

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Щабельська Валерія Анатоліївна

УДК 681.5.09: 62-5

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ НА БАЗІ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

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,
Івченко 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

Є кілька напрямків для досягнення енергоефективності експлуатації електроприводів з асинхронними двигунами:

– початковий ретельний розрахунок по нагріванню і потужності необхідного електродвигуна (ЕД) з метою досягнення оптимального коефіцієнта завантаження;

– модернізація конструкції і збільшення частки активних матеріалів ЕД, а також застосування ефективних матеріалів і сплавів з високою магнітною і електричною провідністю;

– перехід до частотно регульованого асинхронного електроприводу на базі перетворювачів частоти з автономним інвертором напруги (АІН) або автономним інвертором струму (АІС);

– розробка енергозберігаючих алгоритмів керування частотним перетворювачем асинхронного електроприводу, заснованих на досягненні оптимальних значень контрольованих параметрів, що забезпечують високі показники енергоефективності;

– вдосконалення перетворювачів частоти і алгоритмів керування ключами інверторів для виключення високочастотних гармонік напруги.

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 ДР№.0117U007402 «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації» згідно з напрямком наукової роботи кафедри.

Актуальність теми дослідження визначається високою потребою на сьогоднішній день в енергоефективних системах керування (СК) загальнопромисловими і тяговими електроприводами з асинхронними

двигунами (АД), які мають високу швидкодію і знижену чутливість до збурень і зміни параметрів системи в експлуатації. Однією з важливих конкурентних особливостей для сучасної СК є також її придатність до широкого спектру електроприводів різної потужності.

Метою роботи є дослідження методів підвищення енергоефективності електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна та розробка методології синтезу та аналізу енергозберігаючих асинхронних електроприводів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

- розгляд технічних особливостей та класифікація асинхронних короткозамкнених двигунів;
- вибір системи керування асинхронного двигуна для електромеханічної системи електроприводу переміщення козлового крана;
- дослідження електромеханічної системи переміщення козлового крана на основі математичної моделі;
- дослідження електромеханічної системи переміщення козлового крана на основі математичної моделі;
- дослідження енергоефективного електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна;
- аналіз економічних переваг і актуальності прийнятих рішень.

Об'єктом дослідження є електропривод переміщення козлового крана.

Предметом дослідження є підвищення енергоефективності електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна.

Методи досліджень. В роботі використано загальні положення та методи теорії керування, теорії електроприводу, лінійної алгебри, числові

методи розв'язання диференціальних рівнянь для розрахунку параметрів систем автоматичного керування електроприводами, методи математичного моделювання; методи забезпечення оптимальних параметрів двигуна по мінімуму сумарних втрат.

Наукова новизна роботи:

1. Побудовано та проаналізовано частотний електропривод на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
2. Проведено дослідження методів підвищення енергоефективності електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна.
3. Проведено оптимізацію електроприводу на базі асинхронного для підвищення його енергоефективності.

Практична цінність роботи.

1. Розроблено електропривод зі скалярним керуванням, в якому в сталому режимі співвідношення “струм статора/момент” двигуна знижено в середньому на 5% за рахунок використання коректуючих засобів, які включає до себе спостерігач взаємного положення струму статора та основного потокозчеплення.
2. Розроблено та проаналізовано структурні математичні моделі асинхронного двигуна з можливістю корекції його динамічних властивостей та підвищення стійкості.

Наукова апробація роботи. Результати досліджень доповідались та 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).

Особистий внесок здобувача полягає у розробці методів підвищення енергоефективності електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна.

Структура і обсяг магістерської роботи.

Магістерська робота складається із вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг магістерської роботи становить 138 сторінок, включаючи 26 рисунків та 22 таблиці. Список використаних джерел містить 43 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 енергоефективного асинхронного електропривода.

Аналіз використання електроприводів, виконаних за схемою «напівпровідниковий перетворювач частоти – асинхронний двигун», показує, що як в традиційно використовуваних, так і у розроблених нових електроприводах існують поки ще недовикористані резерви підвищення енергетичної ефективності електромеханічного перетворення енергії. Найбільш повно можливості підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії можна забезпечити шляхом оптимізації режимів роботи асинхронних двигунів (АД) при регулюванні потоку як в функції швидкості, так і в функції електромагнітного моменту (проте при цьому слід зберігати електромеханічні статичні і динамічні характеристики електроприводу, необхідні для рішення основної технологічної задачі).

Є кілька напрямків для досягнення енергоефективності експлуатації електроприводів з асинхронними двигунами:

– початковий ретельний розрахунок по нагріванню і потужності необхідного електродвигуна (ЕД) з метою досягнення оптимального коефіцієнта завантаження;

– модернізація конструкції і збільшення частки активних матеріалів ЕД, а також застосування ефективних матеріалів і сплавів з високою магнітною і електричною провідністю;

– перехід до частотно регульованого асинхронного електроприводу на базі перетворювачів частоти з автономним інвертором напруги (АІН) або автономним інвертором струму (АІС);

– розробка енергозберігаючих алгоритмів керування частотним перетворювачем асинхронного електроприводу, заснованих на досягненні оптимальних значень контрольованих параметрів, що забезпечують високі показники енергоефективності;

– вдосконалення перетворювачів частоти і алгоритмів керування ключами інверторів для виключення високочастотних гармонік напруги.

