом та величиною накиду навантаження, до яких належать сервопреси.

Досягнення більшої універсальності запропонованого компенсатора статичної похибки забезпечується шляхом створення спостерігача моменту навантаження, який визначає його поточне значення користуючись основним рівнянням руху та рівнянням електромагнітного моменту двигуна:

$$M_{\text{нав}} = 1,5 \cdot p \cdot (i_d \cdot i_q \cdot (L_d - L_q) + i_q \cdot \psi_{pm}) - J(\theta) \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

де p – кількість пар полюсів, i_d, i_q – статорні струми, L_d, L_q – індуктивності, ψ_{pm} – потік постійних магнітів.

Тобто користуючись даними датчиків струмів можливо вирахувати поточне значення $M_{\text{нав}}$. Підставивши (2) до (1) отримаємо вираз для розрахунку статичної похибки з врахуванням поточного значення моменту навантаження:

$$x = \frac{\frac{1}{J(\theta)s} \cdot (1,5p \cdot (i_d i_q \cdot (L_d - L_q) + i_q \cdot \psi_{pm}) - J(\theta) \frac{d\omega}{dt})}{1 + \frac{1}{2T_{\mu\text{ш}}} \cdot \frac{1}{2T_{\mu}s + 1} \cdot \frac{1}{s}} \quad (3)$$

Результати математичного моделювання надані на рис. 3 та показали, що при використанні модифікованої системи керування з контуром швидкості, налаштованим на модульний оптимум з додатковим компенсатором статичної та динамічної похибки, порівняно з системою керування з контуром швидкості, налаштованим на класичний симетричний оптимум, перерегулювання швидкості при розгоні (рис.3а) відсутнє, час розгону зменшується на 42% з 90 мс до 52 мс. Також при накиді навантаження (рис.3б) амплітуда динамічної похибки при використанні модифікованої системи керування зменшується на 50%, та час відновлення зменшується на 62%, з 37 мс до 14 мс. Налаштування контуру швидкості на модульний оптимум (П-регулятор швидкості) забезпечує електромеханічній системі більшу швидкодію, значно покращує якість

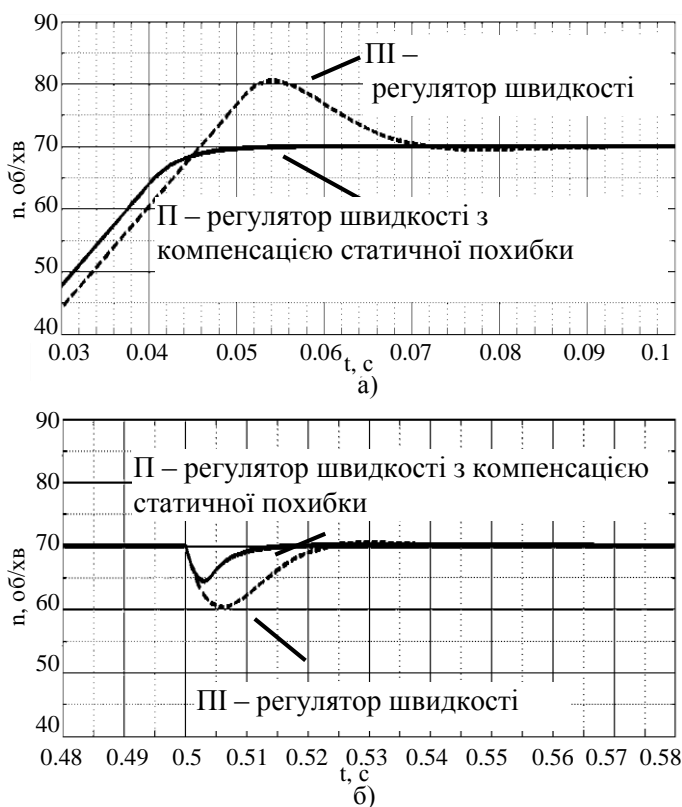


Рис. 3 Графік перехідного процесу систем регулювання швидкості при: а) розгоні; б) накиданні навантаження.

