

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ХУДОБІН КОСТЯНТИН ВІКТОРОВИЧ

УДК 62-83:622.647.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ –2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Донбаському державному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Заблодський Микола Миколайович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри електричних машин
і експлуатації електрообладнання

доктор технічних наук, професор
Мазуренко Леонід Іванович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України,
завідувач відділу електромеханічних систем

кандидат технічних наук, доцент
Прус В'ячеслав В'ячеславович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
доцент кафедри електричних машин та апаратів

Захист відбудеться «16» травня 2018 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «13» квітня 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Скребковий конвеєр – один із головних механізмів багатьох технологічних процесів в агропромисловому та паливно-енергетичному комплексах та інших галузях виробництва. За універсальністю застосування він займає одне з найперших місць серед машин безперервного транспорту. Значною перевагою скребкових конвеєрів є те, що вони можуть транспортувати різноманітні вантажі. У багатьох виробництвах скребкові конвеєри повинні бути вибухобезпечними. Найпоширенішими є скребкові конвеєрні пристрої, вбудовані в різні машини, і тому вони повинні виконувати допоміжні функції.

Проте сучасні приводи скребкових конвеєрів характеризуються низькими показниками надійності, високою аварійністю, невідповідністю окремих характеристик сучасним вимогам до приводів скребкових конвеєрів, що входять до складу вугледобувного комплексу. Скребковий забійний конвеєр має величезний вплив на безперебійність роботи механізованого комплексу, на який припадає 55 % від загальної тривалості простоїв лави, з них 50 % простоїв відбувається за вини скребкового конвеєра. Пошук та усунення несправностей, пов'язаних з простоєм скребкового конвеєра, є одним з найбільш трудомістких. У процесі експлуатації скребкового конвеєра під час пуску або заклинювання тягового органу виникають значні динамічні навантаження, які призводять до аварійного режиму та обриву тягового ланцюга. Подальше вдосконалення скребкового конвеєра пов'язано з новими вимогами, які формуються напрямами розвитку безперервного транспорту й вимогами до його експлуатаційних характеристик. До найважливіших характеристик скребкового конвеєра належать: високі пускові властивості, здатність привода забезпечувати плавний пуск, з метою зниження динамічних навантажень в тяговому органі скребкового конвеєра, що запобігає заклинюванню тягового органу, обриву його тягового ланцюга, забезпечення двох швидкостей переміщення тягового органу (робочої та маневрової).

Нині найпоширенішим варіантом привода скребкового конвеєра є електропривод з використанням двошвидкісного асинхронного двигуна, застосування якого дає змогу вирішити завдання зниження динамічних навантажень в тяговому органі без застосування пружних ланок, забезпечити дві швидкості переміщення тягового органу, але не захищає тягові ланцюги скребкового конвеєра від обривів. Крім цього, під час перемикання обмоток статора виникає кидок моменту. Це призводить до виникнення додаткових динамічних зусиль в тяговому органі. Двошвидкісний двигун має гірші експлуатаційні характеристики не тільки на маневровій швидкості, але й на робочій, він значно дорожчий, ніж одношвидкісний двигун відповідної потужності. Ці недоліки двошвидкісних приводів скребкових конвеєрів змушують шукати нові рішення, які лежать в області використання електроприводів з регульованою частотою обертання. Застосування більш досконалих частотно-регульованих електроприводів із тиристорним перетворювачем частоти для скребкового конвеєра визнано економічно

невигідним, оскільки більшу частину часу його привод працює з номінальною частотою обертання і живиться від мережі. Тиристорний пристрій плавного пуску містить тиристорний регулятор напруги, застосування якого дає змогу знизити пусковий струм і динамічні навантаження під час пуску, однак зниження напруги призводить до зменшення пускового моменту, до збільшення часу пуску і, як наслідок, до підвищення тепловиділення в обмотках.

Потреба в пристроях помірної вартості для запуску двигунів змінного струму з обмеженими струмами і енерговиділеннями, вимога забезпечення приводом зниженої швидкості руху тягового органу, привела до розроблення тиристорного регулятора напруги з властивостями перетворювача частоти, які досягаються принципово новими алгоритмами управління тиристорами пристрою. Цей симбіоз різко змінює картину з енерговиділенням під час пуску, оскільки зі зменшенням частоти змінюється й напруга. Такі тиристорні пристрої належать до перетворювачів частоти з квазічастотним управлінням. Оцінка ефективності використання квазічастотного привода в скребкових конвеєрах може бути проведена за допомогою встановлення закономірностей динамічних режимів роботи асинхронного електропривода скребкового конвеєра при квазічастотному керуванні та розробленням методів і математичних моделей для їх аналізу.

Тому розроблення системних методів підвищення експлуатаційних показників електропривода скребкового конвеєра, заснованих на застосуванні перетворювача частоти з квазічастотним управлінням, комплексної математичної моделі скребкового конвеєра з урахуванням розподіленого характеру навантаження, наявності спектра гармонік у напрузі, впливу ефекту витіснення струму та насичення магнітної системи на параметри асинхронного двигуна, є своєчасним і актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, подані у роботі, виконувалися відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України, згідно з програмою Міністерства освіти і науки України: за бюджетною темою «Розробка електромеханічного агрегата гідрогенізації і енергозберігаючої технології для виробництва якісного водовугільного палива з високою дисперсністю» (номер державної реєстрації 0112U000363); госпдоговірними науково-дослідними роботами «Розробка та виготовлення низькочастотних джерел живлення для асинхронних приводів» (договір № 02 з ДНВП «Фотон», 2013 р.); «Створення трифазних обмоток з перемиканням полюсів $2p_1/2p_2=4/8$ для конвеєрних асинхронних двигунів» (договір № 2957 з Луганським енергозаводом, 2013 р.), у яких здобувачу належать розроблення математичних моделей, дослідження динамічних режимів конвеєрних асинхронних двигунів, розроблення методики та лабораторного стенду для випробувань.

Мета та завдання досліджень. Мета дисертаційного дослідження полягала в розробленні принципів і законів керування, методів розрахунку параметрів асинхронного електропривода з квазічастотною системою керування, які забезпечують підвищення експлуатаційних показників електропривода скребкового конвеєра.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- проаналізувати існуючі електроприводи скребкових конвеєрів і відповідності їх характеристик сучасним вимогам до комплексів, що використовуються в промисловості та агропромислового комплексу;

- провести теоретичні дослідження і розробити принципи формування квазісинусоїдальної напруги в системі живлення одношвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором привода скребкового конвеєра;

- розробити математичні та імітаційні моделі систем імпульсно-фазового управління та провести дослідження впливу законів формування квазісинусоїдальної напруги на експлуатаційні характеристики привода скребкового конвеєра;

- здійснити синтез математичної моделі асинхронного двигуна в динамічних режимах шляхом удосконалення методу розбиття паза ротора на шари, врахування ефекту витіснення струму і насичення магнітної системи;

- розробити математичну модель тягового органу конвеєра, що враховує пружні, дисипативні та інерційні властивості тягового ланцюга і нерівномірність розподілення навантаження по довжині скребкового конвеєра;

- здійснити синтез комплексної математичної моделі скребкового конвеєра та провести системні дослідження щодо підвищення експлуатаційних показників електропривода скребкового конвеєра;

- розробити експериментальний зразок електропривода скребкового конвеєра і провести дослідження стійкості роботи привода на основній та маневровій швидкостях і пускових властивостей при живленні квазісинусоїдальною напругою та перевірити основні теоретичні положення.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, електромеханічні, механічні й енергетичні процеси в асинхронному приводі скребкового конвеєра.

