

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Редін Євгеній Володимирович

УДК 62-83+681.521.7

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
БЕЗРЕДУКТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛЕБІДКИ
ВАНТАЖОПАСАЖИРСЬКОГО ЛІФТУ**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2020

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

Науковий керівник:

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

Рецензент:

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 10:00 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

Ліфтові лебідки, як засоби внутрішнього транспорту, застосовуються на пасажирських, лікарняних і вантажних ліфтах. Розвиток житлового фонду і зростаючий парк підйомних механізмів вимагає вдосконалення засобів внутрішнього транспорту будівель на основі сучасних науково-технічних досягнень.

Для механізмів підйому ліфтової лебідки існує проблема створення надійних, безпечних і простих в обслуговуванні електроприводів, які відповідають всім технічним вимогам і забезпечують обмеження динамічних навантажень в електромеханічних системах ліфтових лебідок.

В даний час більшість електроприводів ліфтових лебідок є конструкцією, що складається з двошвидкісного асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором, редуктора, гальмівного пристрою і релейно-контакторної схеми управління. Основною причиною виходу з ладу електродвигунів в електроприводі підйому ліфтової лебідки є низька надійність релейно-контакторної схеми управління, яка веде до її розладу і збільшення кидків струмів при пуску асинхронного двигуна. Для механічного обладнання головною небезпекою становлять високі динамічні моменти в електромеханічній системі, що виникають внаслідок недосконалості системи управління.

Розвиток силової і мікропроцесорної техніки сприяв переходу до безредукторного електроприводу, виконаного за системою перетворювач частоти-асинхронний двигун, позбавленого недоліків, наявних у редукторних електроприводах. Основними перевагами безредукторного електроприводу в порівнянні з редукторним є: відсутність редуктора, більш висока комфортність ліфта, менший рівень шуму і вібрацій.

Одним з напрямків розвитку безредукторних частотно-регульованих електроприводів, зокрема ліфтових лебідок, є застосування в електроприводі ліфта тихохідного асинхронного двигуна. Електропривод на його основі якісно відрізняється від електроприводів, що застосовуються в даний час, і істотно визначається особливостями роботи тихохідного асинхронного двигуна в перехідних процесах і обраної структури системи управління.

В даний час теоретичні і практичні питання розробки та дослідження системи управління асинхронним безредукторним електроприводом ліфтової лебідки, виконаної за системою перетворювач частоти-тихохідний асинхронний двигун, є актуальною та своєчасною задачею.

Зв'язок роботи з планами і темами кафедри. Робота була виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0117U007402 «Розробка та дослідження електричних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії»

з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації» згідно з напрямком наукової роботи кафедри.

Актуальність. Розробка та дослідження сучасних систем керування безредукторними електроприводами вантажопасажирських ліфтів є **актуальною** науково-технічною задачею, оскільки більшість вітчизняних систем керування ліфтовими лебідками є доволі застарілими та не відповідають вимогам, які до них пред'являються.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження системи керування безредукторним електроприводом лебідки вантажопасажирського ліфту.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні **задачі**:

- здійснити огляд сучасних способів керування змінними в автоматизованому електроприводі;
- виконати критичний аналіз сучасного стану та напрямків розвитку електроприводів ліфтових лебідок;
- висунути технічні вимоги до безредукторного електроприводу ліфтової лебідки;
- скласти функціональну схему безредукторного електропривода ліфтової лебідки;
- здійснити математичне опис тихохідного асинхронного двигуна;
- виконати аналіз тихохідного асинхронного двигуна у нерухомій системі координат;
- проаналізувати особливості математичного опису механічної частини та моделювання приводу безредукторної ліфтової лебідки;
- розробити систему управління безредукторним електроприводом;
- синтезувати структури і визначення параметрів для налаштування регуляторів у контурах струму, потокозчеплення ротора, швидкості та положення;
- здійснити аналіз відпрацювання збурювальних дій у синтезованій системі керування;
- розробити спосіб адаптивного формування потокозчеплення тихохідного асинхронного двигуна безредукторної ліфтової лебідки.

