

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Дудін Микита Олегович

УДК 681.5: 62-5

**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ БЕЗДАТЧИКОВОГО КЕРУВАННЯ
СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ З
НИЗЬКОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО ЗМІНЕННЯ АКТИВНОГО ОПОРУ
СТАТОРА**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат кваліфікаційної роботи магістра

Краматорськ 2020

Робота виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації
Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки
України, м. Краматорськ.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,
Івченков Микола Володимирович,
Донбаська державна машинобудівна
академія, доцент кафедри
«Електромеханічні системи
автоматизації».

Рецензент:

Захист відбудеться «___» грудня 2020 р. о ____ годині на засіданні державної
екзаменаційної комісії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка» в Донбаській державній машинобудівній
академії на кафедрі ЕСА за адресою: 84313, м. Краматорськ, бульвар
Машинобудівників, 39, 2-й корпус, ауд. 2133.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

СДПМ все частіше знаходять застосування в ЕП, які потребують високої якості регулювання, витісняючи двигуни постійного струму. СДПМ мають високі питомі енергетичні показники – високий ККД, за рахунок відсутності втрат в роторі, і високі масогабаритні показники. Крім того, за рахунок використання постійних магнітів завжди є номінальний магнітний потік, що дозволяє виключити з пускової діаграми ЕП ділянку попереднього намагнічування, необхідну для АДКЗР. За рахунок відсутності ковзних контактів СДПМ характеризуються малими експлуатаційними витратами. Основними перевагами електроприводу на базі СДПМ є:

- безконтактність і відсутність вузлів, що вимагають обслуговування;
- велика перевантажувальна здатність по моменту (короткочасно кратність максимального моменту дорівнює 5 і більше);
- висока швидкодія, обумовлена відносно малою величиною електромагнітної і механічної інерційності;
- високі енергетичні показники (ККД і $\cos\phi$).
- практично необмежений діапазон регулювання частоти обертання (1:10000 і більше) і можливість регулювання частоти обертання за різними законами;
- низький перегрів СДПМ збільшує термін служби електроприводу,
- мінімальні масогабаритні показники при інших рівних умовах;
- можливість високошвидкісного виконання.

Наведені вище переваги електроприводів на базі СДПМ роблять його перспективним в таких областях як:

- сервоприводи роботів і маніпуляторів;
- приводи подачі і головного руху металорізальних верстатів і координатних пристроїв;

– автоматичні лінії по обробці різних матеріалів або складанні виробів;

– пакувальні машини;

– друкарські машини, принтери та плотери;

– намотувальні і стрічкопротяжні механізми;

– прецизійні системи стеження і наведення;

– авіаційна техніка;

– медична техніка;

– тяговий електропривод електричного транспорту;

– приводи рульового керування літальних і підводних апаратів, автомобілів;

– мотор-колеса;

– гірські машини;

– турбомеханізми;

– побутова техніка та ін.

Для реалізації систем векторного керування необхідно мати інформацію про всі вектори стану машини. Відповідно виникає проблема отримання інформації про опорний вектор потокозчеплення при відсутності повних вимірів. У різні часи цю проблему вирішували шляхом вимірювання індукції магнітного поля в розточці статора двигуна – використовували датчики Холла – або ж на підставі непрямой інформації про потоки, одержуваної по ЕРС, що наводиться в спеціально укладеної в статор вимірювальній обмотці. Для вимірювання кутової швидкості ротора використовувалися тахогенератори або імпульсні датчики. Однак все це вимагало заміни або доробки величезного парку машин, які не призначалися для регулювання і не були забезпечені цими датчиками.

Більшість методів бездатчикового керування засновано на математичних моделях електромагнітних процесів, що протікають в машині змінного струму. Всі вони поєднують обчислення оцінки частоти обертання з

обчисленням модуля і кутового положення опорного вектора потокозчеплення, а відрізняються один від одного точністю обчислення швидкості, чутливістю до дрейфу параметрів, що входять в математичну модель спостерігача, здатністю функціонувати в характерних областях на площині механічних характеристик.