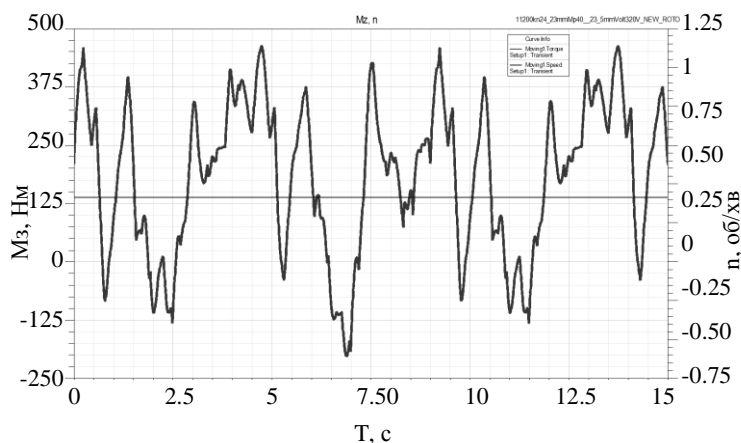


Рис. 4 Зубцевий момент, розрахований у Maxwell.

проведено частотний аналіз даної функції, що дозволило записати дану функцію у вигляді ряду Фур'є:

$$M_z = M_{z0} + M_{z1} \cdot \cos(\theta_{ел} + \gamma_1) + M_{z2} \cdot \cos(2 \cdot \theta_{ел} + \gamma_2) + \dots + M_{zk} \cdot \cos(k \cdot \theta_{ел} + \gamma_k) + \dots, \quad (4)$$

де $M_{z0}, M_{z1}, \dots, M_{zk}$ – амплітуди гармонік зубцевого моменту, $\theta_{ел}$ – електричний кут повороту ротора, γ_1 – фази гармонік.

перехідних процесів, а застосування модифікованого способу компенсації статичної похибки створює головну перевагу симетричного оптимуму – астатизм за навантаженням.

Іншою важливою вимогою до приводу сервопресу є мінімізація коливань його моменту. Коливання моменту мають негативний вплив на точність регулювання, призводять до появи акустичних шумів та вібрацій, що в багатьох випадках неприпустимо при застосуванні безредукторного електропривода.

Дослідження наявності пульсацій моменту та їх природи в розробленій електричній машині було проведено за допомогою середовища Maxwell. Було встановлено, що розроблена машина з поперечним полем має значні пульсації, які визначаються наявністю зубцевого моменту M_z . Зубцевий момент є результатом взаємодії магнітного поля постійних магнітів ротора з залізом статора та залежить від кута повороту ротора.

Отримана функція залежності зубцевого моменту від кута повороту ротора (рис. 4) та

Амплітуда даних коливань складає приблизно 4% від номінального моменту, при обмеженнях у 2%. Для компенсації даних коливань моменту використовують відомі методи за допомогою сигналу струму, який додається до основного завдання на струм, має такий же самий гармонічний склад та знаходиться у протифазі до зубцевого моменту. Було проведено моделювання роботи розробленої машини з відомим методом компенсації на номінальній швидкості та на швидкості, яка наближена до нуля (один оборот за хвилину).

