

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Шенішевський Олег Олександрович

УДК 621.313.33

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ З ОПТИМАЛЬНИМ
ЧАСТОТНО-СТРУМОВИМ КЕРУВАННЯМ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2019

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, доцент
Шеремет Олексій Іванович,
Донбаська державна машинобудівна
академія, завідувач кафедри
«Електромеханічні системи
автоматизації».

Рецензент:

Захист відбудеться «___» грудня 2019 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.

У приводі з частотно-струмовим керуванням сигнал на вході формує момент на валу, а не кутову швидкість, як в приводі з частотним керуванням. Тому механічні характеристики приводу з частотно-струмовим керуванням є м'якими, а не жорсткими. Оскільки функціональна залежність моменту електродвигуна змінного струму від величини струму якоря є більш простою, ніж від величини напруги на якорі, вхідний сигнал формує струм якоря. У загальному випадку виходять з того, що струм якоря є векторною величиною, яка може бути представлена, наприклад, в прямокутній або полярній системі координат. При цьому для формування вектора струму якоря застосовують два вхідних сигнали. Якщо обрана прямокутна система координат, то вхідні сигнали розглядають як два вектори, спрямовані відповідно по двох ортогональних осях системи і є складовими вектора струму якоря.

Якщо обрана полярна система координат, то один з вхідних сигналів формує амплітуду, а інший – фазу вектора струму якоря.

Одну з осей прямокутної системи координат, наприклад вісь абсцис, направляють по поздовжній осі електродвигуна або по вектору потоку, або по якому-небудь іншій вектору, кутова швидкість обертання якого збігається з кутовою швидкістю обертання вектора струму якоря. Для цього в приводі застосовуються пристрої, що забезпечують визначення кутового положення або поздовжньої осі, або вектора потоку. Оскільки поздовжня вісь і вектор потоку електродвигуна обертаються в процесі роботи приводу, то і прямокутні осі, а отже, і вектори, що визначаються вхідними сигналами і є складовими вектора струму якоря, теж обертаються. Звідси випливає, що в приводах з частотно-струмовим керуванням частота струмів якоря електродвигуна не є незалежним параметром, а утворюється за допомогою

позитивного зворотного зв'язку за кутовою швидкістю обертання або поздовжньої осі, або вектора потоку електродвигуна, або іншого вектора.

Розробка систем оптимального керування електроприводами змінного струму є актуальною науково-технічною задачею, оскільки оптимальні системи керування дозволяють забезпечити економію електричної енергії та матеріальних ресурсів. Так, при ККД асинхронного двигуна 90% за рік в ньому виділяються втрати енергії вартістю до 60 – 80% самого АД.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Вибір напрямку досліджень здійснено у відповідності до Закону України від 11.07.2001 р. № 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та змінам до цього закону від 09.09.2010 р. № 2519-VI (2519-17), а також постанови Президії Національної Академії Наук України від 22.10.2010 р. № 294 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року».

Робота виконана в рамках держбюджетної теми кафедри «Електромеханічні системи автоматизації» ДДМА, «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації».

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованого електроприводу змінного струму з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

- здійснено огляд сучасних способів керування змінними в автоматизованому електроприводі;
- досліджено питання керованості, спостережуваності та чутливості асинхронних електроприводів;

- здійснено аналіз методів наукових досліджень;
- запропоновано ієрархічний підхід до вирішення задач оптимізації асинхронного електроприводу;
- здійснено аналітичне та чисельне розв’язання задачі оптимального частотно-струмового керування асинхронним електроприводом без урахування насичення магнітопроводу і втрат в сталі двигуна;
- здійснена постановка задачі оптимального частотно-струмового керування асинхронним електроприводом з урахуванням втрат в сталі двигуна.

Об'єктом дослідження є автоматизований електропривод змінного струму.

Предметом є системи з оптимальним частотно-струмовим керування електроприводами змінного струму.