Предмет дослідження – закономірності динамічних режимів роботи асинхронного електропривода скребкового конвеєра при квазічастотному керуванні та математичні моделі для їх аналізу.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися загальні методи теоретичних основ електротехніки, які лежать в основі методів формування квазісинусоїдальної напруги; теорія рядів Фур'є при визначенні гармонійних складових квазісинусоїдальної напруги; чисельно-польові розрахунки магнітного поля машини для знаходження постійних і динамічних параметрів двигуна; чисельні методи рішення рівнянь і систем при реалізації математичних моделей складових частин привода скребкового конвеєра і вдосконаленні методу розбиття паза ротора двигуна на шари; математичне моделювання на ПК та експериментальні дослідження для перевірки теоретичних положень і наукових результатів, отриманих за результатами випробувань математичних моделей, що реалізують розроблені підходи до їх складання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджено коректним використанням досліджень та відомих даних із друкованих, електронних джерел і достовірним збігом розрахункових

та експериментальних результатів, а також апробацією основних результатів на наукових конференціях. Проведення обчислювальних експериментів та опрацювання експериментальних даних базувалися на використанні програмних засобів «Matlab/Simulink», COMSOL Multiphysics, MS Office Excel.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше запропоновано й теоретично обґрунтовано принцип формування квазісинусоїдальної напруги одношвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, при якому за допомогою фазово-імпульсного керування в системі «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з мінімальною кількістю елементів переключення забезпечується дискретний зсув вектора магнітного потоку на кут 60 електричних градусів і перехід на стійку знижену частоту обертання ротора на рівнях $1/3$ і $1/5$ від номінальної.

Запропоновано та обґрунтовано закони квазічастотного керування асинхронним електроприводом скребкового конвеєра у перехідних режимах, в яких, на відміну від існуючих, гармонічні коливання з дискретно регульованою початковою фазою та оптимальним гармонічним складом симетричної напруги живлення асинхронного двигуна формуються функціями переключення груп тиристорів із розбиттям періоду модуляції відповідно на шість або десять інтервалів з урахуванням коливань частоти мережі, що забезпечує поліпшення пускових властивостей і механічних характеристик електропривода на основній та маневровій швидкостях і зменшення динамічних навантажень в тяговому органі.

Розроблено метод урахування впливу ефекту витіснення струму та насичення магнітної системи в динамічних режимах роботи асинхронного електропривода з використанням параметра «динамічна індуктивність», який визначається чисельним диференціюванням залежності потокозчеплення від струму за результатами моделювання магнітної системи асинхронного двигуна, що дає змогу на основі рівнянь Парка – Горева синтезувати математичну модель асинхронного двигуна зі змінними параметрами і забезпечує підвищення точності визначення параметрів електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів.

Уперше отримано розрахункові формули параметрів стрижня обмотки ротора, інваріантні до розподілу струму по перетину стрижня та до форми паза ротора, в яких на основі вдосконаленого методу розбиття стрижня обмотки ротора на шари за допомогою чисельно-польового моделювання повний струм стрижня приймається як інтегральна характеристика насичення магнітної системи і ефекту витіснення струму, що дає змогу визначати пускові характеристики асинхронного двигуна при живленні від тиристорного перетворювача з квазічастотною системою керування.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено науково-методичне забезпечення, яке містить математичні та імітаційні моделі, методики вибору параметрів і проведення експериментальних досліджень регульованого асинхронного електропривода скребкового конвеєра при живленні від тиристорного регулятора напруги з квазічастотною системою керування.

Розроблено структуру й алгоритми функціонування систем імпульсно-фазового управління різних модифікацій для формування законів управління режимами роботи тиристорного регулятора напруги для живлення електропривода скребкових конвеєрів. Застосування квазічастотного управління забезпечує знижену швидкість переміщення тягового органу, дає змогу здійснити його розштибування при заклинюванні на відстані більше за 0,1 довжини конвеєра від приводної зірочки та знизити ймовірність аварійних випадків.

Розроблено методику двовимірного чисельно-польового моделювання, в якій враховано параметри лобових частин обмотки статора і короткозамкнених кілець ротора, що дає змогу отримувати результати, еквівалентні тривимірній моделі при значному скороченні машинного часу.

Удосконалено метод розбиття стрижня обмотки ротора на шари шляхом чисельно-польового моделювання, що дало змогу враховувати не тільки ефект витіснення струму, але й насичення магнітного кола в динамічних режимах.

Розроблено й виготовлено експериментальний зразок регульованого асинхронного привода скребкового конвеєра з квазічастотним управлінням і стенд для дослідження його характеристик.

Результати роботи пройшли експериментальну перевірку випробуванням експериментального зразка і впроваджено в проектні рішення на Первомайському електромеханічному заводі, який випускає одно- і двошвидкісні вибухобезпечні асинхронні двигуни для скребкових конвеєрів, на державному науково-виробничому підприємстві «Фотон», що підтверджено відповідними актами.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Донбаського державного технічного університету під час підготовки дипломних проектів і магістерських робіт зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», а також під час лекційних, лабораторних та практичних занять з дисциплін «Спеціальні питання теорії електропривода», «Автоматизовані електромеханічні системи та електропривод», «САПР електромеханічних пристроїв».

Особистий внесок здобувача. До дисертаційної роботи увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить постановка завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої роботи здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи було викладено у доповідях та обговорено на засіданнях семінарів наукової ради Національної академії наук України «Динаміка автоматизованих електромеханічних систем» (м. Алчевськ, 2011–2014 рр.); VI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених з проблем енергетики (м. Кривий Ріг, 2010 р.); міжнародних симпозіумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA`2011–2013)» (м. Харків, 2011–2013 рр.); Міжнародному форумі-конкурсі молодих вчених

«Проблеми надкористування» (м. Санкт-Петербург, Російська Федерація, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (м. Севастополь, 2012 р.); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (ICPEES` 2013) (м. Кременчук, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Малий Маяк, 2013 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнології та автоматики в АПК» (м. Київ, 2016 р.); науковому семінарі кафедри систем автоматизованого управління та електропривода Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського (м. Кременчук, 2016 р.); науково-технічній конференції «2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering. YSF-2017» (м. Львів, 2017 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано у 20 наукових працях, з яких 8 статей у наукових фахових виданнях України, 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 4 статті у наукових виданнях інших держав, 3 патенти України на корисну модель, 2 тези наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 212 сторінках комп'ютерного тексту. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, містить 34 таблиці, 77 рисунків. Список використаних джерел містить 170 найменувань, із них 23 іноземною мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність і доцільність дисертації, сформульовано мету й основні наукові та практичні завдання дослідження, показано зв'язок із науковими програмами, а також наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів, рівень апробації результатів роботи, кількість публікацій за темою та особистий внесок автора.

У першому розділі «**Аналіз наукових досліджень в області вдосконалення і моделювання електроприводів скребкових конвеєрів. Постановка завдань досліджень**» проведено аналіз областей застосування скребкових конвеєрів та вимог, що до них ставляться. Аналіз технічної літератури, присвяченої надійності роботи скребкових конвеєрів, свідчить, що вона пов'язана із заклинюванням тягового органу та обривом ланцюгів. Одним із найперспективніших напрямів підвищення надійності й продуктивності скребкового конвеєра є розроблення приводів як засобів захисту тягового органу від надмірних динамічних навантажень, які виникають під час пуску конвеєра або заклинювання його тягового органу.