Для запобігання даних коливань моменту було запропоновано модифікований метод їх компенсації. Як і у випадку класичної компенсації, відбувається за допомогою сигналу завдання струму, який додається до основного завдання на струм, має такий же самий гармонічний склад та знаходиться у протифазі до зубцевого моменту. Відмінністю запропонованого модифікованого методу є врахування частотних характеристик контуру струму: модуля $A(\omega_{e-n})$ та фази $\varphi_n(\omega_{e-n})$ для кожної n-гармоніки (аргумент). Отримано рівняння для складової завдання струму $i_{q\text{ком}}(\theta_{el}, \omega_e)$, що компенсує зубцевий момент, з врахування частотних характеристик контуру струму:

$$i_{q\text{ком}}(\theta_{el}, \omega_e) = \sum_{n=1}^k \frac{M_{z-n}}{A(\omega_{e-n})} \cdot \cos(n \cdot \theta_{el} + \gamma_n + \pi - \varphi_n(\omega_{e-n})). \quad (5)$$

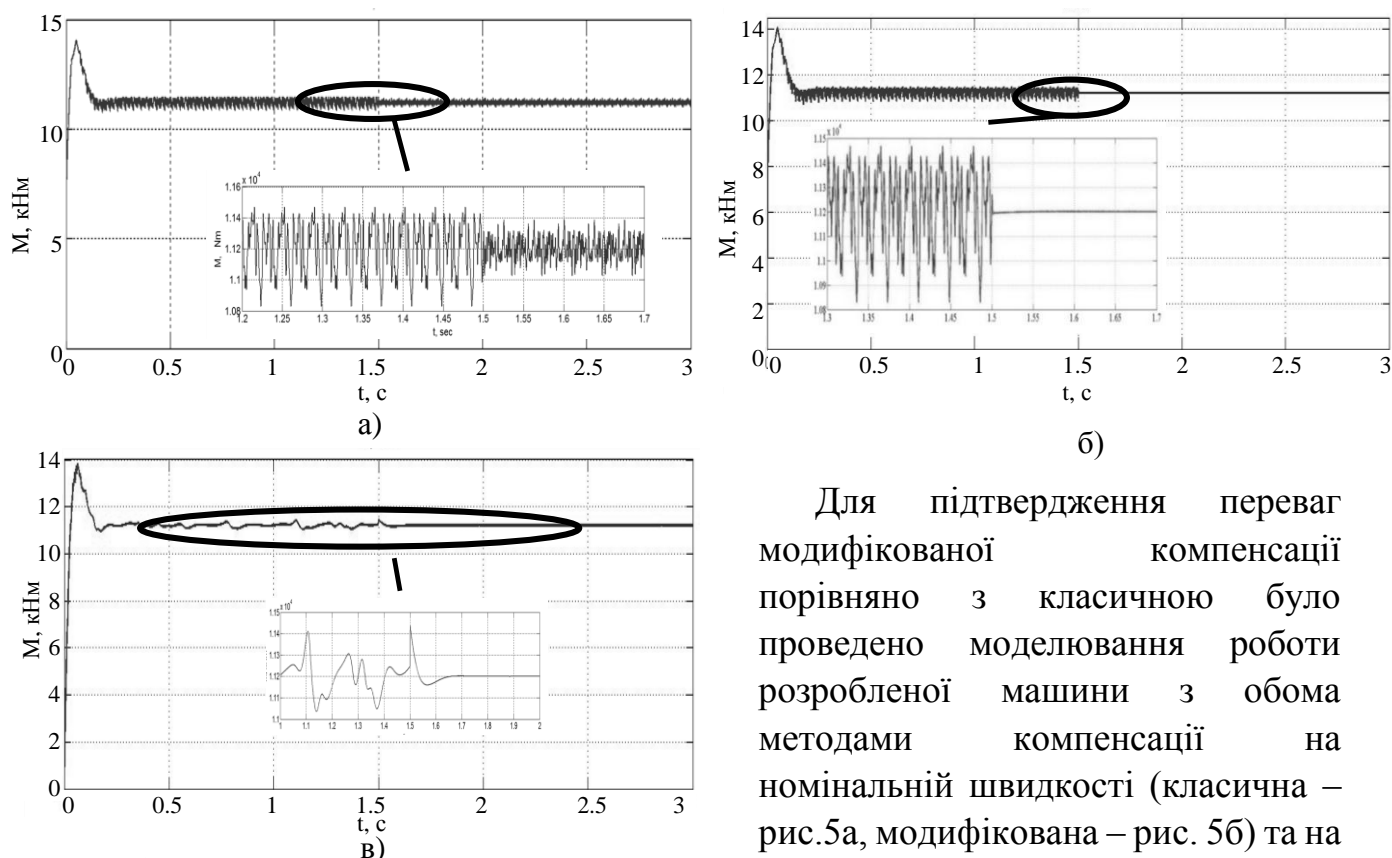


Рис. 5 Обертовий момент з врахування впливу зубцевого моменту: а) $n = 40$ об/хв., класична компенсація; б) $n = 40$ об/хв, модифікована компенсація; в) $n = 1$ об/хв., обидва методи.

Для підтвердження переваг модифікованої компенсації порівняно з класичною було проведено моделювання роботи розробленої машини з обома методами компенсації на номінальній швидкості (класична – рис.5а, модифікована – рис. 5б) та на швидкості, яка наближена до нуля (один оборот за хвилину, (рис.5в) з

врахуванням зубцевого моменту та застосуванні компенсації починаючи з 1.5сек.

Обидва методи мають однаково задовільну ефективність на нульових швидкостях та дозволяють повністю компенсувати коливання моменту. На номінальній швидкості застосування модифікованої компенсації зубцевого моменту (рис.5б) дозволяє також майже повністю компенсувати коливання моменту на відміну від класичного закону компенсації, який дозволяє зменшити коливання лише, приблизно, у два рази (рис.5а). Тобто, запропонований модифікований метод дозволяє набагато краще компенсувати коливання моменту у всьому діапазоні робочих швидкостей ніж класичний метод компенсації.

Розглянута робота ЕМС сервопреса з класичною системою керування та при сумісному застосуванні запропонованих науково-технічних рішень у режимі роботи молота сервопресу і у режимі з постійною силою пресування при максимальному передбаченому навантаженні та швидкодії для кожного режиму.