Об'єкт дослідження – система керування безредукторним електроприводом лебідки вантажопасажирського ліфту.

Предмет дослідження – динамічні процеси, що спостерігаються у автоматизованій електромеханічній системі безредукторної ліфтової лебідки з урахуванням багатомасовості механічної частини та змінності наведених моментів інерції і пружності канатів.

Методи досліджень. В роботі використано загальні положення та методи теорії керування, теорії електроприводу, лінійної алгебри, числові методи розв'язання диференціальних рівнянь для розрахунків параметрів систем автоматичного керування електроприводами, перевірка ефективності отриманих теоретичних результатів здійснювалася засобами чисельного моделювання в програмному середовищі MATLAB з використанням сучасних засобів автоматизації математичних і інженерних розрахунків.

Наукова новизна роботи:

1. Розроблено математичний апарат для опису тихохідного асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, який дозволяє розглянути процеси з найбільшим наближенням до реального тихохідного асинхронного двигуна, що зручно для дослідження статичних і динамічних режимів роботи. Врахування насичення магнітного кола здійснюється за допомогою перерахунку допоміжних коефіцієнтів, введених в рівняння статорних і роторних кіл тихохідного асинхронного двигуна.

2. Для дослідження динаміки механічної частини електроприводу безредукторної ліфтової лебідки запропонована багатомасова розрахункова схема, що враховує мінливі наведені моменти інерції і пружності канатів.

3. Встановлено, що власні коливання кабіни і противаги в процесі роботи безредукторної ліфтової лебідки знаходяться в області небезпечних частот (4-8 Гц), що впливають на здоров'я людини. Запропоновано ефективний спосіб зменшення цих коливань – формування завдання на швидкість за допомогою S-подібного задатчика інтенсивності.

4. Розроблено методику синтезу структури та оптимізації контурів системи управління асинхронним безредукторним електроприводом ліфтової лебідки. Встановлено, що показники якості кожного контуру регулювання відповідають його очікуваним значенням.

5. Запропоновано закон адаптивного формування потокозчеплення тихохідного асинхронного двигуна ліфтової лебідки в функції від поточного моменту навантаження, який дозволяє змінювати жорсткість механічної характеристики двигуна і забезпечити плавність переміщення кабіни.

Практична цінність роботи полягає в розробці комп'ютерної програми в середовищі MATLAB, необхідної для дослідження динамічних процесів, що відбуваються в багатомасовій електромеханічній системі безредукторної ліфтової лебідки.

Наукова апробація роботи. Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових конференціях регіонального та міжнародного рівня: IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (16-18 квітня 2020 року), XLII Науково-технічна конференція науково-педагогічних

працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів і студентів (23-27 листопада 2020 року).

Публікація результатів наукових досліджень. Матеріали магістерської роботи опубліковано у двох тезах доповідей регіональних та міжнародних науково-технічних конференцій і одній науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

Особистий вклад здобувача. Усі основні результати магістерської роботи, що виносяться на захист, здобувач отримав особисто. Зокрема, здійснено огляд сучасних способів керування змінними в автоматизованому електроприводі, виконано критичний аналіз сучасного стану та напрямків розвитку електроприводів ліфтових лебідок, висунуто технічні вимоги до безредукторного електроприводу ліфтової лебідки, складено функціональну схему безредукторного електропривода ліфтової лебідки, здійснено математичний опис тихохідного асинхронного двигуна, виконано аналіз тихохідного асинхронного двигуна у нерухомій системі координат, проаналізовано особливості математичного опису механічної частини, розроблено систему управління безредукторним електроприводом, синтезовано структуру і визначено параметри для налаштування регуляторів у контурах струму, потокозчеплення ротора, швидкості та положення, здійснено аналіз відпрацювання збурювальних дій у синтезованій системі управління.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 124 сторінки, в тому числі 25 таблиць по тексту, 34 рисунків по тексту, перелік використаних джерел із 60 найменувань на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** здійснено аналітичний огляд існуючих електроприводів ліфтових лебідок.