Проведено огляд динамічних та експлуатаційних характеристик приводів сучасних скребкових конвеєрів, в якому було проаналізовано приводи з

пружними ланками. Як такі можуть застосовуватися гідромурфи, фрикційні та електромагнітні муфти; з двошвидкісними двигунами; з одношвидкісними асинхронними двигунами, пуск яких здійснювався за допомогою спеціальних пристроїв, що належать до «систем м'якого пуску», з частотними приводами. Ці питання були предметом досліджень багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених, таких як С. В. Корнеєв, В. П. Кондрахін, О. П. Чорний, О. В. Осичев, С. В. Маренич, V. Donesku, A. Charette, Z. Yao, V. Rajagopalan, J. Verbeeck, R. Pintelon, P. Lataire, M. Dolipski, E. Remiorz, P. Sobota та ін. Аналіз даних свідчить, що, виходячи з оцінки економічної доцільності засобів забезпечення надійності пуску, мінімальних динамічних навантажень, забезпечення максимально можливого темпу розгону, найкращим є пуск з використанням перетворювача частоти з квазічастотним управлінням.

Квазічастотна система управління дає змогу здійснювати різні принципи і закони формування напруги, від яких залежить форма вихідної напруги і, отже, склад гармонік у ньому, які мають істотний вплив на енергетичні характеристики привода, механічну характеристику двигуна й на динамічні навантаження в тяговому органі. Ці питання в технічній літературі не висвітлено й потребують додаткових досліджень.

Одним із сучасних методів дослідження електромеханічних процесів у різних пристроях, у тому числі й скребкових конвеєрах, є математичне моделювання, точність результатів якого залежить від точності математичної моделі досліджуваного об'єкта. У розділі проаналізовано сучасний стан моделювання асинхронних приводів, розвиток якого значною мірою стимулювався фундаментальними дослідженнями Д. І. Родькіна, В. Ф. Сивокобиленка, Ю. М. Васьковського, Л. І. Мазуренко, О. М. Поповича, В. С. Петрушина, О. І. Толочко та ін.

Скребковий конвеєр як об'єкт математичного моделювання складається з тиристорної системи з квазічастотним управлінням, асинхронного двигуна та навантаження, що розподілене по скребках конвеєра, які з'єднані ланцюгом. Існуючі математичні моделі не дають змоги враховувати в динамічних режимах ефекти витиснення струму, насичення магнітної системи, наявність спектра гармонік та сталу складову квазісинусоїдальної напруги, що потребує додаткових досліджень.

Огляд підходів до моделювання тягового органу скребкового конвеєра свідчить, що при скребковому конвеєрі малої протяжності тяговий орган подавався як одна зосереджена маса, що вносить значні похибки при моделюванні скребкового конвеєра великою протяжністю (300 м і більше). Ряд авторів, у тому числі й зарубіжних, пропонують тяговий орган подавати як сукупність кінцевих елементів, які володіють пружними, дисипативними та інерційними властивостями, що і було використано при розробленні математичної моделі навантаження.

На підставі проведеного аналізу визначено завдання дослідження, проведення яких дасть змогу винайти шляхи підвищення експлуатаційних показників скребкових конвеєрів.

У другому розділі «Математична модель тиристорних перетворювачів частоти з квазічастотним управлінням» розглянуто принципи і закони формування квазісинусоїдальної напруги в системі живлення одношвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором привода скребкового конвеєра, які дають змогу здобути швидкості $1/3$ та $1/5$ від номінальної шляхом живлення від тиристорного регулятора напруги з квазічастотною системою керування. Принцип перетворення частоти полягає в тому, що крива вихідної напруги складається з відрізків синусоїдальної напруги, пропускання яких через тиристири формується їх системами управління. Існує два принципи і багато алгоритмів формування напруги. Тому було досліджено характеристики привода скребкового конвеєра при живленні двигуна за двома принципами і чотирма алгоритмами формування напруги. Перший принцип – почергове включення фаз двигуна, здійснюється таким чином, щоб струм у фазах створював обертове магнітне поле. У цьому випадку перемикання проводиться через проміжки часу, рівні $T/6$ (T – період першої гармоніки напруги), а група працюючих тиристорів підбирається таким чином, щоб результуючий магнітний потік у момент перемикання тиристорів, повертався на 60 ел. град. Другий принцип – перемикання, здійснюється таким чином, щоб на затискачах двигуна сформувалася напруга, що містить гармоніку потрібної частоти (у нашому випадку 10 Гц). Таку напругу можна отримати, пропускаючи по дві напівхвилі мережевої напруги одного знака.

Для знаходження такого принципу й алгоритму комутації тиристорів, за якими привод має кращі пускові властивості, було розроблено й досліджено математичні моделі з різними варіантами систем імпульсно-фазового керування (СФІУ). Математична модель систем імпульсно-фазового керування у матричному вигляді:

$$\begin{aligned} U_{2a}(t) &= mU_{1a}(t) \cdot H_{1a}(t) \\ U_{2b}(t) &= mU_{1b}(t) \cdot H_{1b}(t) \\ U_{2c}(t) &= mU_{1c}(t) \cdot H_{1c}(t) \end{aligned}, \quad (1)$$

де $U_{2a}(t)$, $U_{2b}(t)$, $U_{2c}(t)$ – вихідна напруга на відповідних фазах навантаження; $mU_{1a}(t)$, $mU_{1b}(t)$, $mU_{1c}(t)$ – матриці складових напруг, які залежать від принципу формування квазісинусоїдальної напруги; $H_{1a}(t)$, $H_{1b}(t)$, $H_{1c}(t)$ – матриці векторів функцій переключення, які й формують відповідну квазісинусоїдальну напругу й залежать від алгоритму переключення.

У роботі розглянуто чотири варіанти систем імпульсно-фазового керування (СІФУ-1 – керуючі імпульси подаються на три тиристири через $T/6$ с, які включені у різні фази, причому два тиристири включені в одному напрямку, інший – у зворотному; СІФУ-2 – керування здійснюється вмиканням тиристорів керуючим імпульсом, який подається при переході фазної напруги через нуль; СІФУ-3 – тиристири відкриваються у момент проходження лінійної напруги через нуль, напруга формується з двох напівхвиль одного знака. Робоча пара тиристорів підбирається таким чином, щоб кожні $0,01667$ с результуючий магнітний потік повертався на 60 ел. град. Графіки напруги живлення за

різними системами управління тиристорними перетворювачами частоти наведено на рис. 1.