Моделювання підтвердило, що в режимі молота при максимальних силі деформації та швидкодії класичний ПІ-регулятор швидкості не дозволяє виконати головну вимогу – забезпечення необхідної усталеної швидкості у 70об/хв на момент початку деформації. Швидкість двигуна при деформації складає 83,3об/хв., що суттєво перебільшує задану. Це пояснюється тим, що швидкість не встигає встановитися через незакінчений перехідний процес. Навпаки, запропоновані технічні рішення дозволили розігнати двигун до необхідної встановленої швидкості за 52 мс, забезпечити необхідний час робочого періоду в режимі молоту (≤ 150 мс), що відповідає усім вимогам.

Моделювання було проведено з врахуванням зубцевого моменту, як без його компенсації так і з запропонованою модернізованою компенсацією. Моделювання підтвердило, що застосування розробленої компенсації дозволило зменшити в режимі молота коливання моменту до 0,98% від номінального значення на відміну від систем керування без нього, де коливання моменту становили 4% від номінального моменту.

Окрім режиму молота був розглянутий режим з постійною силою пресування, який характеризується необхідністю точного позиціонування електропривода. Процес пресування відбувається за рахунок моменту, максимальне значення якого становить трохи більше 15кНм.

В даному режимі додатково був введений контур регулювання положення. У якості регулятора положення був обраний ПД-регулятор, який має кращу точність у порівнянні з ПІ-регулятором та не має негативного впливу та динаміку та стабільність роботи системи.

При моделювання роботи ЕМС сервопресу з класичними налаштуваннями контуру швидкості час робочого періоду складає майже 1с, що у два рази довше за максимально допустимий час пресування. Навпаки, застосування

запропонованих науково-технічних рішень дозволило забезпечити виконання необхідних технологічних вимог та високу якість виробничого процесу, насамперед, високу швидкодію та відсутність коливань моменту. Так, час робочого періоду складає приблизно $\cong 580$ мс, положення відпрацьовується з високою точністю, виконуються вимоги щодо моменту двигуна, а пресування відбувається на повзучій швидкості. Необхідно зауважити, що перший період йде без компенсації зубцевого моменту, а другий з модернізованою компенсацією. Як і у випадку роботи в режимі молота, моделювання підтвердило високу ефективність запропонованої компенсації.