На сьогоднішній день відомо велика кількість різноманітних алгоритмів оперативного (поточного) оцінювання координат машин змінного струму. Їх можна розділити на пасивні і активні алгоритми. Активні алгоритми припускають введення в основний спектр напруги або струму спеціальних тестових впливів для подальшого аналізу реакції на них електричної машини. Ці дії носять високочастотний характер, наприклад, з частотою 6-ої і більш високих гармонік. Однак, інжектуючи тістові сигнали навіть з досить малою амплітудою, доводиться миритися з додатковими втратами в електричній машині і силовому перетворювачі, що, звичайно, погіршує енергоефективність електромеханічної системи в цілому і збільшує встановлену потужність силових елементів.

Зв'язок роботи з планами і темами кафедри. Робота була виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської машинобудівної академії відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ДРН№.0117U007402 «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації» згідно з напрямком наукової роботи кафедри.

Метою роботи є дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змін активного опору статора.

Мета досягається за розв'язання наступних задач:

– розгляд технічних особливостей та класифікація синхронних

двигунів з постійними магнітами;

– вибір системи керування синхронного двигуна з постійними магнітами для електромеханічної системи електроприводу стрічкового конвеєра;

– дослідження електромеханічної системи стрічкового конвеєра на основі математичної моделі;

– дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змін активного опору статора.

– аналіз економічних переваг і актуальності прийнятих рішень.

Об'єктом дослідження є електропривод переміщення стрічкового конвеєра.

Предметом дослідження є дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами

Методи досліджень – методи математичного моделювання; чисельні методи обчислень, методи теорії автоматичного керування, теорія узагальненої синхронної машини.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано методи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змін активного опору статора.

2. Розглянуто побудову адаптивних систем поточної пасивної ідентифікації стану електропривода, що використовують в своїй структурі спостерігач повного порядку.

3. Синтез адаптора активного опору статора дозволяє здійснювати безперервне підстроювання ідентифікатора активного опору статора, що

забезпечить необхідну якість процесів обчислення опору у всій площині механічних характеристик електроприводу.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено адаптивний алгоритм обчислення координат стану для бездатчикового векторного керування неявнополісною синхронною машиною з постійними магнітами, який є стійким у всій площині механічних характеристик електроприводу і дозволяє обчислювати невимірювані координати ЕП, необхідні для побудови системи векторного керування СДПМ.

2. В роботі пропонується відмовитися від складних алгоритмів обчислення початкового положення струмів, а для фіксації положення ротора перед запуском формувати постійний вектор струму, спрямований по осі фази А двигуна.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці алгоритмів бездатчикового оцінювання невимірюваних координат електроприводу стрічкового конвеєра, що базуються на ідентифікації активного опору статора СДПМ для забезпечення сталості швидкості обертання двигуна.

Наукова апробація роботи. Результати досліджень обговорювались на щорічній науковій конференції студентів ДДМА, м. Краматорськ, 2020 р.

Публікація результатів наукових досліджень.

Матеріали магістерської роботи опубліковано в науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Структура і обсяг магістерської роботи.

Магістерська робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи становить 140 сторінок, включаючи 39 рисунків та 20 таблиць. Список використаних джерел містить 42 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** виконується аналіз сучасного стану щодо використання та перспектив розвитку електроприводі на базі синхронних двигунів з постійними магнітами.

Відомо, що понад 60% усієї вироблюваної в світі електроенергії споживається електроприводами (ЕП), причому більшість з них – це електроприводи загальнопромислових механізмів (насосів, вентиляторів, компресорів, транспортерів тощо), а також електроприводи різних технологічних установок, які не потребують глибокого регулювання і високого швидкодії від самого початку оснащені електродвигунами змінного струму. СДПМ все частіше знаходять застосування в ЕП, які потребують високої якості регулювання, витісняючи двигуни постійного струму. СДПМ мають високі питомі енергетичні показники – високий ККД, за рахунок відсутності втрат в роторі, і високі масогабаритні показники. Крім того, за рахунок використання постійних магнітів завжди є номінальний магнітний потік, що дозволяє виключити з пускової діаграми ЕП ділянку попереднього намагнічування, необхідну для АДКЗР. За рахунок відсутності ковзних контактів СДПМ характеризуються малими експлуатаційними витратами.

У **другому розділі** розглядаються методи наукових досліджень, наводиться послідовність етапів побудови математичної моделі.