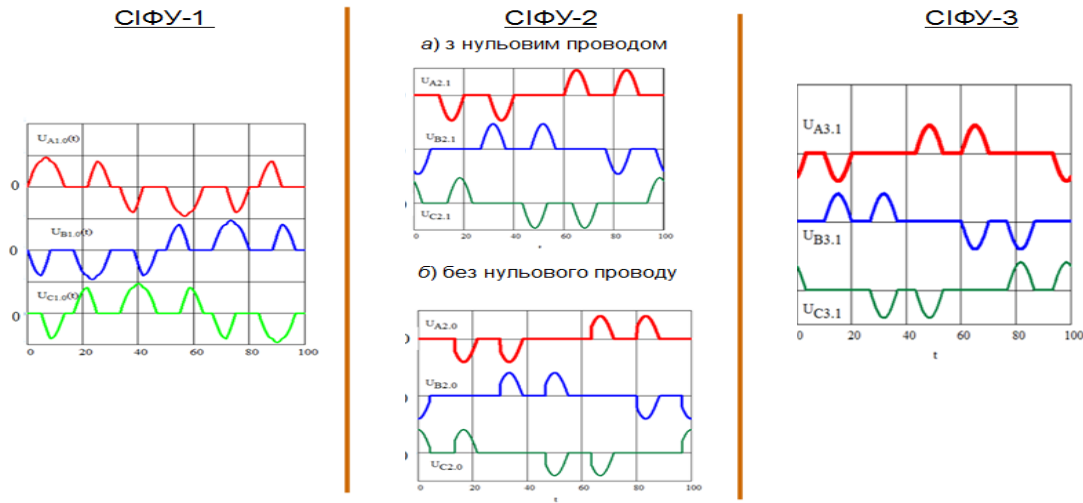


Рис. 1. Напряга живлення від перетворювача частот з різними системами імпульсно-фазового керування

У розділі розроблено структурну схему моделі привода скребкового конвеєра, для синтезу якої потрібна математична модель асинхронного двигуна зі змінними параметрами, а також математична модель тягового органу скребкового конвеєра з навантаженням, розподіленим по його довжині.

У третьому розділі «**Математичні моделі силової частини електропривода скребкового конвеєра**» виконано синтез і дослідження математичної моделі асинхронного двигуна зі змінними параметрами.

Запропоновано такий підхід до синтезу математичної моделі асинхронного двигуна зі змінними параметрами. За основу беруться відомі рівняння Парка – Горева, в яких пропонується перетворити похідні від потокозчеплень, як

$$\frac{d\Psi(i)}{dt} = \frac{d\Psi(i)}{di} \cdot \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

Тут величина $\frac{d\Psi(i)}{di}$ є динамічною індуктивністю, позначеною як $L^d(i)$

(у відносних одиницях динамічний опір $x^d(i)$). Тоді (2), набуде наступного вигляду:

$$\frac{d\Psi(i)}{dt} = L^d(i) \cdot \frac{di}{dt}, \quad L^d(i) = \frac{d\Psi(i)}{di}. \quad (3)$$

Особливістю динамічної індуктивності є її залежність тільки від струму, тому цю залежність можна отримати на етапі синтезу моделі шляхом чисельного диференціювання залежності потокозчеплення від струму.

Введення динамічної індуктивності дозволяє на основі рівнянь Парка – Горева синтезувати математичну модель асинхронного двигуна зі змінними параметрами, яка враховує ефект витиснення струму та насичення

магнітної системи. У розділі розроблено послідовність визначення параметрів стрижня ротора на основі чисельно-польових розрахунків у середовищі COMSOL Multiphysics, які дають змогу визначити динамічні індуктивності як функції струму $L^d(i)$, та звичайні індуктивності як функції від струмів $L_i(i)$. Для цього пропонується провести випробування моделі в режимах холостого ходу та короткого замикання. Для моделювання магнітного поля в середовищі COMSOL Multiphysics у режимі короткого замикання та холостого ходу, було сформульовано граничні умови. Картину магнітних полів в певний момент часу наведено на рис. 2 та рис. 3.

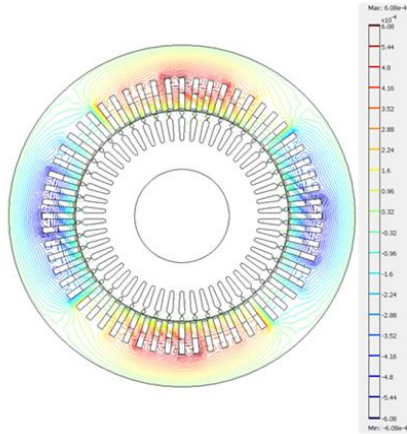


Рис. 2. Картина магнітного поля (режим короткого замикання)

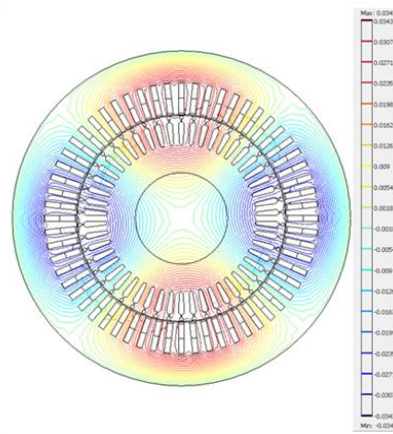


Рис. 3. Картина магнітного поля (режим холостого ходу)

Визначені індуктивний і динамічний індуктивний опори розсіювання обмотки статора у функції струму статора за результатами дослідів короткого замикання та холостого ходу наведено на рис. 4 та рис. 5.

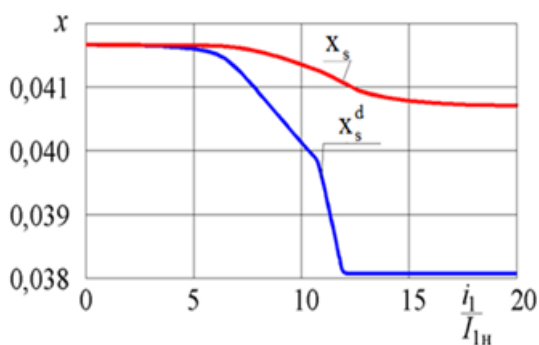


Рис. 4. Результати випробування за дослідом короткого замикання: X_s – індуктивний опір розсіювання обмотки статора; X_s^d – динамічний індуктивний опір обмотки статора

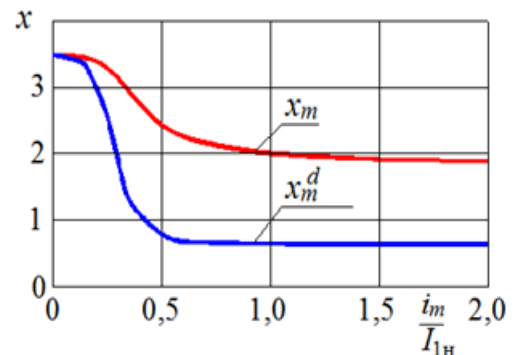


Рис. 5. Результати випробування за дослідом холостого ходу: X_m – індуктивний опір взаємоіндукції; X_m^d – динамічний індуктивний опір взаємоіндукції

Однією з найважливіших особливостей отриманих результатів є їх незалежність від закону зміни струму (форми і частоти). Це пов'язано з тим, що зміна частоти струму проявляється через ефект витіснення струму в обмотках. У моделях холостого ходу, короткого замикання, і струмів нульової послідовності ефект витіснення струму відсутній, оскільки в моделях немає областей, в яких провідності не дорівнюють нулю. Струми, що протікають в пазах статора задаються як сторонні, від величини яких залежить ступінь насичення магнітної системи. Тому отримані параметри справедливі на будь-яких частотах, при цьому математична модель, яка формується на підставі залежностей, отриманих за результатами моделювання магнітних полів в середовищі COMSOL Multiphysics, враховує насичення магнітної системи.

Математична модель, яка синтезується на підставі здобутих залежностей, дає змогу розрахувати пускові характеристики двигуна з урахуванням ефекту витіснення струму та насичення магнітної системи. Адекватність моделі було оцінено шляхом порівняння результатів розрахунку механічної характеристики за моделлю та каталожними даними. Але застосування розробленого підходу під час досліджень динамічних задач потребує значного обсягу машинного часу, тому було запропоновано вдосконалити метод розбиття стрижня на шари шляхом доповнення його чисельно-польовим моделюванням, що дає змогу врахувати не тільки ефект витіснення струму, а й насичення магнітного кола.