Четвертий розділ присвячений експериментальній перевірці та практичній реалізації розроблених підходів. Була створена конструкторська документація, яка містить усі необхідні технічні рішення для практичної реалізації моделі розробленої машини. Для перевірки теоретичного розрахунку та моделювання у спеціальному пакеті Maxwell була досліджена експериментальна модель. Головними вимогами для такого експериментального зразка є відповідність структури конструкції та принципу дії, повна аналогія електромагнітних процесів. З одного боку це дозволяє підтвердити вірність запропонованого методу розрахунку, математичної моделі та доцільності векторного керування з датчиком положення, а з іншого це зменшує фінансові витрати на побудову експериментальної моделі.

Для проведення експериментальних досліджень був створений спеціальний вимірювальний стенд, який дозволяє вимірювати електричні, механічні та температурні показники електричних машин зі збудженням від постійних магнітів у реальному часі, з можливістю збереження та опрацювання експериментальних даних в електронному вигляді.

Результати експериментального дослідження підтвердили відповідність та високу точність результатів розрахунку результатам виміру, з типовою для FEM-моделювання похибкою +/- 10%.

ВИСНОВКИ

В дисертації, яка є завершеною науково-дослідницькою роботою, вирішена наукова задача обґрунтування науково-технічних рішень і визначення закономірностей, що забезпечують створення високомоментного електропривода з високими енергетичними, динамічними, регулювальними характеристиками та мінімізацію коливань його моменту.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Встановлено, що найбільш перспективним для сервопресу є безредукторний електропривод на базі електричної машини з поперечним полем, яка має один радіальний повітряний проміжок та систему збудження від поверхнево наклеєних постійних магнітів завдяки її технологічності, кращих

енергетичних і електромеханічних характеристик в порівнянні з іншими електричними машинами, високому моменту у діапазоні невеликих швидкостей.

2. Розроблено метод розрахунку та пошуку раціональної конфігурації конструктивних параметрів запропонованої електричної машини у складі безредукторного електропривода промислового сервопреса для забезпечення максимального моменту та ККД, а також мінімальної повної потужності при заданих техніко-економічних обмеженнях. Даний метод включає в себе теоретичний розрахунок, отримання залежності повної потужності від конструктивних параметрів та подальше комп'ютерне моделювання для області мінімальних значень.

3. Розроблено високомоментну електричну машину з поперечним полем та низькою швидкістю обертання, яка має більш ніж у чотири рази менші втрати за аналогічну синхронну машину з постійними магнітами. Для мінімізації потоків розсіювання в статорі машин розроблені нові технічні рішення, щодо форми магнітопроводу розсіювання.

4. Встановлено, що система векторного керування з контуром швидкості налаштованим на модульний оптимум з додатковим компенсатором статичного моменту навантаження є найбільш раціональною для керування безредукторним електроприводом промислового сервопреса. Вона дозволяє підвищити виробничу потужність та покращити енергетичні, динамічні параметри промислового сервопреса порівняно на відміну від традиційних систем керування.

5. Встановлено, що пульсації моменту у електроприводах на базі запропонованої концепції електричної машини з поперечним полем та збудженням від постійних магнітів обумовлені, в основному, зубцевим моментом, який формується завдяки взаємодії магнітного поля постійних магнітів з залізом статора. Отримана залежність зубцевого моменту від положення ротора для розробленого електромеханічного перетворювача, яка врахована в математичній моделі електропривода та рівняння сигналу для модифікованої компенсації зубцевого моменту складової струму з врахуванням частотних характеристик контуру струму, що, на відміну від відомих методів, не зменшує величини електромагнітного моменту та дозволяє мінімізувати коливання моменту у всьому діапазоні зміни швидкості.