Методи досліджень – методи математичного моделювання, чисельні методи обчислень, методи теорії автоматичного керування, методи оптимального керування електроприводами, методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. В результаті досліджень встановлено, що розімкнена система «силовий напівпровідниковий перетворювач – асинхронний двигун» по напругам фаз статора має перший порядок керованості, по струмам фаз статора і електромагнітного моменту – другий, по потокозчепленню ротора і кутовій швидкості ротора – третій, а за кутом повороту ротора – четвертий.

2. Отримано вирази фазних струмів короткозамкненого ротора, що не підлягають безпосередньому вимірюванню, що дозволить здійснювати ідентифікацію параметрів асинхронного електроприводу і реалізовувати

алгоритми частотного управління, включаючи векторне управління, без датчиків магнітного поля.

3. Запропоновано структури пристрою генерації функцій чутливості розімкненого асинхронного електроприводу, що дозволяють оцінити вплив відхилень параметрів на процеси і характеристики електроприводу.

Практичне значення отриманих результатів:

Виконані дослідження мають практичну цінність, оскільки оптимальне частотно-струмове керування електроприводами змінного струму забезпечує економію електричної енергії та матеріальних ресурсів.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці та дослідженні на математичних моделях автоматизованого електроприводу змінного струму з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Апробація результатів магістерської роботи. Результати досліджень обговорювались на щорічній науковій конференції студентів ДДМА, м. Краматорськ, 2019 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, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 114 сторінок (111 сторінок основної частини), 15 рисунків, 20 таблиць. Список використаних джерел містить 39 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** досліджуються властивості асинхронних електроприводів з позиції системного підходу.

Сучасні автоматизовані електроприводи (АЕП) в залежності від способів формування їх електромагнітних змінних можна розділити на чотири основні групи:

- розімкнені системи керування електроприводами (СКЕП) з фіксованим зв'язком між амплітудою і частотою напруги статора;
- замкнені СКЕП з контролем векторних змінних стану АД по модулю – це так звані «невекторні», скалярні системи;
- замкнені СКЕП з регулюванням векторних змінних по миттєвим значенням (по модулю і по фазі) – це АЕП з векторними принципами управління;
- замкнені СКЕП з прямим керуванням моментом.

Перевага розімкнутих СКЕП – це їх простота, висока надійність і низька вартість. Однак відсутність зворотних зв'язків обумовлює неможливість компенсації статичного зниження швидкості, що обмежує діапазон її регулювання до (5–20):1, а також виключає можливість формування необхідного характеру перехідних процесів. Більш того, прийнятні характеристики в статиці можуть забезпечуватися лише при окремих поєднаннях швидкостей обертання і моментів навантаження, що визначається використовуваною залежністю $U(f)$.

У більшості випадків необхідний діапазон при заданій якості регулювання швидкості не може досягатися при використанні розімкнених СКЕП, що обумовлює введення відповідних зворотних зв'язків. Найбільш простий і недорогий є СКЕП з регулюванням модуля вектора струму статора

і абсолютного ковзання, побудована на принципах підпорядкованого регулювання (частотно-струмова система). Подібні неекторні системи забезпечують досить хороші статичні параметри і прийнятні динамічні показники, здатні задовольнити вимогам широкого класу загальнопромислових механізмів, де не потрібна підвищена якість перехідних процесів при відпрацюванні як сигналів завдання, так і збурень, а важлива лише підтримка координат на заданому рівні в статиці.

У другому розділі проводиться аналіз методів наукових досліджень.

Спостереження – це цілеспрямоване пасивне вивчення предметів, що спи-рається в основному на дані органів почуттів. В ході спостереження ми отримуємо знання не тільки про зовнішні сторони об'єкта пізнання, а й – в якості кінцевої мети – про його істотні властивості і відносини.

Спостереження може бути безпосереднім і опосередкованим різними приладами та іншими технічними пристроями. У міру розвитку науки воно стає все більш складним і опосередкованим. Основні вимоги до наукового спостереження:

- однозначність задуму (що саме спостерігається);
- можливість контролю шляхом або повторного спостереження, або за допомогою інших методів (наприклад, експерименту).

Важливим моментом спостереження є інтерпретація його результатів – розшифровка показань приладів і т. п.