При розробленні підходів до урахування насичення за допомогою чисельно-польового моделювання було прийнято два припущення: перше – від насичення залежить індуктивний опір тільки верхнього шару; друге – насичення впливає на параметри розсіювання стрижня ротора тільки залежно від величини повного струму в пазу і не залежить від його розподілу по шарах. Тобто, повний струм стрижня є інтегральною характеристикою насичення магнітного кола і тільки від нього залежать значення коефіцієнтів індукції і взаємодукції.

Для визначення коректності цих положень було розроблено й досліджено моделі декількох двигунів, що мають різні форми паза ротора. На першому етапі було створено математичну модель для чисельно-польового моделювання, в якій паз було розподілено на три шари по висоті. Струм у перших двох шарах, починаючи з верхнього, задавався генератором випадкових чисел, а величина струму у нижньому шарі визначалася, виходячи з прийнятої величини повного струму. Для кожного значення повного струму за результатами чисельно-польового моделювання визначали потокозчеплення шарів. Для автоматизації експериментів досліди проводилися у середовищі Comsol, який було інтегровано у Matlab.

Далі методом найменших квадратів було визначено індуктивності шарів, які задовольняють наступним рівнянням:

$$\Psi_1 = L_1 \cdot (i_1 + i_2 + i_3),$$

$$\Psi_2 = L_1 \cdot (i_1 + i_2 + i_3) + L_2 \cdot (i_2 + i_3),$$

$$\Psi_3 = L_1 \cdot (i_1 + i_2 + i_3) + L_2 \cdot (i_2 + i_3) + L_3 \cdot i_3,$$

Аналіз результатів свідчить про доцільність першого припущення, що індуктивність перших шарів для всіх форм пазів ротора найбільш суттєво залежить від величини повного струму. При розробленні математичної моделі, було використано поняття динамічної індуктивності, яка залежить тільки від повного струму в пазу:

$$L_1^d = \frac{d \Psi_1}{d(i_1 + i_2 + i_3)} = \frac{d[L_1 \cdot (i_1 + i_2 + i_3)]}{d(i_1 + i_2 + i_3)}. \quad (4)$$

Динамічна індуктивність знаходиться числовим диференціюванням залежності $L_1 = f(i_1 + i_2 + i_3)$, яка отримана за результатами дослідів параметрів стрижня, до кінців якого прикладена напруга U :

$$\begin{aligned} U &= i_1 \cdot r_1 + L_1^d \cdot \frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt}, \\ i_1 \cdot r_1 &= i_2 \cdot r_2 + L_2 \cdot \frac{d(i_2 + i_3)}{dt}, \\ i_2 \cdot r_2 &= i_3 \cdot r_3 + L_3 \cdot \frac{d(i_3)}{dt}, \\ i_c &= i_1 + i_2 + i_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Основна перевага моделі (5) полягає в простоту її інтегруванні в динамічну модель асинхронного двигуна. Далі було проведено порівняння активного та індуктивного опору стрижня, які визначено за допомогою чисельно-польового розрахунку з даними за моделлю на основі рівнянь (5). Випробування проводилися для різного значення амплітуди та частоти напруги.

Перевірка вдосконаленого методу розбиття на шари і визначення опорів стрижня ротора шляхом проведення 150 дослідів для п'яти значень середньої густини струму показала, що насичення магнітної системи двигуна призводить до зміни індуктивних опорів на 40–50 % і збільшення активного опору стрижня у 2–3,5 рази, а розбіжність з експериментальними даними для пазів різної форми залежно від сили та частоти струму і знаходиться у межах 2–10 %, що є допустимим.

Отримані результати дали змогу створити математичну модель асинхронного двигуна з урахуванням ефекту витіснення струму та насичення магнітного ланцюга, яку можна використовувати під час дослідження динамічних режимів при живленні від перетворювача частоти з квазічастотним керуванням. У розділі розглянуто два варіанти математичної моделі асинхронного двигуна. У *першому варіанті* враховується тільки ефект витіснення струму та насичення зубців ротора. Для цього пропонується використати блок Asynchronous Machine (Асинхронні машини) з бібліотеки Sim Power Systems. Цей блок налаштовується як машина з фазним ротором, при цьому не враховується диференційне розсіяння обмоток, а коефіцієнт приведення параметрів ротора до обмотки статора розраховується з урахуванням коефіцієнта трансформації, який визначається за допомогою досліду холостого ходу. Активний та індуктивний опір ротора дорівнює відповідним опорам кільця, а параметри стрижня враховуються опорами, які включаються в ланцюг мережі відповідно до рівнянь (5).

Другий варіант моделі – це модель на підставі рівнянь Парка – Горева, до яких інтегровані рівняння (5). Математична модель в остаточному вигляді складається з рівнянь (6):

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{sd}}{dt} &= \frac{\left(U_{sd} - i_{sd} \cdot r_s + \frac{d\gamma}{dt} \cdot \Psi_{sq} \right) \cdot L_{rp}(i_{sd}, i_{rd}) + (i_{r1d} \cdot r_{r1} + i_{rd} \cdot r_{rk}) \cdot M_m^d(i_{md})}{L_{sp}(i_{sd}, i_{rd}) \cdot L_{rp}(i_{sd}, i_{rd}) - M_m^d(i_{md})^2}, \\
 \frac{di_{rd}}{dt} &= \frac{-L_{sp}(i_{sd}, i_{rd}) \cdot (i_{r1d} \cdot r_{r1} + i_{rd} \cdot r_{rk}) - M_m^d(i_{md}) \cdot \left(U_{sd} - i_{sd} \cdot r_s + \frac{d\gamma}{dt} \cdot \Psi_{sq} \right)}{L_{sp}(i_{sd}, i_{rd}) \cdot L_{rp}(i_{sd}, i_{rd}) - M_m^d(i_{md})^2}, \\
 \frac{d(i_{r2d} + i_{r3d})}{dt} &= \frac{i_{r1d} \cdot r_{r1} - i_{r2d} \cdot r_{r2}}{L_{r2}}, \quad \frac{di_{r3d}}{dt} = \frac{i_{r3d} \cdot r_{r2} - i_{r3d} \cdot r_{r3}}{L_{r3}}, \\
 \frac{di_{sq}}{dt} &= \frac{\left(U_{sq} - i_{sq} \cdot r_s - \frac{d\gamma}{dt} \cdot \Psi_{sd} \right) \cdot L_{rp}(i_{sq}, i_{rq}) + (i_{r1q} \cdot r_{r1} + i_{rk} \cdot r_{rk}) \cdot M_m^d(i_{mq})}{L_{sp}(i_{sq}, i_{rq}) \cdot L_{rp}(i_{sq}, i_{rq}) - M_m^d(i_{mq})^2}, \\
 \frac{di_{rq}}{dt} &= \frac{-L_{sp}(i_{sq}, i_{rq}) \cdot (i_{r1q} \cdot r_{r1} + i_{rq} \cdot r_{rk}) - M_m^d(i_{mq}) \cdot \left(U_{sq} - i_{sq} \cdot r_s + \frac{d\gamma}{dt} \cdot \Psi_{sd} \right)}{L_{sp}(i_{sq}, i_{rq}) \cdot L_{rp}(i_{sq}, i_{rq}) - M_m^d(i_{mq})^2}, \\
 \frac{di_{s0}}{dt} &= \frac{U_{s0} - i_{s0} \cdot r_{sr1}}{L_0}, \\
 \frac{d(i_{r2q} + i_{r3q})}{dt} &= \frac{i_{r1q} \cdot r_{r1} - i_{r2q} \cdot r_{r2}}{L_{r2}}, \quad \frac{di_{r3q}}{dt} = \frac{i_{r3q} \cdot r_{r2} - i_{r3q} \cdot r_{r3}}{L_{r3}}, \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{(M_{em} - M_c) \cdot p}{J}, \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \\
 i_{md} &= i_{sd} + i_{rd}, \quad i_{mq} = i_{sq} + i_{rq}, \quad i_{rd} = i_{r1d} + i_{r2d} + i_{r3d}, \quad i_{rq} = i_{r1q} + i_{r2q} + i_{r3q}, \\
 M_{em} &= \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\Psi_d(i_{sd}, i_{rd}) \cdot i_q - \Psi_q(i_{sd}, i_{rd}) \cdot i_d] \\
 \Psi_{sd}(i_{sd}, i_{rd}) &= i_{sd} \cdot L_{s\sigma}(i_{sd}) + i_{md} \cdot M_m(i_{md}), \quad \Psi_{sq}(i_{sq}, i_{rq}) = i_{sq} \cdot L_{s\sigma}(i_{sq}) + i_{mq} \cdot M_m(i_{mq}).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Структура індексів системи (6):