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

Залежно від рівня пізнання виділяють методи емпіричного, теоретичного і метатеоретичного рівней. До методів емпіричного рівня відносять спостереження, опис, порівняння, рахунок, вимір і т.д.

До методів теоретичного рівня зараховують аксіоматичний, гіпотетичний (гіпотетико-дедуктивний), формалізацію, абстрагування, логічні методи (аналіз, синтез, індукцію, дедукцію, аналогію) та ін.

Методами метатеоретичного рівня є діалектичний, метафізичний, герменевтичний та ін. Деякі вчені до цього рівня відносять метод системного аналізу, а інші його зараховують до загальнологічних методів.

Залежно від сфери застосування і ступеня спільності розрізняють методи – загальні (філософські), що діють у всіх науках і на всіх етапах пізнання, загальнонаукові, які можуть застосовуватися в гуманітарних, природничих і технічних науках, приватні (для родинних наук), спеціальні (для конкретної науки, галузі наукового пізнання).

Від даного поняття методу слід відмежовувати поняття техніки, процедури і методики наукового дослідження.

У **третьому розділі** виконано опис роботи та технологічних особливостей обраного об'єкта дослідження – електропривода переміщення козлового крана.

Козловий кран – це вантажопідйомна машина, призначена для виконання вантажно-розвантажувальних робіт, використовувана на

відкритих майданчиках промислових підприємств, вантажних дворів, полігонів по виробництву залізобетонних виробів і контейнерних майданчиках залізничних станцій.

В основному козлові крани використовуються для переміщення довгомірних і великогабаритних штучних вантажів на промислових складах великої площі, відкритих будівельних майданчиках. Також крани козлової конструкції затребувані в ангарах і робочих цехах підприємств, які здійснюють випуск залізобетонних виробів, вантажних дворів. Крім цього, козлові крани знаходять широке застосування при виконанні різних вантажно-розвантажувальних і підйомно-монтажних робіт на контейнерних майданчиках залізничних вузлів.

У козлових кранах, так само, як і в мостових, реалізуються три самостійні операції:

- підйом-опускання вантажу на необхідну висоту;
- переміщення вантажу по мосту крана поперек обслуговується майданчики;
- переміщення вантажу краном уздовж обслуговується майданчики.

У **четвертому розділі** здійснюється побудова системи керування електропривода пересування козлового крана на базі асинхронного електропривода зі скалярним з побудовою математичної моделі та графіків перехідних процесів, отриманих за допомогою цієї моделі.

Застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу в кранових механізмах є ефективним методом підвищення технологічності виробництва. Використання таких приводів дозволяє:

- значно (до 40%) знизити енергоспоживання механізмів крану, що є особливо актуальним при постійно зростаючих тарифах на енергоносії;
- здійснити розгін та гальмування двигуна плавно, за бажаним закону від часу, при варіюванні часом розгону та гальмування від часток секунди до десятків хвилин;

- підвищити довговічність механічного обладнання завдяки плавності перехідних процесів;

- захистити двигун від перевантажень по струму, перегріву, витоків на землю та від обривів в ланцюгах живлення двигунів;

- знизити експлуатаційні витрати на капітальний ремонт обладнання за рахунок значного зниження динамічних навантажень в елементах кінематичних ланцюгів;

- змінювати швидкість та прискорення руху механізмів крана стосовно до конкретних технологічних задач.

У п'ятому розділі проведені дослідження режимів роботи асинхронного електропривода переміщення козлового крана з метою їх оптимізації по енергетичним критеріям, показана можливість керування магнітним станом машини і отримані аналітичні залежності координат двигуна при керуванні по мінімуму сумарних втрат.

При аналітичних дослідженнях динамічних властивостей асинхронного двигуна, спрямованих на вирішення завдань визначення динамічних показників, синтезу регуляторів систем керування зручно користуватися математичною моделлю асинхронного двигуна, представленою у вигляді структурної схеми. Структурна схема будується на підставі системи рівнянь, представлених в операторній формі. Для аналітичних досліджень доцільно розглядати рівняння АД в системі координат (x-y), що обертається зі швидкістю електромагнітного поля статора, що дає можливість перейти від гармонійних змінних до їх амплітудних значень.

Енергоефективність систем частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням може бути підвищена за рахунок зниження відношення «струм статора / момент», що досягається за допомогою такої взаємної орієнтації векторів струму статора і потокозчеплення ротора, при якій кут між цими векторами буде 45° .

В системі скалярного керування частотним асинхронним електроприводом оптимальна взаємна орієнтація векторів струму статора і потокозчеплення ротора з кутом між цими векторами на рівні 45° , може бути досягнута в сталому режимі шляхом корекції сигналу завдання на величину напруги.

