

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Фурса Сергій Григорійович

УДК 621.3.07: 621.313.8

**ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗІ СИНХРОННОГО
ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропривода Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор
Бешта Олександр Степанович,
Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, проректор з наукової роботи, завідувач кафедри електропривода;
доктор-інженер, професор
Ойген Нолле,
Есслінгенський університет прикладних наук
(м. Гьоппінген, ФРН), завідувач лабораторії електричних машин та установок.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Толочко Ольга Іванівна,
Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри електропривода та автоматизації промислових установок;
кандидат технічних наук, доцент
Ковбаса Сергій Миколайович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електропривода.

Захист відбудеться «__» _____ 2012 р. об __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 у Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

Автореферат розісланий «__» _____ 2012 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доц.

О.О. Азюковський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблеми енергозбереження є одними з найбільш гострих і актуальних для промисловості України. Головним споживачем електроенергії та важливим елементом більшості технологічних ліній виступає електропривод. Ефективність його керування, надійність роботи та енергетичні показники значною мірою визначають ефективність всього виробничого процесу.

Останнім часом масового поширення набуває частотно-регульований електропривод змінного струму. Такі системи характеризуються високою надійністю та енергетичними показниками, а регулювання змінних відкриває нові можливості для виконання різних технологічних процесів. Найбільш перспективним серед них вважається електропривод на базі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ). Це обумовлено тим, що обраний тип електромеханічного перетворювача енергії має просту і надійну конструкцію, високу питому потужність, коефіцієнт корисної дії (ККД), а також не потребує постійного обслуговування.

Головним недоліком даного електропривода є досить висока вартість, яка стримує його масове розповсюдження в промисловості. Тому актуальним завданням є пошук технічних рішень, які б дозволили зробити електропривод на базі СДПМ масовим та доступним на виробництві в Україні. Поряд з цим необхідно забезпечити цілу низку характеристик електропривода, серед яких, одними з головних, є забезпечення максимально ефективного перетворення електричної енергії в механічну та точність керування. Остання суттєво знижується через наявність пульсацій моменту, які притаманні для даного електромеханічного перетворювача енергії.

Найбільш раціональним шляхом для цього є удосконалення самого об'єкту керування за допомогою конструктивних змін з одночасним використанням спеціальних законів керування, які забезпечують його максимально ефективну роботу. Створення СДПМ на базі класичних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (АДКР) дозволить знизити собівартість їх виготовлення. Дане технічне рішення особливо актуальне для промисловості України, в якій існує достатня кількість виробничих потужностей для виготовлення АДКР. Це дозволить швидко та при мінімальних капіталовкладеннях налагодити масове виробництво даного типу електропривода. При цьому повинна бути розроблена система керування, яка забезпечить необхідні економічні, енергетичні та регульовальні властивості електропривода.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами,

темами. Робота виконана в рамках спільного міжнародного наукового проекту кафедри електропривода Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ, Україна) та лабораторії електричних машин і установок Есслінгенського університету прикладних наук (м. Гьоппінген, ФРН) на замовлення компанії Bauer Gear Motor GmbH (м. Есслінген, ФРН).

Дослідження виконані також в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України на 2008–2009 роки (тема ГП-408 «Обґрунтування енергоресурсозберігаючих режимів та принципів керування електроенергетичних комплексів гірничо-металургійних підприємств», № держреєстрації 0108U000539). Тема досліджень відповідає напрямку «Енергетика та енергоефективність», затвердженому Законом України від 9 вересня 2010 року № 2519–VI про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

Мета і задачі наукових досліджень. Мета роботи полягає в розробці підходів підвищення енергетичних показників та точності керування електропривода на базі бюджетного СДПМ через удосконалення конструкції електромеханічного перетворювача енергії та використання спеціальних законів керування ним.

Для досягнення поставленої мети розв'язані такі задачі:

- обґрунтування доцільності використання частотно-регульованого електропривода на базі СДПМ як найбільш дієвого заходу енергозбереження засобами електропривода;
- пошук залежностей максимального моменту СДПМ від відносної маси постійних магнітів при заданих технологічних, економічних та енергетичних обмеженнях;
- розробка математичної моделі електропривода на базі СДПМ з урахуванням вищих гармонік потокозчеплення поля ротора;
- розробка законів керування для забезпечення високої точності регулювання та енергетичних показників електропривода на базі СДПМ.

Об'єктом досліджень є динамічні та енергетичні процеси в електроприводі на базі бюджетного СДПМ, створеного на основі серійного АДКР, з системою векторного керування.

Предметом досліджень є ефективність перетворення електричної енергії в механічну та якість керування в електроприводі на базі бюджетного СДПМ, створеного на основі серійного АДКР.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених задач використовувались

фундаментальні положення теорії електричних машин та метод кінцевих елементів – для моделювання і розрахунку статичних, гармонічних електромагнітних полів СДПМ, методи диференційного числення, чисельного інтегрування, гармонічного аналізу та теорії автоматичного керування – для створення математичної моделі СДПМ з урахуванням вищих гармонік потокозчеплення поля ротора та структури системи керування ним, методи планування експерименту – для експериментальної перевірки розробленого електропривода на базі бюджетного СДПМ.

Основні наукові положення та результати, їх новизна.

Наукові положення.

1. При заданих технологічних, економічних та енергетичних обмеженнях електропривод на базі СДПМ в діапазоні малих потужностей розвиває максимальний момент при відносній масі постійних магнітів Fe-Nd-B на рівні 4-5% від активної маси двигуна.
2. Постійне співвідношення гармонічних складових струму статора за осями d , q , яке визначається гармонічним складом електрорушійної сили (ЕРС) двигуна, формує сигнал корегування повздовжньої складової струму, що компенсує коливання реактивного моменту при використанні енергетично ефективного закону «максимальний момент на ампер».

Наукова новизна одержаних результатів.