Наукове дослідження – це цілеспрямоване пізнання, результати якого виступають у вигляді системи понять, законів і теорій. Характеризуючи наукове дослідження, зазвичай вказують на наступні його відмітні ознаки:

– це обов'язково цілеспрямований процес, досягнення усвідомлено поставленої мети, чітко сформульованих завдань;

– це процес, спрямований на пошук нового, на творчість, на відкриття невідомого, на висунення оригінальних ідей, на нове освітлення розглянутих питань;

– воно характеризується систематичністю: тут упорядковані, приведені у систему і сам процес дослідження, і його результати;

– йому властива строга доказовість, послідовне обґрунтування зроблених узагальнень і висновків.

Об'єктом науково-теоретичного дослідження виступає не просто окреме явище, конкретна ситуація, а цілий клас подібних явищ і ситуацій, їх сукупність.

У **третьому розділі** виконано опис роботи та технологічних особливостей обраного об'єкта дослідження – електропривода переміщення стрічкового конвеєра моделі ЛК-40-1.

Стрічкові конвеєри застосовуються для транспортування штучних, кускових і сипучих вантажів, в легкій промисловості для транспортування сировини, напівфабрикатів і готових виробів.

Вантажонесучим і тяговим органом стрічкового конвеєра є нескінченна гнучка стрічка, яка спирається на роликові опори і огинає на кінцях конвеєра приводний і натяжний барабани. За типом стрічки конвеєри бувають з прогумованою, сталевую і дротяної стрічкою. Найбільшого поширення набули конвеєри з прогумованою стрічкою.

Гнучка нескінченна стрічка огинає приводний барабан і натяжний барабани, а в прольоті між ними спирається на ряд роликових опор, які встановлені з певним інтервалом на рамі. Матеріал надходить на стрічку через завантажувальну воронку і розвантажується через приводний барабан.

Переваги стрічкових конвеєрів перед іншими способами транспортування в наявності:

– завдяки значній швидкості руху стрічки забезпечуються висока ефективність і продуктивність промислових процесів;

– подібний конвеєр споживає відносно мало енергії;

– надійна конструкція пристрою навіть при тривалому терміні експлуатації забезпечує якісне виконання завдань.

У **четвертому розділі** здійснюється побудова векторної системи керування електропривода стрічкового конвейера на базі синхронного двигуна з постійними магнітами з побудовою математичної моделі та графіків перехідних процесів, отриманих за допомогою цієї моделі.

В електроприводі переміщення стрічкового конвеєра моделі ЛК-40-1 використано векторно-керований частотний електропривід з синхронним електродвигуном з постійними магнітами. В результаті розрахунків побудовано математичну модель цього електроприводу в середовищі Matlab.

У **п'ятому розділі** здійснюється дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змінення активного опору статора.

Істотною відмінністю синхронної машини з постійними магнітами є відсутність обмоток на роторі, замість яких використовуються постійні магніти. Конструктивно СДПМ виконуються або неявнополюсними, в цьому випадку магнітна провідність по осях однакова, або явнополюсними, в цьому випадку індуктивність по поздовжній і поперечній осях різні.

Методи і алгоритми бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами принципово можна розділити на два види – активні, що використовують тестові впливи, і пасивні, що використовують тільки робочі гармоніки струмів і напруг.

В розділі розроблено адаптивний алгоритм обчислення координат стану для бездатчикового векторного керування неявнополюсною синхронною машиною з постійними магнітами. Пропонований алгоритм стійкий у всій площині механічних характеристик електроприводу і дозволяє обчислювати невимірювані координати ЕП, необхідні для побудови системи векторного керування СДПМ – напрямком вектора потокозчеплення від

постійних магнітів, частоту обертання ротора двигуна, а також активний опір статора. Алгоритм містить у своїй структурі спостерігач повного процесу електромагнітних процесів в машині.

Рекомендовані процедури вибору коефіцієнтів законів адаптації, отримані з аналізу квазівстановившихся режимів роботи.

Пропонується відмовитися від складних алгоритмів обчислення початкового положення струмів, а для фіксації положення ротора перед запуском формувати постійний вектор струму, спрямований по осі фази А двигуна.

У **шостому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по магістерському проекту.