- d в чисельнику позначає диференціювання;
- s або r – у нижньому індексі позначає параметр статора або ротора;
- цифра в індексі показує номер шару, до якого відноситься параметр;
- d або q у складі індексу позначає належність змінної до повздовжньої або поперечної осі.

Відповідно до наведених рівнянь (6) розроблено Simulink-модель асинхронного двигуна, яка враховує ефект витиснення струму й насичення магнітної системи. Модель відпрацьовувалася з двигуном ЕКОФВ315М4.

Для досліджень привода скребкового конвеєра було розроблено математичну модель механічної частини конвеєра (рис. 6). Кожний елемент є тілом, на яке діє сила опору, а між елементами існує пружний зв'язок.

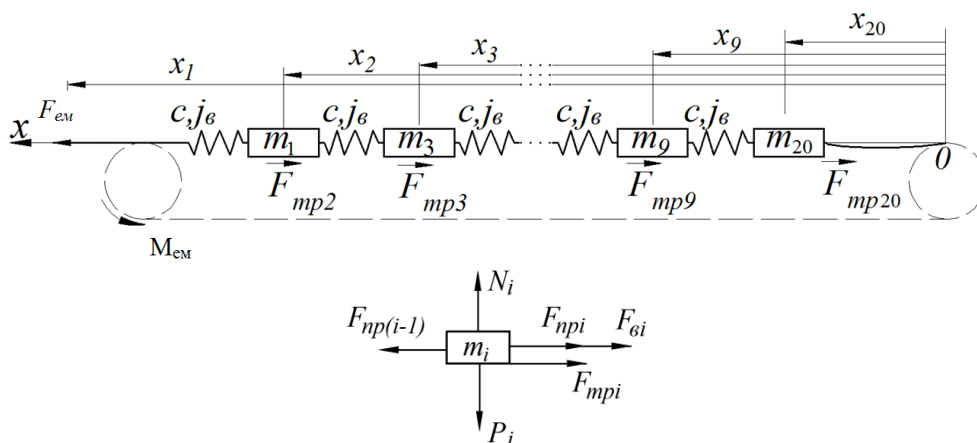


Рис. 6. Схема тягового органу скребкового конвеєра

Математичну модель подано системою рівнянь (7), для якої використовувався скребковий забійний конвеєр серії СП330 (Харківський машинобудівний завод «Світло шахтаря») з 20 скребками:

$$\begin{aligned}
 & \text{– для маси } m_1 \quad \frac{c \left(\frac{\varphi}{\kappa_J} - x_1 \right) - c(x_1 - x_2) - F_{мп} - \frac{dx_1}{dt} \cdot j_e}{m_1} = \frac{d^2 x_1}{dt^2}, \\
 & \text{– для середніх мас } m_2 \dots m_{19} \quad \frac{c(x_{i-1} - x_i) - c(x_i - x_{i+1}) - F_{мп} - \frac{dx_i}{dt} \cdot j_e}{m_i} = \frac{d^2 x_i}{dt^2}, \quad (7) \\
 & \text{– рівняння руху останньої маси } m_{20} \quad \frac{c(x_{19} - x_{20}) - F_{тп} - \frac{dx_{20}}{dt} \cdot j_b}{m_{20}} = \frac{d^2 x_{20}}{dt^2} \\
 & \text{– рівняння руху двигуна} \quad \frac{M_{ем} - c \left(\frac{\varphi}{\kappa_J} - x_1 \right) \cdot \frac{1}{\kappa_J}}{J_{дв}} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.
 \end{aligned}$$

У математичній моделі прийнято такі припущення: навантаження між двигунами привода розподіляється рівномірно; тяговий орган складається з 20 скребків із зосередженими параметрами.

У четвертому розділі «Дослідження тиристорного привода з квазічастотною системою управління за допомогою математичних моделей» наведено результати досліджень привода скребкового конвеєра з квазічастотною системою управління, які виконано за допомогою математичних моделей. До програми випробувань входило:

- визначення механічних характеристик двигуна при живленні його номінальною напругою, а також при живленні квазісинусоїдальною напругою;
- дослідження пуску конвеєра після зупинки і злежування гірничої маси;
- дослідження пуску конвеєра після заштибовки його в окремому місці;
- дослідження роботи конвеєра на маневровій швидкості.

Проведення експериментальних досліджень дало змогу оцінити експлуатаційні якості привода з різними системами управління і підтвердити адекватність використовуваних математичних моделей. Дослідження проводилися з двигуном ЕКОФВ315М4, який серійно випускається Первомайським електромеханічним заводом.

На рис. 7 наведено характеристики двигуна, визначені різними засобами: 1 – за результатами випробувань спрощеної моделі; 2 – за результатами випробувань повної моделі; 3 – за результатами чисельно-польового моделювання в Comsol Multiphysics; 4 – за результатами розрахунків традиційних методик, які враховують ефект витиснення струму шляхом визначення глибини проникнення струму в стрижень ротора та діленням його на верхню й нижню клітку (при двоклітинних пазах ротора), а вплив насичення магнітної системи – за емпіричними залежностями.