- Вперше отриманий метод пошуку раціональної маси постійних магнітів СДПМ, створеного на основі серійного АДКР, у складі електропривода в діапазоні малих потужностей для забезпечення максимальних моменту та ККД при заданих техніко-економічних обмеженнях.
- Встановлено, що забезпечення випередження струмом статора ЕРС шляхом підтримання від'ємного значення повздовжньої складової струму i_d призводить до зниження пульсацій моменту СДПМ за рахунок зменшення поперечної складової i_q першої гармоніки струму статора.
- Отримано залежності ККД СДПМ, створеного на основі серійного АДКР, в складі електропривода від частоти обертання та навантаження на валу для всього діапазону регулювання швидкості, які дозволяють вибрати найбільш енергетично ефективний режим роботи електропривода.
- Вперше запропонований закон компенсації пульсацій основного і реактивного моменту СДПМ з вбудованими магнітами, який, за рахунок забезпечення певного гармонічного складу струму статора, дозволяє знизити рівень коливань моменту та одночасно використовувати закон

енергетично ефективного керування «максимальний момент на ампер», що підвищує ККД двигуна.

Практична цінність роботи.

- Встановлено раціональну відносну масу постійних магнітів для будь-якої конструкції ротора СДПМ типорозміру ІЕС112.
- Отримано залежності основних параметрів СДПМ типорозміру ІЕС112 від відносної маси постійних магнітів для двох найбільш поширених конструкцій ротора, які можуть бути використані при проектуванні відповідного типу електричних двигунів.
- Розроблено систему керування електропривода на базі СДПМ з вбудованими магнітами, яка забезпечує зниження втрат та одночасну компенсацію коливань моменту.

Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується:

- результатами експериментальних досліджень електропривода в лабораторних та промислових умовах та їх збігом з теоретичними положеннями і результатами математичного моделювання;
- впровадженням розробок у виробництво провідних закордонних та вітчизняних підприємств: Bauer Gear Motor GmbH (м. Есслінген, ФРН) та ТОВ «НПП «Вайсал»» (м. Дніпропетровськ, Україна), що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно провів аналіз стану питання розробки електропривода на базі СДПМ, сформулював задачі досліджень та наукову новизну отриманих результатів, виконав теоретичну та експериментальну частини роботи, брав безпосередню участь у створенні та впровадженні розробленого зразку електропривода.

Апробація результатів дисертації була здійснена на наукових конференціях: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, НТУ «ХП», 2010), «International Sales/R&D Meeting 2011» (м. Вайлер Альгой, Bauer Gear Motor GmbH, ФРН, 2011).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено в 5 публікаціях, з них 3 опубліковані у фахових виданнях, 1 стаття в закордонному збірнику наукових праць та 1 стаття в збірнику матеріалів міжнародної конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 128 сторінки, в тому числі 117 сторінок основного

тексту, 48 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 106 найменувань та 6 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета та задачі наукових досліджень, викладена ідея та сутність роботи, а також наведені одержані результати. Показана наукова новизна результатів дисертації та їх практична цінність.

Перший розділ присвячений обґрунтуванню необхідності розробки та впровадження доступного бюджетного високоефективного електропривода на базі СДПМ. Для цього виконано аналіз існуючих заходів енергозбереження засобами електропривода. За його результатами встановлено, що найбільш ефективним є впровадження частотно-регульованого електропривода змінного струму в діапазоні малих та середніх потужностей. При цьому необхідно використовувати енергетично ефективні двигуни та, при можливості, проводити модернізацію існуючого технологічного устаткування.

Показано, що реалізація електропривода на базі СДПМ дає цілу низку переваг у порівнянні з використанням електропривода на базі АДКР. Даний тип електропривода забезпечує високі енергетичні, динамічні та технологічні показники та дозволяє реалізувати особливі технічні рішення. Головним стримуючим фактором масового розповсюдження електропривода на базі СДПМ є досить висока вартість, яка обумовлена використанням дорогих рідкоземельних постійних магнітів та необхідністю визначення положення ротора.

Аналіз існуючих конструкцій СДПМ та систем керування показав, що найбільш високих результатів щодо створення доступного високоефективного електропривода можливо досягти лише при комплексному підході. Так було встановлено, що створення СДПМ на основі стандартних АДКР дозволяє знизити собівартість та швидко, при мінімальних капітальних витратах, налагодити серійне виробництво. Для забезпечення максимальних енергетичних показників електропривода необхідно використовувати закони енергозбереження, вибір яких залежить від обраної конструкції електромеханічного перетворювача енергії та діапазону робочих швидкостей. Проблема наявності коливальних моменту вирішується за допомогою спеціальних законів компенсації пульсацій моменту. При цьому в існуючих літературних джерелах немає жодної інформації про ефективність одночасної роботи останніх з законами енергозбереження.

За результатами проведеного аналізу сформовано мету та задачі досліджень.

Другий розділ присвячений розробці доступного електромеханічного перетворювача енергії з заданими властивостями. Для цього були сформовані

вимоги до СДПМ та його системи керування, які дозволяють реалізувати загальнопромисловий електропривод для широкого спектру електромеханічних систем.

Для вирішення поставленої задачі виконано пошук найбільш раціональної конструкції електромеханічного перетворювача енергії, що повною мірою задовольняє сформованим вимогам. Враховуючи багаторічний досвід фахівців компанії Bauer Gear Motor GmbH з проектування електричних машин було вирішено розглянути один з типорозмірів в діапазоні малих потужностей. Обравши за основу стандартний серійний АДКР типорозміру IEC112 та за результатами проведеного аналізу досліджені три різні конструкції ротора СДПМ:

- класичне розташування магнітів на поверхні ротора (SPMSM, рис. 1 а);
- класичне горизонтальне розташування вбудованих магнітів (IPMSM, рис. 1 б);
- v-образне розташування вбудованих магнітів (vIPMSM, рис. 1 в).