Стійкість асинхронного електроприводу може бути підвищена в результаті введення в систему керування коригувальних пристроїв, дія яких спрямована на компенсацію коливань, викликаних впливом внутрішніх перехресних зв'язків між змінними асинхронного двигуна.

При куті між векторами \dot{I}_1 та $\dot{\Psi}_2$, що становить $\varphi'_{0i\dot{\delta}} = 45^\circ$ може бути досягнутий мінімум відношення «струм статора / момент двигуна», а при куті $\varphi'_{0i\dot{\delta}} \approx 39...40^\circ$ – мінімум втрат в обмотках АД.

Введення в системи скалярного керування частотним асинхронним електроприводом коригувальних пристроїв, що регулюють сигнал завдання на частоту і амплітуду живить двигун напруги з реалізацією негативного зворотного зв'язку по розраховуваним значенням моменту двигуна, дозволяє поліпшити динамічні властивості електропривода з досягненням придушення коливань моменту 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

Магістерська робота є науково-дослідною роботою по вирішенню важливої та актуальної науково-технічної задачі дослідження енергоефективного електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна зі скалярним керуванням.

Енергоефективність систем частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням може бути підвищена за рахунок зниження відношення «струм статора / момент», що досягається за допомогою такої взаємної орієнтації векторів струму статора і потокозчеплення ротора, при якій кут між цими векторами буде 45° .

При куті між векторами \dot{I}_1 та $\dot{\Psi}_2$, що становить $\varphi'_{\text{опт}} = 45^\circ$ може бути досягнутий мінімум відношення «струм статора / момент двигуна», а при куті $\varphi'_{\text{втрати}} \approx 39...40^\circ$ – мінімум втрат в обмотках АД.

Магістерська робота є актуальною науково-дослідною роботою, в результаті якої вирішено наступні задачі:

- розглянуто технічні особливості та принципи роботи електропривода переміщення козлового крана;
- виконано розрахунок техніко-експлуатаційних параметрів електроприводу переміщення;
- виконано вибір системи керування, асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором;
- виконано дослідження електромеханічної системи по мінімуму відношення «струм статора / момент двигуна» та по мінімуму втрат в обмотках двигуна;
- проаналізовано економічні переваги та актуальність прийнятих рішень.

Економічна ефективність запропонованих заходів підтверджується у розділі 6, а питання з охорони праці і безпеки при надзвичайних ситуаціях докладно розглянуті у розділі 7.

АНОТАЦІЯ

Щабельська В.А. Дослідження методів підвищення енергоефективності електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна.

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 138 сторінок, включаючи 26 рисунків та 22 таблиці. Список використаних джерел містить 43 найменування.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є дослідження методів підвищення енергоефективності електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна.

1. Для обраного в якості об'єкта дослідження – електропривода переміщення козлового крана – проведено дослідження його енергоефективності.

2. Доказано, що енергоефективність систем частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням може бути підвищена за рахунок зниження відношення «струм статора / момент», що досягається за допомогою такої взаємної орієнтації векторів струму статора і потокозчеплення ротора, при якій кут між цими векторами буде 45° .

3. Стійкість асинхронного електроприводу може бути підвищена в результаті введення в систему керування коригувальних пристроїв, дія яких спрямована на компенсацію коливань, викликаних впливом внутрішніх перехресних зв'язків між змінними асинхронного двигуна.

4. При куті між векторами \dot{I}_1 та $\dot{\Psi}_2$, що становить $\varphi'_{0110} \approx 39...40^\circ$, досягається мінімум втрат в обмотках АД.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СТАТОР, РОТОР, СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ANNOTATION

Shchabelska V.A. Research of methods of increase of energy efficiency of the electric drive of alternating current on the basis of the asynchronous motor.

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

The master's work consists of an introduction, seven sections, conclusions and a list of used sources. The total amount of master's work is 138 pages, including 26 figures and 22 tables. The list of literature contains 43 items.

The purpose of the master's qualification work is to study methods for improving the energy efficiency of an AC electric drive based on an induction motor. The main scientific and practical results of the master's thesis:

1. For the chosen as object of research – the electric drive of movement of the gantry crane – research of its energy efficiency is carried out.

2. It is proved that the energy efficiency of frequency asynchronous electric drive with scalar control can be increased by reducing the ratio of "stator current / torque", which is achieved by such mutual orientation of stator current vectors and rotor flux coupling, at which the angle between these vectors is 45° .

3. The stability of the induction drive can be increased as a result of the introduction into the control system of corrective devices, the action of which is aimed at compensating for oscillations caused by the influence of internal cross-links between the variables of the induction motor.

4. At the angle $\varphi'_{0ir0} \approx 39...40^\circ$ between the vectors \dot{I}_1 and $\dot{\Psi}_2$, a minimum of losses in the windings of the motor is achieved.

Keywords: ASYNCHRONOUS MOTOR, STATOR, ROTOR, SUBSTITUTION SCHEME, ENERGY EFFICIENCY

Щабельська Валерія Анатоліївна

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ НА БАЗІ
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

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