6. Запропонована система керування електроприводом сервопреса з контуром швидкості, налаштованим на модульний оптимум та з компенсатором статичного моменту навантаження, що разом з модифікованим методом компенсації зубцевого моменту, дозволяє підвищити виробничу потужність, енергоефективність промислового сервопреса та якість обробки металу.

7. Для проведення експериментальних досліджень створений спеціальний вимірювальний стенд, який дозволяє дослідити не тільки електричні машини з поперечним полем, а й інші типи синхронних машин зі збудженням від

постійних магнітів. Результати, що отримані під час експериментальних досліджень підтверджують достовірність та високу точність результатів аналітичного розрахунку і моделювання за допомогою спеціального пакету Maxwell, а також адекватність запропонованої математичної моделі машини з поперечним полем та систем керування.

Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

Публікації у закордонних виданнях:

1. Nolle E. Trennung der mechanischen Verluste und der Eisenverluste bei permanent erregten Synchronmaschinen / E.Nolle, N. Neuberger, D. Kujat, M. Kuvaiev. // Spektrum,. – 2011. – P. 21–25.

2. Nolle E. Compensation of the cogging torque by means of control system for transverse flux motor / E. Nolle, O. Beshta, M. Kuvaiev. // Power engineering control & information technologies in geotechnical systems. – 2015. – P. 21–25.

Публікації у фахових виданнях:

3. Нолле О. Стенд для испытания высокомоментных электрических машин / О.Нолле, Н. Нойбергер, О.С. Бешта, М.В. Куваев. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 610–612.

4. Нолле О. Електромеханічна система промислового преса малої потужності / О.Нолле, Н. Нойбергер, О. С. Бешта, М. В. Куваєв. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №15(91). – С. 182–185.

5. Nolle E. Linear 3-phase transverse flux machine with flux concentration / E. Nolle, M. Kuvaiev. // Науковий вісник Національного гірничого Університету. – 2015. – №2(146). – С. 79–83. **(Наукометрична база Scopus).**

6. Куваєв М. В. Компенсація статичної похибки за швидкістю при налаштуванні контуру регулювання на модульний оптимум / М. В. Куваєв. // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2016. – №96. – С. 37–41.

7. Beshta O. Entwurf einer einfachen und modifizierten Rastmomentkompensation für die permanent erregte Synchronmaschine / O. Beshta, E. Nolle, M. Kuvaiev. // Науковий вісник Національного гірничого Університету. – 2016. – №6(156). – С. 95–100. **(Наукометрична база Scopus).**

8. Куваєв М. В. Вибір конструкції електричної машини з поперечним полем для використання в приводі нового сервопреса / М. В. Куваєв. // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2016. – №97. – С. 60–66.

9. Куваєв М. В. Головний електропривод нового промислового сервопреса / М. В. Куваєв. // Теорія та практика металургії. – 2017. – №1-2(108-109). – С. 56–58.

Матеріали конференцій:

10. Kuvaiev M. Transverse Flux Motor and Compensation of the Cogging Torque by Means of Control System / M. Kuvaiev. // in The 10th International Forum for

Students and Young Researchers "Widening our horizons"(State Institution of Higher Education "National Mining University", Dnipro). – 2015. – P. 28.

11. Куваєв М. В. Розрахунок електричної машини за допомогою спеціального пакету САПР / М. В. Куваєв. // Міжнародна конференція «Проблеми використання інформаційних технологій у сфері освіти науки й промисловості»(ДВНЗ «НГУ», м.Дніпро). – 2016. – С. 21–23.

АНОТАЦІЯ

Куваєв М.В. Електромеханічна система сервопреса на базі електричної машини з поперечним полем. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпро, 2017.

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу обґрунтування науково-технічних рішень і визначення закономірностей, що забезпечують створення, високомоментного електропривода з високими енергетичними, динамічними, регульовальними характеристиками та мінімізацію коливань його моменту.