Експеримент – це активне і цілеспрямоване втручання у перебіг досліджуваного процесу, відповідне змінення досліджуваного об'єкта або його відтворення в спеціально створених і контрольованих умовах, що визначаються цілями експерименту. В його ході досліджуваний об'єкт ізолюється від впливу побічних факторів, що «затемнюють» сутність обставин і представляється в «чистому вигляді».

Основні особливості експерименту:

- більш активне (чим при спостереженні) ставлення до об'єкта дослідження, аж до його зміни і перетворення;

- можливість контролю за поведінкою об'єкта і перевірки результатів;

- багаторазова відтворюваність досліджуваного об'єкта за бажанням дослідника;

- можливість виявлення таких властивостей явищ, що не спостерігаються в природних умовах.

Види (типи) експериментів вельми різноманітні. Так, за своїми функціями виділяють дослідницькі (пошукові), перевірочні (контрольні), відтворюючі експерименти. За характером об'єктів розрізняють фізичні, хімічні, біологічні, соціальні і т. п. Існують експерименти якісні і кількісні. Широке поширення в сучасній науці отримав уявний експеримент – система розумових процедур, що проводяться над ідеалізованими об'єктами.

Порівняння – пізнавальна операція, що виявляє подібність або відмінність об'єктів (або ступенів розвитку одного і того ж об'єкта), тобто їх тотожність і відмінності. Воно має сенс тільки в сукупності однорідних предметів, що утворюють клас. Порівняння предметів в класі здійснюється за ознаками, істотним для даного розгляду. При цьому предмети, порівнювані за однією ознакою, можуть бути непорівнювані по іншій.

У **третьому розділі** досліджується оптимальне частотно-струмове керування асинхронним електроприводом.

Формування оптимальних фазних струмів в асинхронному електроприводі забезпечує економію електроенергії і підвищує надійність роботи електроприводу. При формуванні оптимальних струмів відповідно до необхідного моменту асинхронний електропривод можна розглядати як моментний.

Основним з припущень при формулюванні задачі оптимізації є припущення про відсутність насичення магнітної системи і втрат в сталі. Припустимо, що механічні процеси протікають більш повільно, ніж

електромагнітні, тобто уловимось, що має місце квазістаціонарний режим протікання струмів.

Рівняння балансу напруг узагальненої машини на основі АД для квазістаціонарного режиму матимуть вигляд:

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{1d} - \omega_1 (L_1 i_{1q} + M_m i_{2q}); \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + \omega_1 (L_1 i_{1d} + M_m i_{2d}); \\ 0 = R_2 i_{2d} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \\ 0 = R_2 i_{2q} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}). \end{cases} \quad (1)$$

Припустимо, що напруги фаз обмотки статора не перевищують допустимих значень. Отже, не враховуючи при оптимізації рівняння балансу напруг фаз обмотки статора системи (3.1), отримаємо:

$$\begin{cases} 0 = R_2 i_{2d} - \omega_2 (L_2 i_{2q} + M_m i_{1q}); \\ 0 = R_2 i_{2q} + \omega_2 (L_2 i_{2d} + M_m i_{1d}). \end{cases} \quad (2)$$

Електромагнітний момент, дорівнює необхідному значенню

$$M_e = p_{\Pi} M_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) = M_e^o. \quad (3)$$

Задача оптимізації вирішується при фіксованих значеннях кутової швидкості ротора ω . Кутова швидкість системи координат d, q розраховується обчислювальним пристроєм за формулою:

$$\omega_1 = \omega + \omega_2. \quad (4)$$

Потрібно визначити струми $i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q}$, які створюють необхідний електромагнітний момент M_e^o , і ω_2 при мінімальних втратах в обмотках.

Отже, може бути сформульована наступна задача оптимізації: при заданих ω і M_e^o потрібно знайти чотири струми – $i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q}$, кутові швидкості ω_2 і ω_1 з умови мінімуму потужності втрат в обмотках. Для вирішення задачі оптимізації маємо два рівняння системи (2), а також рівняння (3), (4).

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

У **п'ятому 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

Встановлено, що для аналізу керованості асинхронного двигуна доцільно використовувати математичний опис узагальненої електричної машини при традиційних для систем векторного керування перетвореннях.