Робота електрообладнання та електроприводу підйомних машин відрізняється рядом специфічних особливостей. До них відносяться: повторно-короткочасний режим роботи, часті зміни напрямку обертання (реверс), необхідність регулювання частоти обертання електроприводу, вібрації, затруднений доступ для обслуговування і ремонту. Тому електрообладнання та електропривод повинні мати підвищену безпеку і надійність.

Завдяки істотним досягненням у розвитку силової і мікропроцесорної техніки і систем частотно-регульованого електроприводу змінного струму, змінюються вимоги, що пред'являються до підйомно-транспортних приводів:

- робота в усіх чотирьох квадрантах площини механічних характеристик;

- висока швидкість в процесах відпрацювання збурень, що дозволяють «підхоплювати» вантаж при його розгальмовуванні без значної інтегральної помилки (за положенням);

- наявність S-образного задатчика інтенсивності;

- управління гальмом і можливість гнучкого інтегрування електроприводу в систему управління ліфтом;

- необхідний набір захистів.

На сьогоднішній день в Україні заміни вимагає близько 50% існуючого ліфтового парку. Виконаємо критичний аналіз сучасного стану та напрямків розвитку електроприводів ліфтових лебідок з точки зору працездатності, динамічних властивостей і якісних показників, сумісності з механічними пристроями, уточнюючи вимоги, що пред'являються до розроблюваних електроприводів і систем управління ними.

У порівнянні з традиційними редукторними системами, безредукторний електропривод має низку переваг:

- безредукторна лебідка з синхронним електродвигуном вимагає менше за розмірами машинне приміщення, або його відсутність;
- відмова від редуктора дозволяє на 50% знизити втрати на тертя, підвищуючи в цілому коефіцієнт корисної дії і знижуючи тепловиділення, що дозволяє економити до 20% споживаної електроенергії;
- безредукторні лебідки не потребують мастила, що виключає забруднення машинного приміщення і шахти мастилами;
- відмова від редуктора значно знижує рівень шуму і вібрацій;
- система частотного регулювання приводу лебідки робить процес прискорення і гальмування ідеально плавним.

У **другому розділі** виконується математичний опис тихохідного асинхронного двигуна і механічної частини безредукторної ліфтової лебідки.

Математичний опис тихохідного асинхронного двигуна (ТАД) має відображати особливості експлуатаційних режимів роботи ліфтової лебідки.

При складанні рівнянь електричної рівноваги в обмотках ТАД приймаються загальноприйняті допущення з теорії електричних машин змінного струму:

- параметри обмоток всіх фаз мають однакові значення, тобто має місце симетричний режим роботи;
- магнітне поле електричної машини має синусоїдальний розподіл уздовж повітряного зазору;
- не враховуються втрати в сталі, що викликаються протіканням вихрових струмів в магнітопроводі двигуна і його перемагнічуванням.

В системі перетворювач частоти-тихохідний асинхронний двигун, на ТАД подається напруга живлення зниженої частоти (4 Гц). Статор тихохідного асинхронного двигуна має більше число витків, в порівнянні зі стандартним двигуном. Фазна напруга, що подається на ТАД перетворювачем частоти, може бути високою навіть при невеликій частоті напруги живлення. У цих умовах значно проявляється насичення магнітного

кола по шляху проходження основного магнітного потоку в тихохідному асинхронному двигуні.

Використання системи відносних одиниць для моделювання режимів роботи електричних машин спрощує їх дослідження. Запис рівнянь у відносних одиницях дозволяє робити обчислення з безрозмірними величинами, діапазон значень яких набагато менше, ніж діапазон абсолютних величин. Це підвищує точність рішення рівнянь моделі і знижує вимоги до обчислювальної техніки, використовуваної для моделювання.

У **третьому розділі** здійснено розробку та дослідження системи керування безредукторним електроприводом лебідки вантажопасажирського ліфту.

Виходячи з аналізу вимог, що пред'являються до електроприводу ліфтової лебідки, найбільш доцільним способом управління є векторне управління. В рамках синтезу структури керування електроприводом безредукторної ліфтової лебідки передбачається розробка модифікованої системи управління з урахуванням особливостей тихохідного асинхронного двигуна і режимів його роботи в складі безредукторної ліфтової лебідки.