Було визначено, що найперспективнішим для застосування в сервопресі є електропривод на базі електричної машини з поперечним полем з циліндричним ротором, одним повітряним проміжком та з поверхневими постійними магнітами. Користуючись запропонованим методом розрахунку був отриманий електромеханічний перетворювач з втратами, які приблизно у 4 рази менші ніж у аналога.

В роботі автором запропонована система керування електроприводом сервопреса з контуром швидкості, налаштованим на модульний оптимум та з компенсатором статичного моменту навантаження з модифікованим законом компенсації зубцевого моменту, що дозволило підвищити динаміку роботи ЕМС сервопреса, набагато краще компенсувати коливання моменту у всьому діапазоні робочих швидкостей ніж класичний метод. Все це призвело до підвищення виробничої потужності, енергоефективності промислового сервопреса та якості обробки металу.

Були проведені експериментальні дослідження, які підтвердили відповідність результатів розрахунку результатам виміру.

Ключові слова: сервопрес, електромеханічна система, безредукторний електропривод, електрична машина з поперечним полем, ТФМ, регулятор швидкості, компенсатор статичної похибки, зубцевий момент, модифікована компенсація зубцевого моменту.

АННОТАЦИЯ

Куваев Н.В. Электромеханическая система сервопресса на базе электрической машины с поперечным полем. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр, 2017.

В диссертационной работе решена научная задача обоснования научно-технических решений и определения закономерностей, которые обеспечивают создание высокомоментного электропривода с высокими энергетическими, динамическими, регулировочными характеристиками и минимизацию колебаний его момента.

Было определено, что самым перспективным для применения в сервопрессе является электропривод на базе электрической машины с поперечным полем с цилиндрическим ротором, одним воздушным зазором и с поверхностно наклеенными магнитами. Пользуясь предложенным в работе методом расчета, был получен электромеханический преобразователь с меньшими, по сравнению с аналогом, в 4 раза потерями.

В работе автором предложена система управления электроприводом сервопресса с контуром скорости, настроенным на модульный оптимум и с компенсатором статического момента нагрузки с модифицированным законом компенсации зубцового момента, что позволило повысить динамику работы ЭМС сервопресса, намного лучше компенсировать колебания момента во всем диапазоне рабочих скоростей, чем классический метод. В результате была получена повышенная производственная мощность, энергоэффективность промышленного пресса и качества обработки металла.

Были проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили соответствие результатов расчета результатам измерения.

Ключевые слова: сервопресс, электромеханическая система, безредукторный электропривод, электрическая машина с поперечным полем, TFM, регулятор скорости, компенсатор статической ошибки, зубцовый момент, модифицированная компенсация зубцового момента.

ABSTRACT

Kuvaiev M.V. Electromechanical system of servopress based on electric machine with transverse field. - Qualifying research paper manuscript copyright.

Dissertation for a Candidate of technical sciences degree (PhD) in specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems". - State Higher Education Institution "National Mining University", Dnipro, 2017.

The dissertation faced the scientific challenge of creating a compact high-torque electric drive of servopress with high energetic, dynamic and control characteristics, and with minimal ripple torque in a wide speed control range of adjustment of its speed.

The work deals with the existing types of presses and their drives, which are classified in three main modes: hammer mode, pressing mode with constant power and mode with fixed trace of press slide. Unlike typical presses, in which the implementation of each operation mode is performed by specialized press for its construction, electromechanical system (EMS) of servopress based on modern non-reductor high-torque electric drive allows to implementate all major modes.

Considering the analysis of modes features of servopresses performance and the latest developments of electric machines, it is determined that the most promising for use in servopress is electric drive, which is based on electric machine with transverse field (TFM) with a cylindrical rotor, one air gap and surface permanent magnets, particularly, due to a better efficiency than in other machines. It was compared the developed electric machine with a transverse field to the typical synchronous machine with excitation from permanent magnets with the same mechanical parameters. This comparative analysis showed that the developed TFM has approximately 4 times smaller losses than the analogue.