У **сьомому розділі** наведено результати аналізу з охорони праці, а саме аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, заходи щодо забезпечення безпечних умов праці і дії при надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі виконується дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змін активного опору статора.

Енергоефективні системи частотно-регульованого електроприводу на базі синхронних двигунів з постійними магнітами неможливо реалізувати без вирішення тих чи інших завдань оптимізації. В магістерській роботі розроблено адаптивний алгоритм обчислення координат стану для бездатчикового векторного керування неявнополюсною синхронною машиною з постійними магнітами. Пропонований алгоритм стійкий у всій площині механічних характеристик електроприводу і дозволяє обчислювати невимірювані координати ЕП, необхідні для побудови системи векторного керування СДПМ – напрямок вектора потокозчеплення від постійних магнітів, частоту обертання ротора двигуна, а також активний опір статора. Алгоритм містить у своїй структурі спостерігач повного процесу електромагнітних процесів в машині.

Рекомендовані процедури вибору коефіцієнтів законів адаптації, отримані з аналізу квазівстановившихся режимів роботи.

Пропонується відмовитися від складних алгоритмів обчислення початкового положення струмів, а для фіксації положення ротора перед запуском формувати постійний вектор струму, спрямований по осі фази А двигуна.

Економічна ефективність запропонованих заходів підтверджується у розділі 6.

У розділі 7 докладно розглянуто питання з охорони праці та безпеки при надзвичайних ситуаціях.

АНОТАЦІЯ

Дудін М. О. Дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змінення активного опору статора.

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2020.

Магістерська робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи становить 140 сторінок, включаючи 39 рисунків та 20 таблиць. Список використаних джерел містить 42 найменування.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є дослідження системи бездатчикового керування синхронним двигуном з постійними магнітами з низькою чутливістю до змін активного опору статора.

Основні наукові та практичні результати магістерської роботи:

1. Для обраного в якості об'єкта дослідження стрічкового конвеєра ЛК-40-1 проведені дослідження та модернізація електроприводу переміщення на базі частотно керованого електроприводу.

2. Пропонується відмовитися від складних алгоритмів обчислення початкового положення струмів, а для фіксації положення ротора перед запуском формувати постійний вектор струму, спрямований по осі фази А двигуна.

3. Розроблено адаптивний алгоритм обчислення координат стану для бездатчикового векторного керування неявнополюсною синхронною машиною з постійними магнітами.

Ключові слова: СИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПОСТІЙНІ МАГНІТИ, НАПРУГА ЖИВЛЕННЯ, АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ, НИЗЬКА ЧУТЛИВІСТЬ

ANNOTATION

Dudin M. O. Investigation of the sensorless control system of a synchronous motor with permanent magnets with low sensitivity to changes in the active resistance of the stator.

Master's work on the specialty 141 – "Electricity, electronics and electrical engineering", Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

The master's thesis consists of an introduction, seven sections, conclusions, a list of used sources and two annexes. The total amount of master's work is 140 pages, including 39 figures and 20 tables. The list of literature contains 42 items.

The purpose of the master's qualification work is to study the sensorless control system of a synchronous motor with permanent magnets with low sensitivity to changes in stator resistance.

Main scientific and practical results of master's work:

1. For the selected as an object of research belt conveyor JIK-40-1 researches and modernization of the electric drive of movement on the basis of the frequency controlled electric drive are carried out.

2. It is proposed to abandon the complex algorithms for calculating the initial position of the currents, and to fix the position of the rotor before starting to form a constant current vector directed along the axis of phase A of the motor.

3. An adaptive algorithm for calculating state coordinates for sensorless vector control of an implicitly polar synchronous machine with permanent magnets has been developed.

Keywords: SYNCHRONOUS ENGINE, PERMANENT MAGNETS, POWER VOLTAGE, REPLACEMENT SCHEME, LOW SENSITIVITY

Дудін Микита Олегович

**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ БЕЗДАТЧИКОВОГО КЕРУВАННЯ
СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ З
НИЗЬКОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО ЗМІНЕННЯ АКТИВНОГО ОПОРУ
СТАТОРА**

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

Умов. друк. арк. – 0,58

Тираж 1 прим.

Замовлення №

ДДМА, 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72