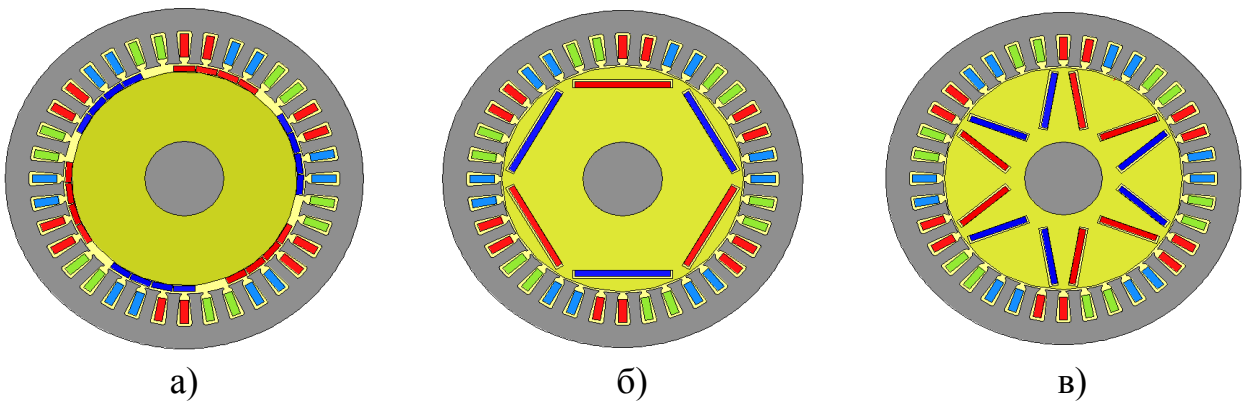


Рис. 1. Варіанти СДПМ з різними конструкціями ротора

Для скорочення часу пошуку раціональної конструкції СДПМ виконано теоретичний розрахунок електромагнітного моменту SPMSM, тому що при розташуванні постійних магнітів на поверхні ротора можливо досить легко, аналітично описати, створене ними в повітряному зазорі, магнітне поле. При цьому рівняння електромагнітного моменту в загальному випадку має вигляд:

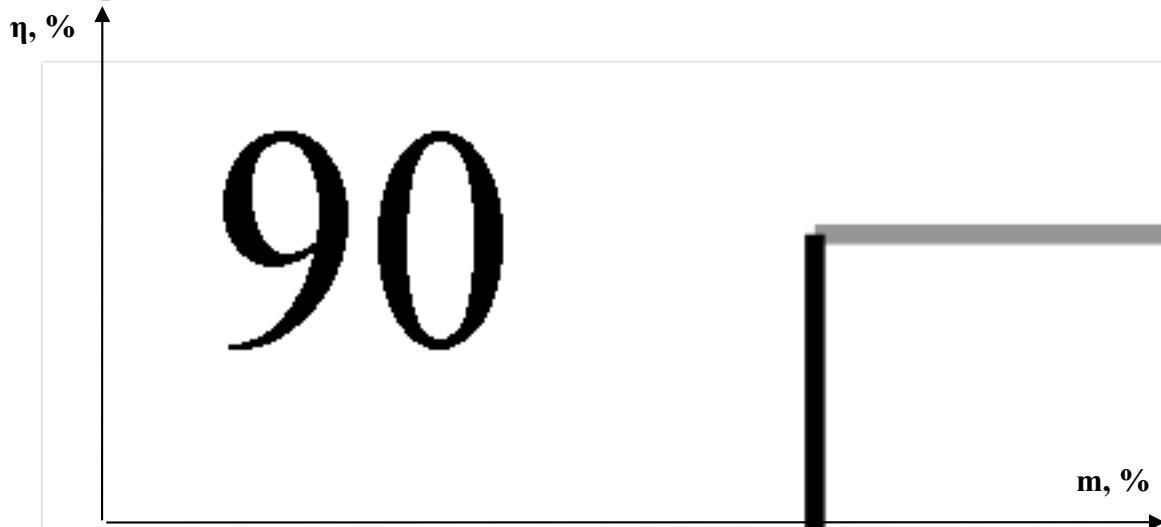
$$M = p \cdot i_1 \cdot \psi_2 \cdot \sin \theta + (p/2) \cdot i_1^2 \cdot (L_{d1} - L_{q1}) \cdot \sin 2 \cdot \theta + (Z/4) \cdot i_2^2 \cdot (L_{d2} - L_{q2}) \cdot \sin Z \cdot \theta_m \quad (1)$$

де P – число пар полюсів; i_1, ψ_2 – амплітуда фазового струму та потокозчеплення поля ротора; L_{d1}, L_{q1} – індуктивності обмотки статора, L_{d2}, L_{q2} – індуктивності умовної обмотки ротора, $\theta_m, \theta = p \cdot \theta_m$ – механічний та електричний кути повороту ротора; Z – число зубців статора.

Розглядаючи лише першу складову рівняння (1), яка представляє собою основний електромагнітний момент $M_{осн}$, отримані залежності максимального електромагнітного моменту від відносної маси постійних магнітів при заданому

значені струму статора. Найбільш раціональна маса постійних магнітів знаходиться в межах 3-6% активної маси. Також встановлено, що на величину основного електромагнітного моменту суттєво впливає коефіцієнт полюсного перекриття. Його оптимальне значення становить $\alpha_p = 0,75 - 0,9$.

Для обраного діапазону відносної маси постійних магнітів виконано розрахунок трьох варіантів конструкції СДПМ за допомогою спеціалізованого пакету САПр – Maxwell виробництва компанії Ansoft. При цьому пакет і обмотка статора – ідентичні, а усі варіації електричних двигунів розвивають аналогічну потужність у повітряному зазорі. За результатами моделювання були отримані залежності загальних втрат та ККД від відносної маси постійних магнітів (рис. 2).



Р

Вик
базово
аналог
потужн
раціон
станом
конст
макси
найкр
дослід
Еслі
техніч
спеці
десять

88

Одним з головних недоліків СДПМ є наявність пульсацій моменту, які негативно позначаються на точності керування, динаміці електропривода та спричиняють додаткові втрати. Дані пульсації обумовлені періодичними складовими основного електромагнітного моменту $M_{\text{дод}}$ та реактивним моментом M_R , який являє собою третю складову рівняння (1). Періодичні складові основного електромагнітного моменту $M_{\text{дод}}$ виникають через наявність вищих гармонік струму статора та потокозчеплення поля ротора. Аналогічно виконуючи на основі SPMSM теоретичний розрахунок основного електромагнітного моменту з урахуванням усіх гармонічних складових, отримаємо наступний вираз:

$$M(\theta) = \frac{m \cdot p}{8} \cdot \sum_{\mu} \sum_{\nu} I_{1m\nu} \cdot \Psi_{2m\mu} \cdot \sin((\mu - \nu) \cdot \theta) \quad (2)$$

де $\mu = \nu = 6 \cdot k + 1$, $k = 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – номер гармоніки; m – число фаз. При цьому гармоніки однакового порядку $\mu = \nu$ утворюють корисний незмінний у часі основний електромагнітний момент:

$$M_{\text{осн}} = \frac{m \cdot p}{8} \sum_{\mu} I_{1m\nu} \cdot \Psi_{2m\mu} \quad \text{при } \nu = \mu = 1, -5, 7, \dots, \quad (3)$$