Встановлено, що асинхронний двигун і силовий напівпровідниковий перетворювач мають властивість повної керованості. Отже, виконаний на їх основі розімкнений електропривод буде мати властивість повної керованості.

Пропонується використовувати термін «порядок керованості», який при східчастих сигналах управління і нульових початкових умовах збігається з молодшим ступенем розкладання законів зміни фазових координат електропривода в ряд Маклорена.

Показано, що розімкнена система «силовий напівпровідниковий перетворювач – асинхронний двигун» по напругам фаз статора має перший порядок керованості, по струмам фаз статора і електромагнітного моменту – другий, по потокозчепленню ротора і кутовій швидкості ротора – третій, а за кутом повороту ротора – четвертий.

За допомогою математичного опису узагальненої електричної машини проведено дослідження спостережуваності струмів короткозамкненого ротора асинхронного двигуна. Отримано вирази фазних струмів короткозамкненого ротора, що не підлягають безпосередньому вимірюванню. В якості змінних в цих виразах фігурують напруги фаз статора, струми фаз статора і їх похідні.

Можливість спостерігати струми короткозамкненого ротора дозволить здійснювати ідентифікацію параметрів асинхронного електроприводу і реалізовувати алгоритми частотного управління, включаючи векторне управління, без датчиків магнітного поля.

АНОТАЦІЯ

Шенішевський О.О. Розробка та дослідження автоматизованого електроприводу змінного струму з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2019.

Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи складається із 114 сторінок (111 сторінок основної частини), 15 рисунків, 20 таблиць. Список використаних джерел містить 39 найменувань.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованого електроприводу змінного струму з оптимальним частотно-струмовим керуванням.

Основні наукові результати магістерської роботи:

1. В результаті досліджень встановлено, що розімкнена система «силовий напівпровідниковий перетворювач – асинхронний двигун» по напругам фаз статора має перший порядок керованості, по струмам фаз статора і електромагнітного моменту – другий, по потокозчепленню ротора і кутовій швидкості ротора – третій, а за кутом повороту ротора – четвертий.

2. Отримано вирази фазних струмів короткозамкненого ротора, що не підлягають безпосередньому вимірюванню, що дозволить здійснювати ідентифікацію параметрів асинхронного електроприводу і реалізовувати алгоритми частотного управління, включаючи векторне управління, без датчиків магнітного поля.

3. Запропоновано структури пристрою генерації функцій чутливості розімкненого асинхронного електроприводу, що дозволяють оцінити вплив відхилень параметрів на процеси і характеристики електроприводу.

Ключові слова: ВЕКТОРНЕ УПРАВЛІННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ, ЧУТЛИВІСТЬ, СПОСТЕРЕЖУВАНІСТЬ

ANNOTATION

Shenishevsky O.O. Development and research of an automated AC drive with optimal frequency-current control.

Master's work in specialty 141 – "Power engineering, electrical engineering and electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2019.

The master's thesis consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of sources used. The total volume of the master's work consists of 114 pages (111 pages of the main part), 15 figures, 20 tables. The list of sources used contains 39 items.

The purpose of this work is to develop and research an automated AC drive with optimal frequency and current control.

The main scientific results of the master's work:

1. As a result of researches it is established that the open system "power semiconductor converter - asynchronous motor" on voltage of stator phases has the first order of control, on currents of phases of stator and electromagnetic moment - second, on flux coupling of rotor and angular speed of rotor - third rotation of the rotor - the fourth.

2. The expressions of phase currents of the short-circuited rotor, which are not directly measurable, are obtained, which will allow to identify the parameters of the asynchronous actuator and to implement algorithms of frequency control, including vector control, without magnetic field sensors.

3. Structures of the device of generation of sensitivity functions of the open asynchronous electric drive are offered, which allow to estimate the influence of deviations of parameters on the processes and characteristics of the electric drive.

Keywords: VECTOR CONTROL, AC DRIVE, SENSITIVITY, OBSERVABILITY

Шенішевський Олег Олександрович

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ З ОПТИМАЛЬНИМ
ЧАСТОТНО-СТРУМОВИМ КЕРУВАННЯМ**

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