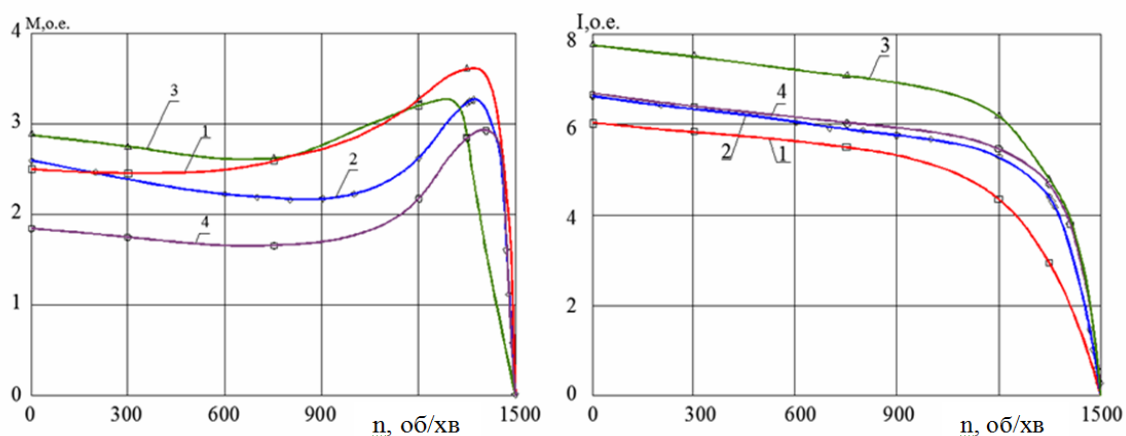


Рис. 7. Залежність моменту й струму від швидкості обертання двигуна ЕКОФВ315М4

Аналіз даних рис. 7 свідчить про те, що найбільш близькими до експериментальних і паспортних даних є характеристики, отримані за результатами розрахунків характеристик в Comsol Multiphysics та результатами, отриманими під час випробування математичних моделей двигуна в Matlab, які будуються на основі вдосконаленого методу поділу паза на шари.

Для порівняння різних принципів формування квазісинусоїдальної напруги було проведено відповідні випробування.

На рис. 8 наведено залежності моменту й струму від швидкості обертання: 1 – при живленні від СІФУ-1; 2 – при живленні від СІФУ-2; 3 – при живленні від СІФУ-3.1; 4 – при живленні СІФУ-3.2; 5 – при живленні від мережі промислової частоти.

Для встановлення впливу різних систем імпульсно-фазового керування на характеристики двигуна, який має пази ротора різної форми, на базі ЕКОФВ315М4 було спроектовано двигун із овальними пазами на роторі ЕКОФВ315М4-О. У таблиці наведено основні характеристики двигунів при живленні від перетворювача частоти з різними системами імпульсно-фазового керування. Додатково для інтегральної оцінки пускових характеристик привода

запропоновано параметр «коефіцієнт якості пуску», який дорівнює співвідношенню моменту до квадрата струму за період пуску. Таке співвідношення обґрунтовується тим, що нагрівання двигуна пропорційне квадрату струму.

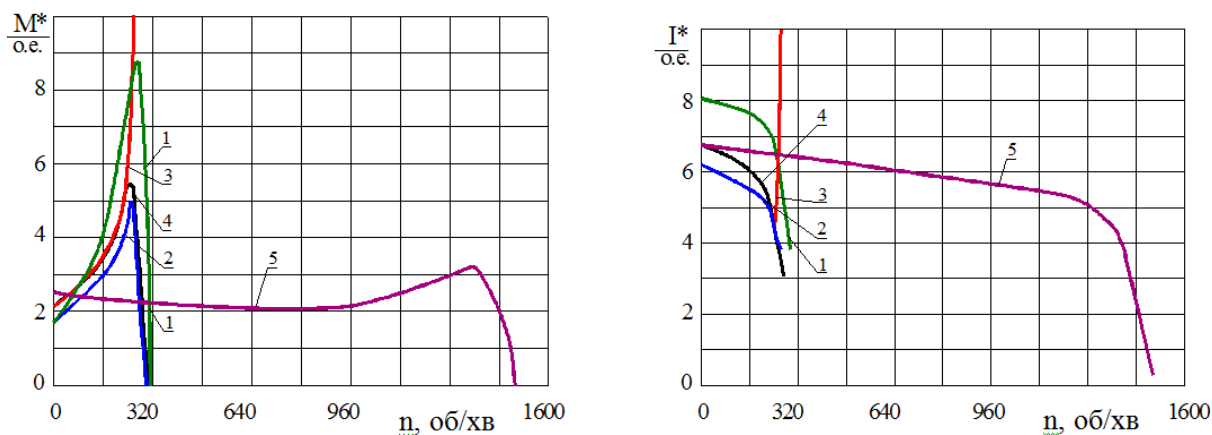


Рис. 8. Пускові характеристики за різних систем живлення

Таблиця

Характеристики двигунів при живленні від перетворювача частоти з різними системами імпульсно-фазового керування

Варіант системи імпульсно-фазового керування	ЕКОФВ315М4 (двоклітинні пази)			ЕКОФВ315М4-О (овальні пази)		
	I	M_{EM}	M/I^2	I	M_{EM}	M/I^2
СІФУ-1	8,255	1,773	0,026	10,382	4,17	0,039
СІФУ-2	6,06	1,68	0,046	7,54	2,94	0,052
СІФУ-3.1	6,205	2,197	0,057	7,57	3,55	0,062
СІФУ-3.2	5,739	2,157	0,065	7,017	3,487	0,071

Аналіз здобутих результатів свідчить, що більший пусковий момент забезпечує СІФУ-3. В удосконаленому варіанті СІФУ-3.2 група тиристорів складається з двох тиристорів, включених в різні фази в протилежних напрямках. Як показали подальші дослідження СІФУ-3.2 забезпечує більш сталу роботу привода, тому цю систему було досліджено більш детально.

Дослідження пуску конвеєра після зупинки та злежування гірничої маси показали, що привод з СІФУ-3.2 забезпечує пуск при більшому перевантаженні, ніж при прямому пуску і живленні від мережі. Це пояснюється тим, що при живленні двигуна від мережі він має більший початковий пусковий момент, однак, у міру розгону, як і у більшості двигунів з подвійною кліткою на роторі, електромагнітний момент починає знижуватися, тоді як при живленні двигуна від квазічастотного перетворювача, момент, у міру розгону ротора, зростає. На рис. 9 та рис. 10 показано, відповідно, характеристики переміщення елементів конвеєра зі злежалою гірничою масою та середнього моменту двигуна при заклинюванні в кінці конвеєра.

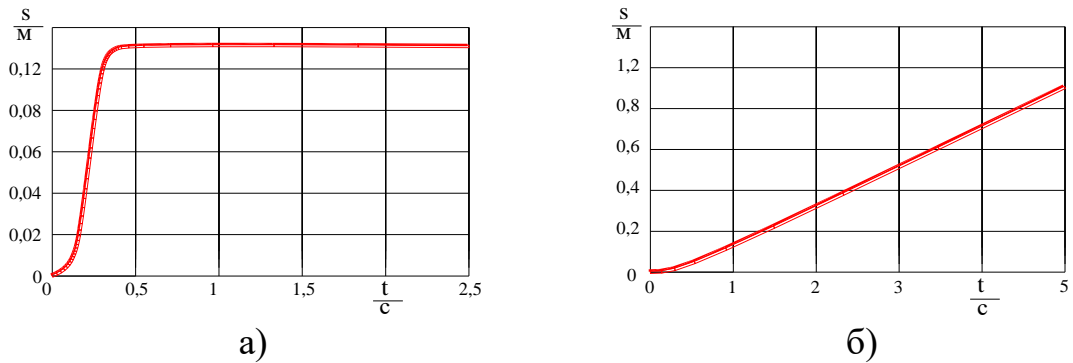


Рис. 9. Переміщення елементів конвеєра зі злежалою гірничою масою: а – живлення двигуна від мережі; б – живлення двигуна від тиристорного перетворювача з СІФУ-3.2