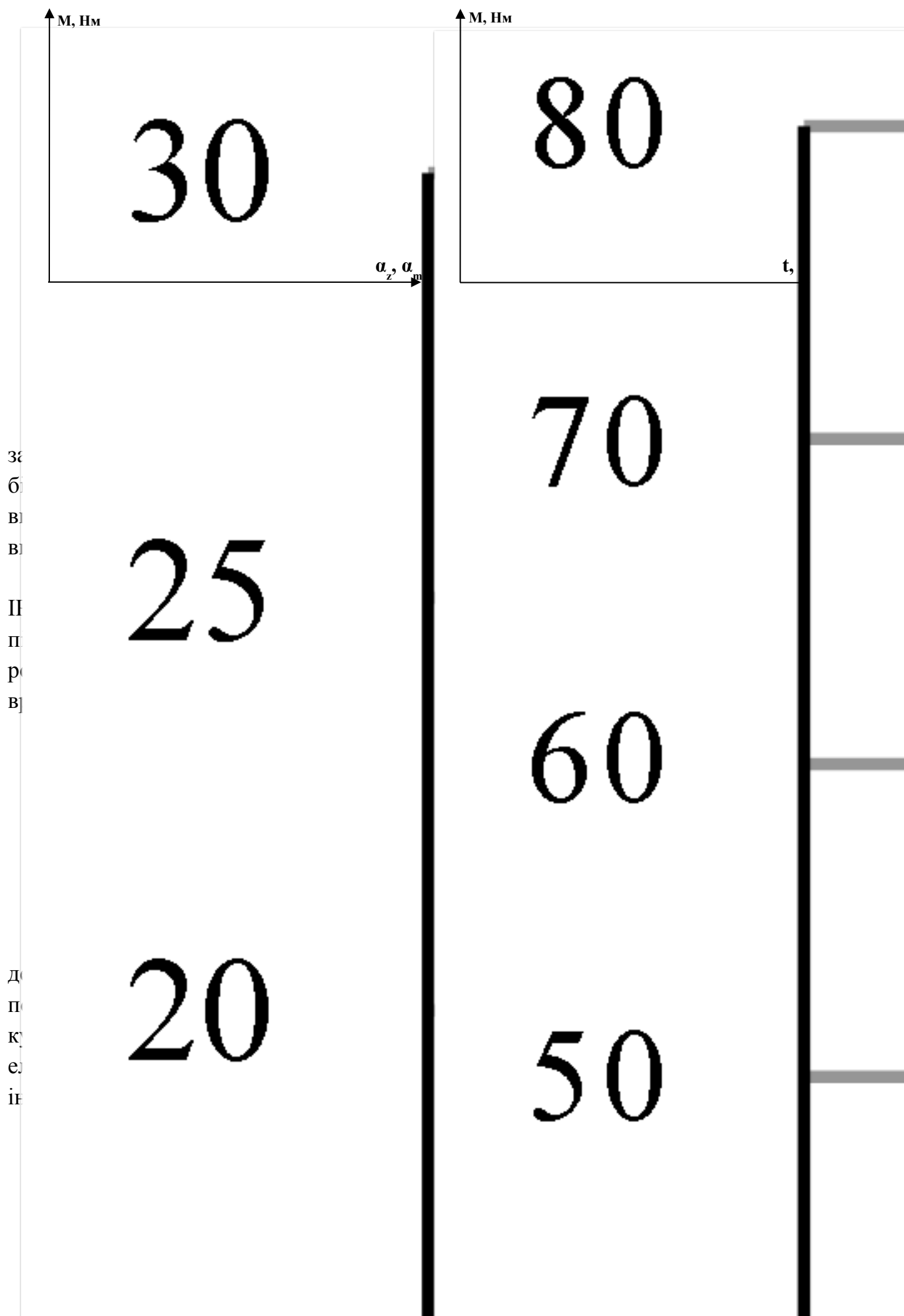
тоді як при $\mu \neq \nu$ виникають періодичні складові основного електромагнітного моменту:

$$M_{\text{дод}} = \frac{m \cdot p}{8} \cdot \sum_{\mu} \sum_{\nu} I_{1m\nu} \cdot \Psi_{2m\mu} \cdot \sin((\mu - \nu) \cdot \theta) \quad (4)$$

при $\mu = \nu = 6 \cdot k + 1$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$.

Реактивний момент M_R можливо 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. Зубцевий реактивний момент M_z виникає через взаємодію країв постійних магнітів та пазів статора.

Для зменшення розглянутих пульсацій електромагнітного моменту розглянуті та промодельовані заходи цілеспрямованого удосконалення обраної конструкції IPMSM. За результатами проведених досліджень встановлено, що правильний вибір відносної ширини зубця та магніту дозволяє відчутно знизити коливання моменту без підвищення вартості двигуна. Відповідні залежності амплітуди пульсацій моменту від відповідного конструктивного елементу IPMSM наведено на рис. 3.



$$-2i_{q1} \begin{pmatrix} d(t) \\ q(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_6 \sin 6 \\ d_{12} \sin 12 \\ \dots \\ q_1 \\ q_6 \cos 6 \\ q_{12} \cos 12 \\ \dots \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де $\Psi_{d6}, \Psi_{d12}, \dots$ та $\Psi_{q6}, \Psi_{q12}, \dots$ – проекції відповідних вищих гармонік магнітного поля ротора.

На основі розробленої математичної моделі СДПМ побудовано класичну підпорядковану систему керування електропривода з використанням стандартного закону керування з підтримання складової струму $i_d = 0$. Регулятори струму налаштовано на технічний оптимум, а регулятор швидкості – на симетричний оптимум. Результати моделювання свідчать, що через особливості конструкції розробленого електромеханічного перетворювача енергії в електроприводі виникають суттєві пульсації моменту. Вони становлять 23,3% від номінального моменту, що є неприпустимим значенням.