Перший режим роботи електроприводу зі зниженням швидкості перед зупинкою – призначений для керування асинхронним безредукторним електроприводом з використанням старої станції управління. У цьому випадку зі станції управління на привод надходить сигнал тільки про рівень швидкості: номінальна швидкість руху і швидкість дотягування. Для забезпечення плавності розгону і гальмування застосовується ЗІ. Для виключення можливого виникнення резонансних коливань застосовується корекція керуючого сигналу при формуванні ШІМ і додатково встановлюється смуговий фільтр з кола зворотного зв'язку за швидкістю.

Другий режим роботи електроприводу – стежний – призначений для керування асинхронним безредукторним електроприводом з використанням сучасної станції керування. У цьому випадку за наявним інтерфейсом відбувається обмін інформацією між приводом і станцією управління. Станція управління видає завдання на контур управління станом

електроприводу. При такому варіанті організації системи управління діаграма руху ліфта якісно відрізняється від вищенаведеної: виключається ділянка роботи приводу на швидкості дотягування, що позитивно позначається на точності зупинки і загальній продуктивності ліфта. Для забезпечення плавності розгону і гальмування застосовується за датчик інтенсивності (ЗІ).

Останній режим роботи електроприводу реалізується за допомогою наявного блоку «перемикач структури» – режим управління зі змінною структурою. В даному режимі початок руху здійснюється за завданням від контуру швидкості з використанням ЗІ.

Як тільки система управління отримує сигнал від датчика попереднього зупинки, система переходить на управління від контуру положення і плавно проводить зупинку. Даний режим роботи електроприводу виключає недоліки режиму роботи зі зниженням швидкості перед зупинкою і має переваги стежного режиму роботи по комфортабельності переміщення кабіни, точності зупинки і може бути реалізований при роботі зі старими станціями управління, які не мають інтерфейс для комунікації з електроприводом.

Більшість систем управління сучасних електроприводів реалізовано на мікропроцесорах і мікроконтролерах. Мікропроцесорні системи управління мають велику частоту дискретизації, що дозволяє їх розглядати як безперервні і використовувати методи теорії безперервних лінеаризованих систем.

Під час експериментальних випробувань електроприводу була виявлена наступна особливість тихохідного асинхронного двигуна. Велика індуктивність його обмотки статора і безперервне підтримання поточозчеплення на номінальному рівні сприяє формуванню жорсткої характеристики моменту, яка призводить до ривка моменту на валу двигуна і, як наслідок, до коливань кабіни і противаги, які зменшують комфортність пересування в кабіні і ресурс механічного устаткування. Для виключення подібного ефекту розроблений спосіб адаптивного формування

потокозчеплення тихохідного асинхронного двигуна в функції від поточного моменту навантаження.

Запропонований спосіб дозволяє сформувати більш м'яку характеристику за моментом, яка ривки моменту і коливання кабіни і противаги.

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

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

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі були отримані наступні результати:

1. Встановлено, що асинхронний безредукторний електропривод ліфтової лебідки по системі перетворювач частоти-тихохідний асинхронний двигун є нестандартним і перспективним для застосування у вітчизняному ліфтовому парку.

2. Запропоновано математичний опис механічної частини безредукторної лебідки, у вигляді тримасової системи, що враховує зміну моментів інерції і пружності тросів. Особливість математичного опису підтверджена результатами імітаційного моделювання.

3. Створено математичну модель багатомасової механічної системи асинхронного безредукторного електроприводу, що дозволяє провести аналіз і виконати формування вимог до системи управління перетворювачем частоти для електроприводів безредукторних ліфтових лебідок.

4. Розроблено модифіковану систему управління асинхронним безредукторним електроприводом зі змінною структурою, що дозволяє збільшити точність і плавність зупинки кабіни на поверховому майданчику.

5. Запропоновано спосіб адаптивного формування потокозчеплення тихохідного асинхронного двигуна ліфтової лебідки в функції від поточного моменту навантаження, що дозволяє змінювати жорсткість його механічних характеристик і забезпечити плавність переміщення кабіни.

6. Проведено синтез структури і параметрів налаштування регуляторів системи векторного керування асинхронним безредукторним електроприводом. Встановлено, що показники якості кожного контуру регулювання відповідають його очікуваним значенням.