Having reliance on an analysis of existing control systems and by reference to the requirements of the electromechanical system of press, a vector control in dq-coordinates of the rotor position sensor has been selected for a basic system. Electric machine with a transverse field is a type of permanent-magnet synchronous motors (PMSM) because its mathematical model is identical with the PMSM model.

It was found that the system with proportional speed controller, unlike the system with proportional plus reset speed controller, provides the necessary speed and quality of the transition process working in the hammer mode, that has a higher operational speed than the system with proportional plus reset speed controller by much smaller transient time and overshoot values. The disadvantage of using the P-controller of speed is the static error during surge load. In the paper it was proposed to solve this problem by adding the error value to the signal of setting the speed controller. For this it was created a static error compensator that includes an observer of the load torque. It is possible to fully compensate the error.

The research has been carried out to find the presence of pulsations and their nature in the developed electric machine with a transverse field using the special software package for determining electromagnetic fields. Torque deviations have a negative effect on the accuracy of control, lead to the occurrence of acoustic rumble and vibration, which in many cases is unacceptable when using gearless electric drive. It was found that the developed TFM has large ripples, which are caused by the presence of cogging torque. Dependence function of cogging torque on the rotor rotation angle is found, and the frequency analysis of this function was held, what allowed adding this function in Fourier series. The amplitude of the torque deviation is

about 4% of the nominal value, while limitations according to European standards are 2%. To prevent these torque deviations it has been proposed scientific and technological solution, which is a further development of the known methods. Compensation for the modified method, as in the case of classical compensation, occurs by a current signal, which is attached to the main tasks for current, has the same harmonic structure and is in opposite phase to cogging torque. The difference of the proposed modified method is the consideration of the frequency characteristics of the circuit current, module and phase (argument). The equation of compensating current taking into account the frequency characteristics of the circuit current was generated. Simulations of designed machine with both methods of compensation at rated speed and at a speed that is close to zero (one rotation per minute) were conducted to confirm the modified compensation benefits compared to classical one.

Both methods are equally effective at zero speed and allow the full compensation for the torque deviation. At rated speed the use of the modified compensation of cogging torque also allows to almost completely offset the torque deviation unlike the classical way of compensation, which reduces deviations almost twice. That is, the modified proposed method allows compensating the torque deviation much better in the entire range of operating speeds than the classic method of compensation.

It was considered a collaboration of the proportional speed control system with static error compensator with the modified compensation of cogging torque in servopress mode, which operates in the hammer mode and in the mode with constant pressing force at the provided maximum load and operational speed for each mode. Modeling of electromechanical systems of servopress with classic settings and the proposed technical solutions in both modes confirmed that only the using the last ones will ensure the implementation of the necessary technological requirements and high quality of manufacturing process, especially high speed and lack of torque deviations.

To confirm the fidelity of calculations and the adequacy of the mathematical model experimental studies were conducted. A measuring stand measuring stand for this, it allows to measure mechanical, electrical and temperature of electrical machines with excitation from permanent magnets in real time. The results of experimental studies confirmed the appropriateness and high accuracy of calculation results with measurement results.

Keywords: servopress, electromechanical systems, gearless electric drive, electric machine with a transverse field, TFM, speed control, static accuracy compensator, cogging torque, modified compensation of cogging torque.

Підписано до друку 18.07.2017 р. Формат 60x90/16.Папір офсетний.
Друк плоский. Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. 1.
Обл. вид. арк. 1. Тираж – 100 прим. Зам. №514

Віддруковано в «Поліграфцентрі» ФОП Кучугурний Ю.М.,
свідоцтво про державну реєстрацію №2 224 000 0000 073863
м. Дніпро, вул. Воскресенська, 11, 49000,
тел. (056) 735-50-08