Для зниження даних коливань застосовано спеціальний закон компенсації пульсацій моменту. Він передбачає живлення СДПМ струмом статора з певним набором вищих гармонік, які визначаються згідно гармонічного складу потокозчеплення та знаходяться у протифазі до відповідних його складових. При цьому доцільно обмежитись розглядом лише найбільш впливових складових потокозчеплення. Необхідний струм забезпечується за допомогою введення в канал керування складовою i_q сигналу корегування:

$$i_{q\text{ком}} = i_{q6} \cdot \cos(6 \cdot \theta + \pi) + i_{q12} \cdot \cos(12 \cdot \theta + \pi), \quad (7)$$

де амплітуди гармонік визначаються згідно виразу:

$$i_{q6} = i_{q1} \cdot \Psi_{q6} / \Psi_1, \quad (8)$$

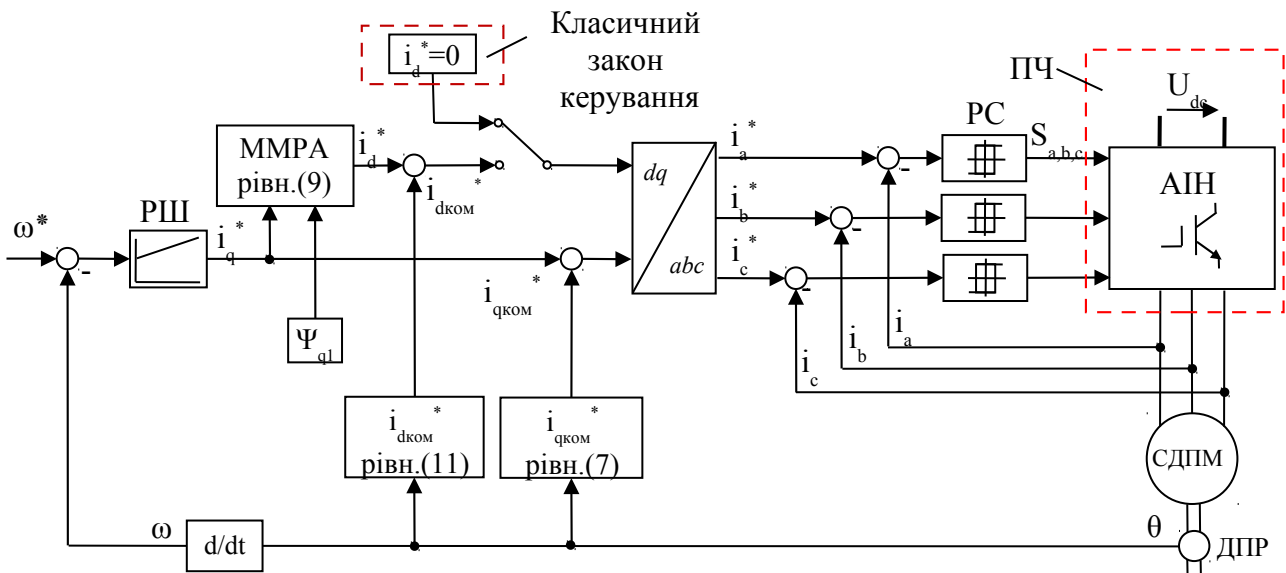


Рис. 5. Структурна схема електропривода на базі IPMSM

Для якісного відпрацювання заданого завдання регулятори струму повинні мати максимальну швидкість. Тому запропоновано систему керування з використанням релейних регуляторів струму, яка представлена на рис. 5. Моделюванням встановлено, що використання запропонованого закону компенсації пульсацій дозволило знизити в 7 разів існуючі коливання моменту до 1,7%, що є прийнятним значенням.

Стандартний закон з підтримання складової струму $i_d = 0$ не забезпечує оптимальний режим роботи обраного IPMSM, оскільки він не дозволяє використовувати реактивний момент M_p , який характерний для даного типу СДПМ. Для забезпечення більш енергетично-ефективної роботи електропривода існують спеціальні закони керування, що дозволяють мінімізувати втрати, а їх вибір залежить від обраного діапазону робочих швидкостей. За результатами аналізу для електроприводів з середнім діапазоном регулювання швидкості встановлено, що достатньо використовувати закон керування «максимальний момент на ампер» (ММРА). Згідно нього максимальний момент отримують, коли складова струму статора i_d дорівнює:

$$i_d = -\frac{\Psi_{q1}}{2 \cdot (L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\Psi_{q1}}{4 \cdot (L_d - L_q)} + i_q^2}, \quad (9)$$

Результати моделювання свідчать, що використання закону ММРА дозволило розвинути номінальний момент при струмі на 17,6% менше ніж при використанні стандартного закону з підтримання складової струму $i_d = 0$. Це дозволило за рахунок зниження, в першу чергу, втрат в міді підвищити ККД IPMSM на 2,6% (до 90,6%) та зменшити втрати в ключах перетворювача частоти.

Для регулювання швидкості в другій зоні, яка характеризується досягненням деякої швидкості ω_2 , при якій виконується умова обмеження максимальної напруги, необхідно ослабити магнітне поле СДПМ. Цього досягають за допомогою створення від'ємної складової струму статора $i_d < 0$, яка визначається згідно виразу:

$$i_d = -\frac{\Psi_1}{2 \cdot (L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\Psi_1}{4 \cdot (L_d - L_q)} + i_q^2}. \quad (10)$$

Отримані результати моделювання на рис. 6 підтвердили відомий факт, що зона ослаблення поля характеризується постійною потужністю. Таким чином зі збільшенням швидкості зменшується електромагнітний момент електропривода. При цьому обраний IPMSM має високі показники ККД при навантаженні в діапазоні $M_c = 0,2 - 1,3 M_H$ та частоті обертання в діапазоні $n = 0,5 - 2 \cdot n_H$.