АНОТАЦІЯ

Редін Є. В. Розробка та дослідження системи керування безредукторним електроприводом лебідки вантажопасажирського ліфту.

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

Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 124 сторінки, в тому числі 25 таблиць по тексту, 34 рисунків по тексту, перелік використаних джерел із 60 найменувань на 7 сторінках.

Основні наукові результати магістерської роботи:

1. Розроблено математичний апарат для опису тихохідного асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, який дозволяє розглянути процеси з найбільшим наближенням до реального тихохідного асинхронного двигуна, що зручно для дослідження статичних і динамічних режимів роботи. Врахування насичення магнітного кола здійснюється за допомогою перерахунку допоміжних коефіцієнтів, введених в рівняння статорних і роторних кіл тихохідного асинхронного двигуна.

2. Для дослідження динаміки механічної частини електроприводу безредукторної ліфтової лебідки запропонована багатомасова розрахункова схема, що враховує мінливі наведені моменти інерції і пружності канатів.

3. Встановлено, що власні коливання кабіни і противаги в процесі роботи безредукторної ліфтової лебідки знаходяться в області небезпечних частот (4-8 Гц), що впливають на здоров'я людини. Запропоновано ефективний спосіб зменшення цих коливань – формування завдання на швидкість за допомогою S-подібного задатчика інтенсивності.

4. Розроблено методику синтезу структури та оптимізації контурів системи управління асинхронним безредукторним електроприводом ліфтової лебідки. Встановлено, що показники якості кожного контуру регулювання відповідають його очікуваним значенням.

5. Запропоновано закон адаптивного формування потокозчеплення тихохідного асинхронного двигуна ліфтової лебідки в функції від поточного моменту навантаження, який дозволяє змінювати жорсткість механічної характеристики двигуна і забезпечити плавність переміщення кабіни.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ БЕЗРЕДУКТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ЗАДАТЧИК ІНТЕНСИВНОСТІ, ЛІФТОВА ЛЕБІДКА

ANNOTATION

Redin E. V. Research and development of the gearless cargo-passenger elevator winch electric drive control system.

Master's thesis in specialty 141 – "Electricity, Electrical Engineering and Electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

The master's thesis consists of an introduction, five sections, general conclusions, a list of the used sources.

The total volume of the master's work is 124 pages, including 25 tables on the text, 34 figures on the text, the list of the used sources from 60 names on 7 pages.

The main scientific results of the master's thesis:

1. A mathematical apparatus for describing a low-speed induction motor in a fixed coordinate system has been developed, which allows considering the processes with the closest approximation to a real low-speed induction motor, which is convenient for studying static and dynamic modes of operation. The saturation of the magnetic circuit is taken into account by recalculating the auxiliary coefficients introduced into the equations of the stator and rotor circuits of a low-speed induction motor.

2. To study the dynamics of the mechanical part of the electric drive of the gearless elevator winch, a multi-mass calculation scheme is proposed, which takes into account the variable moments of inertia and elasticity of the ropes.

3. It is established that the natural oscillations of the cabin and counterweights in the process of operation of the gearless elevator winch are in the range of dangerous frequencies (4-8 Hz) that affect human health. An effective way to reduce these oscillations is to form a velocity problem using an S-shaped intensity transmitter.

4. The technique of synthesis of structure and optimization of contours of control system of asynchronous gearless electric drive of the elevator winch is developed. It is established that the quality indicators of each control circuit correspond to its expected values.

5. The law of adaptive formation of flux coupling of the low-speed asynchronous engine of the elevator winch in function from the current moment of loading which allows to change rigidity of mechanical characteristic of the engine and to provide smoothness of movement of a cabin is offered.

Keywords: ASYNCHRONOUS GEARLESS ELECTRIC DRIVE, ADAPTIVE CONTROL, INTENSITY TASKER, ELEVATOR WINCH

Редін Євгеній Володимирович

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
БЕЗРЕДУКТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛЕБІДКИ
ВАНТАЖОПАСАЖИРСЬКОГО ЛІФТУ**

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