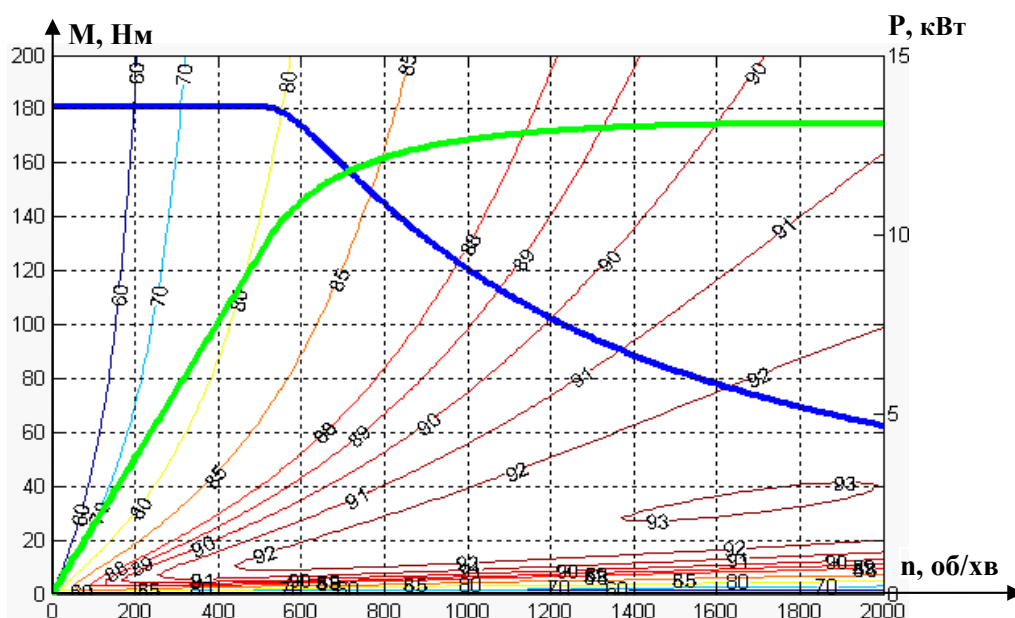


Рис. 6. Залежність максимальної потужності, моменту та ККД від частоти обертання

З рис. 7 видно, що використання закону ММРА, який працював до відмітки часу $t_1 = 0,22$ с, зменшило пульсації моменту на 5,8% (до 17,5%). Даний ефект досягнуто за рахунок зниження першої гармоніки струму статора. Одночасна робота закону ММРА з законом компенсації пульсації моменту після відмітки часу $t_1 = 0,22$ с знизил майже повністю пульсації основного моменту, але призвела до збільшення пульсацій реактивного моменту M_p . При цьому загальні пульсації сягають неприпустимого значення у 7,5%.

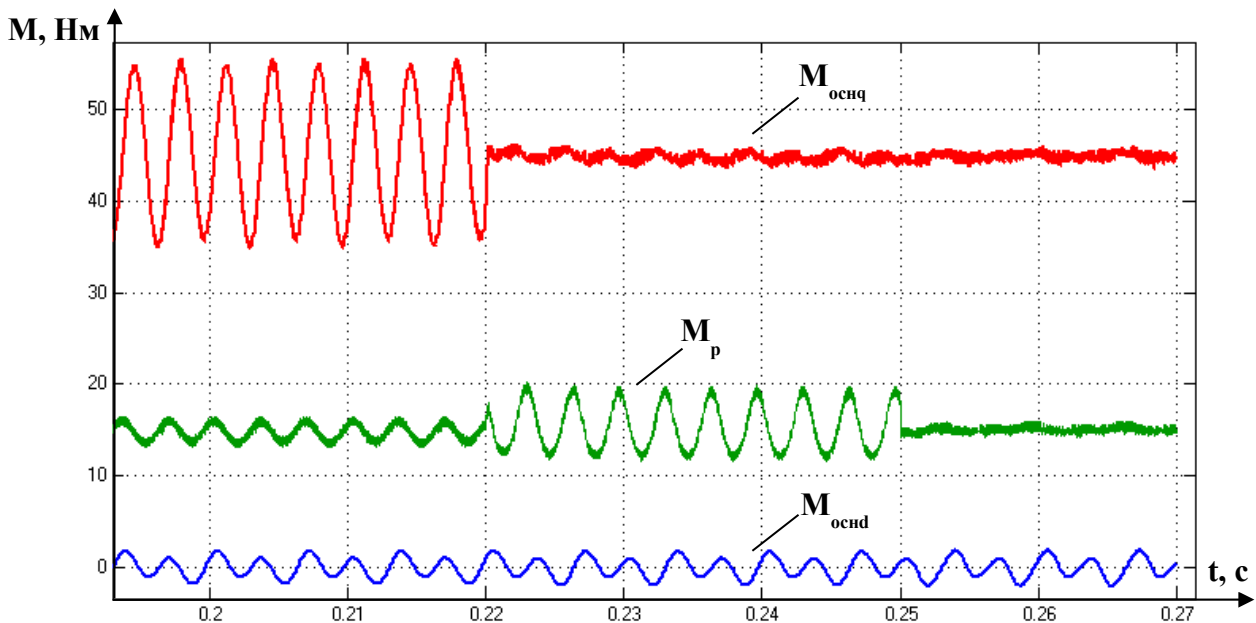


Рис. 7. Складові електромагнітного моменту IPMSM в усталеному режимі

Для вирішення даної проблеми розроблено новий закон керування, який передбачає введення додаткового сигналу корегування в каналі i_d :

$$i_{dkom} = i_{d6} \cdot \cos 6 \cdot \theta + i_{d12} \cdot \cos 12 \cdot \theta, \quad (11)$$

де вищі гармонічні складові струму статора i_d знаходяться у протифазі до відповідних складових струму статора i_q , а амплітуди визначаються згідно виразу:

$$i_{d6} = i_{d1} \cdot i_{q6} / i_{q1}. \quad (12)$$

Використання даного закону, згідно результатів моделювання рис. 7 після відмітки часу $t_2 = 0,25$ с, дозволило майже повністю компенсувати коливання реактивного моменту M_p . При цьому рівень загальних пульсацій знизився до 4,2%, що дещо перевищує допустиме значення. Таким чином розроблено новий закон керування, який дозволяє ефективно компенсувати пульсації моменту та одночасно використовувати закон енергозбереження ММРА, що розширює область застосування створеного електропривода.

Четвертий розділ присвячений експериментальній перевірці розробленого електропривода на базі IPMSM. Для цього створено його експериментальний зразок та вимірювальний стенд, на якому були проведені відповідні практичні дослідження.

Визначені основні параметри електромеханічного перетворювача енергії. Встановлено, що похибка між реальними параметрами IPMSM та параметрами, отриманими за допомогою моделювання в Maxwell, не перевищує 5%. При цьому найбільше відхилення спостерігається для вищих гармонік потокозчеплення. Представлені результати підтверджують достовірність і високу точність моделювання за допомогою програмного пакету Maxwell.

Розроблений науковий підхід до пошуку раціональної маси постійних

магнітів СДПМ був впроваджений на виробництві Bauer Gear Motor GmbH. За його допомогою був розроблений серійний ряд СДПМ малої потужності типорозмірів IEC80-112. Отримані практичні результати підтвердили, що при відносній масі постійних магнітів Fe-Nd-B на рівні 4-5% можливо досягти найбільш раціональних показників електропривода на базі СДПМ в заданих технологічних, економічних та енергетичних обмеженнях.

Для електропривода виміряні механічну і моментну характеристики, а також виконана перевірка на нагрів. Похибка отриманих результатів з результатами моделювання не перевищує 2-4%, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі електропривода.

Виконано техніко-економічне обґрунтування розробленого електропривода при номінальній потужності $P_n = 5,5$ та в режимі роботи S1 з річним обсягом роботи 3000 годин на рік. За рахунок енергозбереження він дозволяє заощаджувати щорічно 1254,26 грн. при використанні класичного закону керування та 1713,84 грн. при використанні розроблених законів. Таким чином різницю на його придбання можливо компенсувати відповідно за 19 та 14 місяців роботи.

За результатами порівняння собівартості виготовлення комплектуючих АДКР та запропонованого IPMSM аналогічного класу енергетичної ефективності ІЕЗ встановлено, що розроблені технічні рішення дозволили створити конструкцію СДПМ, яка коштує на 31,4% дешевше.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеною науково-дослідною роботою, виконано розв'язання науково-прикладної задачі розробки високоефективного електропривода на базі СДПМ в умовах технологічних та економічних обмежень. Мета роботи досягнута шляхом створення конструкції електромеханічного перетворювача енергії, яка забезпечує максимальні сформовані вимоги при забезпеченні мінімальної собівартості її виготовлення. Для керування даним СДПМ вперше розроблена система керування, яка одночасно знижує втрати електропривода та компенсує наявні пульсації моменту.

За результатами проведених досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. СДПМ з вбудованими магнітами, створені на основі класичних АДКР, мають найменшу собівартість виготовлення серед існуючих варіантів конструкцій СДПМ. Дана технологія дозволяє виробникам електричних машин налагодити масове серійне виробництво без значних капіталовкладень.

2. Вперше встановлено, що раціональна відносна маса постійних магнітів при заданих технологічних, економічних та енергетичних обмеженнях для СДПМ в діапазоні малих потужностей становить 4-5%. При цьому СДПМ належать до класу енергетичної ефективності ІЕЗ, мають високий пусковий момент та 2-3 кратну переважувальну здатність, яка залежить від діапазону регулювання швидкості.
3. Для підвищення енергетичних показників електропривода на базі IPMSM необхідно використовувати спеціальні закони енергетично ефективного керування. Для електроприводів з середнім діапазоном регулювання швидкості достатньо використовувати лише закон керування ММРА. Це дозволяє підвищити ККД розробленого IPMSM на 2,6% та знизити рівень пульсації моменту на 5,8%.
4. Наявні пульсації моменту можливо зменшити за допомогою цілеспрямованого удосконалення конструкції СДПМ. Найбільш дієвим заходом для IPMSM є зсув пакетів ротора на одне зубцеве ділення статора. Але більшість конструктивних змін знижує номінальний момент, підвищує собівартість СДПМ та ускладнює процес виробництва.
5. Використання спеціальних законів компенсації пульсацій моменту дозволяє знизити пульсації моменту без підвищення собівартості електропривода. При цьому традиційний закон компенсації пульсацій моменту забезпечує необхідні показники лише при одночасній роботі з законом керування з підтриманням складової струму статора $i_d = 0$. Використання даного закону для запропонованого IPMSM дозволяє знизити рівень пульсацій з 23,3% до 1,7%, що є прийнятним значенням. При цьому необхідні амплітуди гармонічних складових струму статора визначаються на основі амплітуд гармонік потокозчеплення поля ротора.
6. Вперше встановлено, що одночасна робота стандартного закону компенсації пульсацій моменту та закону ММРА призводить до підвищення коливань на 5,8% за рахунок збільшення пульсацій реактивного моменту M_p .
7. Вперше розроблений закон компенсації пульсацій реактивного моменту, який передбачає введення сигналу корегування повздовжньої складової струму i_d , що визначається згідно гармонічного складу потокозчеплення поля ротора та складової струму статора i_q . Він дозволяє майже повністю компенсувати наявні коливання реактивного моменту M_p .
8. Для розробленого електропривода отримані залежності ККД IPMSM від частоти обертання та навантаження для всього діапазону регулювання

швидкості. Запропонована система керування забезпечує високі енергетичні показники при навантаженні в діапазоні $M_c = 0,2 - 1,3 \cdot M_n$ Нм та частоті обертання в діапазоні $n = 0,5 - 2 \cdot n_n$ об/хв.

9. Результати експериментальної перевірки електропривода підтвердили достовірність та високу точність результатів моделювання за допомогою спеціалізованого програмного пакету Maxwell, а також адекватність розробленої математичної моделі електропривода та його системи керування. Похибка між експериментальними та промодельованими результатами не перевищує 5%.
10. Впровадження розробленого електропривода підтверджено техніко-економічним обґрунтуванням. Так, застосування даного електропривода при номінальній потужності $P_n = 5,5$ та в режимі S1 дозволяє щорічно заощадити 1713,84 грн. у порівнянні до класичного електропривода на базі АДКР. При цьому різниця капітальних витрат на його придбання компенсується за 14 місяців роботи.

Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Бешта О.С. Обґрунтування доцільності використання синхронних двигунів з постійними магнітами з вбудованими магнітами / О.С. Бешта, О.В. Балахонцев, С.Г. Фурса // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – №4(63). – Ч.2. – С. 73-75.
2. Hocheffizienter Synchronmotor, kompakt und günstig / E. Nolle, S. Fursa, N. Neuberger, A. Beshta // Spektrum. – 2010. – №31. – S. 33-37.
3. Зменшення пульсацій моменту в електроприводі на базі синхронного двигуна з вбудованими постійними магнітами / О.С. Бешта, С.Г. Фурса, А.І. Прохоров, О.В. Балахонцев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2011. – №11(186). – С. 54-59.
4. Бешта О.С. Система компенсації пульсацій моменту в електроприводі на базі синхронного двигуна із вбудованими постійними магнітами / О.С. Бешта, С.Г. Фурса, А.І. Прохоров // Науковий вісник НГУ. – 2011. – №2. – С. 120-125.
5. Розробка синхронного двигуна з постійними магнітами мінімальної вартості / Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, С.Г. Фурса та ін. // Матеріали міжнародної конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – №28. – С. 426-427.

В роботах, опублікованих у співавторстві, автором особисто виконано: [1] – обґрунтування актуальності впровадження електропривода на базі СДПМ як ефективного рішення для підвищення енергозбереження та запропоновано для зниження собівартості СДПМ створювати їх на основі серійних АДКР; [2] – досліджено конструктивні рішення для зниження собівартості СДПМ; [3] – розглянуто заходи зменшення пульсацій моменту в електроприводі на базі СДПМ з вбудованими магнітами за допомогою конструктивних змін та запропоновано найбільш дієві; [4] – здійснено аналіз існуючих законів компенсації пульсацій моменту, створено математичну модель електропривода на базі СДПМ з урахуванням вищих гармонік потокозчеплення поля ротора та розроблено систему керування, яка дозволяє компенсувати існуючі коливання моменту та одночасно використовувати закон енергетично-ефективного керування «максимальний момент на ампер»; [5] – знайдено найбільш раціональну масу постійних магнітів при заданих обмеженнях.

Анотація

Фурса С.Г. Високоєфективний електропривод на базі синхронного двигуна з постійними магнітами. – 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», Дніпропетровськ, 2012.

Дисертація присвячена питанням підвищення енергетичних показників та точності керування електропривода на базі СДПМ при заданих технологічних та економічних обмеженнях через удосконалення конструкції електромеханічного перетворювача енергії та використання спеціальних законів енергозбереження та компенсації пульсацій моменту.

В роботі обґрунтовано доцільність використання електропривода на базі СДПМ як найбільш дієвого заходу енергозбереження засобами електропривода, виконано аналіз існуючих конструкцій даного типу електричних двигунів та систем керування ними. Запропоновані технічні рішення, які дозволяють забезпечити необхідні показники СДПМ при мінімальній собівартості його виготовлення.

Розроблено систему керування електроприводом на базі СДПМ з вбудованими магнітами, яка підвищує ККД та зменшує пульсації моменту. На відміну від існуючих систем керування, новий розроблений закон компенсації пульсацій моменту дозволяє одночасно використовувати закон енергетично-ефективного керування ММРА та компенсувати пульсації реактивного моменту. Проведена експериментальна перевірка розробленого електропривода

на базі СДПМ.

Розроблені технічні рішення та система керування пройшли промислову апробацію та були впроваджені у виробництво компанії Bauer Gear Motor GmbH, ФРН.

Ключові слова: електропривод, синхронний двигун з постійними магнітами, пульсації моменту, закон енергетично-ефективного керування.

Аннотація

Фурса С.Г. Высокоэффективный электропривод на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. – 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», 2012.

Диссертация посвящена вопросам повышения энергетических показателей и точности управления электропривода на базе СДПМ при заданных технологических и экономических ограничениях при помощи усовершенствования конструкции электромеханического преобразователя энергии и использования специальных законов энергосбережения и компенсации пульсаций момента.

В работе обоснована целесообразность использования электропривода на базе СДПМ как наиболее действенного мероприятия энергосбережения средствами электропривода. Выполнен анализ существующих конструкций данного типа электродвигателей и систем управления ими. Особое внимание уделено анализу существующих алгоритмов компенсации пульсаций момента СДПМ.

В диссертации предложены технические решения, позволяющие обеспечить необходимые показатели СДПМ при минимальной себестоимости его изготовления. Для этого необходимо создавать СДПМ на базе серийных АДКР, а ротор выполнять с горизонтально расположенными встроенными магнитами. По результатам моделирования установлено, что для типоразмера ИЕС112 рациональная относительная масса постоянных магнитов при заданных ограничениях составляет 4-5%. Также исследованы методы уменьшения пульсаций момента при помощи усовершенствования конструкции СДПМ.

Разработана система управления электроприводом на базе СДПМ со встроенными магнитами, которая повышает КПД и уменьшает пульсации момента. Применение закона энергетически эффективного управления ММРА позволяет развить необходимый момент при меньшем токе статора за счет использования реактивного момента, который характерен для данного типа

СДПМ. Разработан новый закон компенсации пульсаций момента, который, в отличие от существующих, позволяет одновременно использовать закон ММРА и компенсировать пульсации реактивного момента.

Проведена экспериментальная проверка разработанного электропривода на базе СДПМ и выполнено технико-экономическое обоснование его применения. При номинальной мощности $P_n = 5,5$ кВт и в режиме работы S1 возможно ежегодно экономить 1713,84 грн. в сравнении с электроприводом на базе АДКР. При этом разница капитальных затрат на его приобретение компенсируется за 14 месяцев работы. Разработанные технические решения и система управления прошли промышленную апробацию и были внедрены в производство компании Bauer Gear Motor GmbH, Германия.

Ключевые слова: электропривод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, пульсации момента, закон энергетически эффективного управления.

Abstract

Fursa Sergii High efficiency electric drive with permanent magnet synchronous motor. – On the right of manuscript.

Thesis for candidate of technical sciences degree in specialty 05.09.03 – “Electrical engineering complexes and systems”. – National Mining University, 2011.

The thesis deals with permanent magnet synchronous motors, their energetic performances under given cost-benefit constraints. Approaches for construction optimization are given, special control algorithms for torque pulsation minimization are proposed. Energy-saving control principles are considered.

The expediency of PMSM-based electric drive is proven in terms of energy efficiency. The analysis of conventional synchronous motors design schemes is carried out. Existing control systems’ performances are examined. New solutions providing required energetical and dynamical performances under minimal production costs are proposed.

The control system for PMSM-based drive with internal magnets for high efficiency and low ripple pulsations is proposed. Unlike known principles, the new control algorithm provides simultaneous operation of MPPA control principle with reactive torque damping.

The solutions developed and the control algorithms were tested in industrial environment and are being applied in current production in Bauer Gear Motor GmbH, Germany.

Key words: electric drive, permanent magnet synchronous motor, torque pulsations, energy-efficiency control.

Фурса Сергій Григорійович

ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗІ СИНХРОННОГО
ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

(Автореферат)

Підписано до друку 05.12.2011. Формат 60x90\16
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 110 прим. Зам. № 1607

Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»
49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19