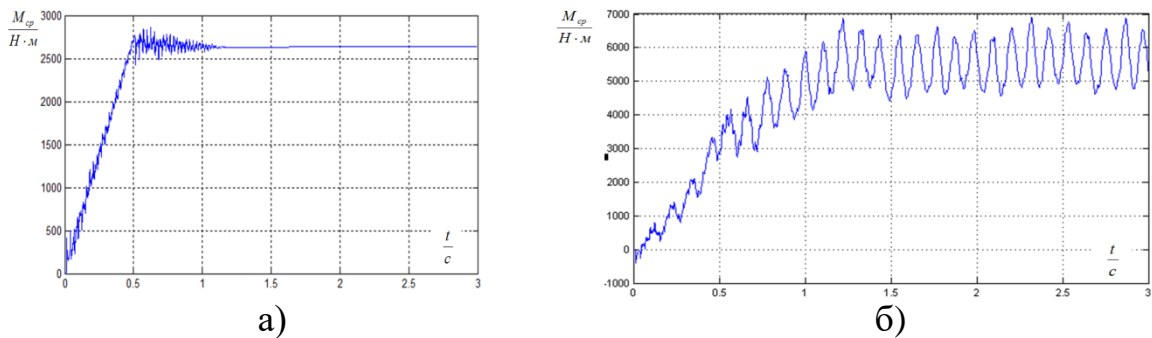


Рис. 10. Крива середнього моменту двигуна при заклинюванні в кінці конвеєра: а – живлення від мережі; б – живлення від тиристорного перетворювача з СІФУ-3.2

Вважаючи, що при розподіленому навантаженні момент опору зростає у міру натягування тягового ланцюга, повне навантаження на двигун сформується тоді, коли він уже обертається й розвиває момент значно більший, ніж при живленні його від мережі.

Ця особливість і результати експерименту дають змогу стверджувати, що використання квазічастотного керування двигуном дозволяє поліпшити пускові якості та здійснити пуск конвеєра зі злежалою гірничою масою.

Дослідження пуску конвеєра після зупинки через заштибовку його в окремому місці показали, що використання квазічастотного керування при пуску заштибованого конвеєра підвищує вірогідність успішного запуску, якщо заклинювання відбувається не ближче, ніж 36 м від двигуна. Аналіз статистичних даних місць заклинювання ланцюгів скребкових конвеєрів свідчить, що заклинювання ланцюгів у середині ланцюга і далі від приводного двигуна становить понад 88 % усіх аварійних зупинок конвеєра, тобто у 88 % випадків квазічастотна система керування дає змогу запустити скребковий конвеєр і тому має переваги перед прямим пуском. Дослідження роботи конвеєра на маневровій швидкості показали, що жодна система імпульсно-фазового керування не забезпечує сталої роботи привода без вживання додаткових заходів. Найпростіший варіант – застосування фільтруючої індуктивності, але застосування цих засобів значно знижує пусковий момент двигуна та підвищує ціну привода. Як показали дослідження двигуна з

СІФУ-3.2, стійку роботу двигуна можна забезпечити, якщо керуючі імпульси подавати на тиристори не у момент проходження лінійної напруги через нуль, а з деяким запізненням. Таке технічне рішення не несе додаткових витрат, а зниження моменту незначне.

На рис. 11 приведено пускові характеристики привода з різним часом запізнювання керуючого імпульсу, при живленні двигуна від СІФУ-3.2.

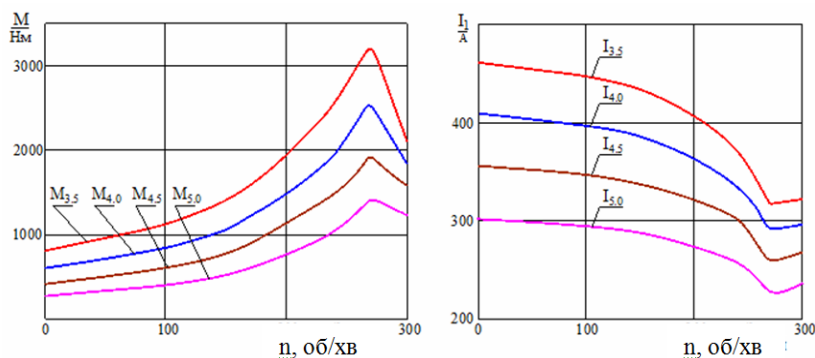


Рис. 11. Характеристики привода при різному часі затримки імпульсу

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що у приводі скребкового конвеєра найбільш доцільно використовувати СІФУ-3.2.

У п'ятому розділі «**Лабораторні випробування привода скребкового конвеєра з квазічастотним управлінням**» подано результати випробування експериментального зразка привода скребкового конвеєра з метою перевірки адекватності розроблених математичних моделей, визначення його пускових властивостей, перевірки стійкості роботи привода під навантаженням на зниженій швидкості при живленні двигуна квазісинусоїдальною напругою.

Випробування системи формування імпульсів СІФУ-3.2, показали, що затримка подачі імпульсів на тиристори забезпечує стійкість роботи привода на зниженій швидкості, що підтверджує можливість реалізації двошвидкісного режиму скребкового конвеєра. При введенні затримки імпульсу на 3,5 мс коливання швидкості обертання ротора відносно номінальної не перевищують 5 %. Система імпульсно-фазового керування забезпечує склад вищих гармонік квазічастотної напруги, у якому 5 і 7 гармоніки мають практично однакові амплітуди, що дає змогу скомпенсувати їх вплив на механічну характеристику електропривода. Шляхом експериментального дослідження макетного зразка підтверджено адекватність запропонованих математичних моделей, як складових комплексної скребкового конвеєра. Рівень похибки визначення пускових струмів не перевищує 3,5 %, пускових моментів – 4 %. Одношвидкісний двигун має кращі показники добротності (зростання в 1,3 раза) і коефіцієнта якості пуску (зростання в 1,4 раза) при квазічастотному керуванні, ніж двошвидкісний двигун. Середній коефіцієнт потужності і ККД електропривода за цикл роботи скребкового конвеєра із використанням одношвидкісного двигуна і квазічастотного керування з урахуванням частих пусків зростають відповідно на 4 та 3 %. При використанні скребкового конвеєра серії СП330 з трьома асинхронними двигунами потужністю 160 кВт річна економія тільки електроенергії становитиме близько 0,5 млн грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих теоретичних і практичних результатів вирішено актуальне науково-прикладне завдання розроблення нових принципів, удосконалення математичних моделей і методів та встановлення на їх основі закономірностей динамічних режимів роботи асинхронного електропривода скребкового конвеєра при квазічастотному керуванні для підвищення експлуатаційних показників асинхронного електропривода скребкового конвеєра.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження дають змогу сформулювати такі висновки.

1. Сучасні приводи скребкових конвеєрів характеризуються низькими показниками надійності, невідповідністю окремих характеристик сучасним вимогам до приводів скребкового конвеєра, що входять до складу вугледобувного комплексу, на який припадає 55 % від загальної тривалості простоїв лави, з них 50 % простоїв відбувається з вини скребкового конвеєра. Пошук та усунення несправностей, пов'язаних із простоем скребкового конвеєра є одним з найбільш трудомістких. Визначено, що єдиним способом підвищення надійності скребкового конвеєра є зниження рівня внутрішньої динаміки його електромеханічної системи, що можливо тільки за рахунок привода з перетворювачем частоти. Перетворювач частоти з ланкою постійного струму має надмірні функції та діапазон регулювання порівняно з вимогами до привода скребкового конвеєра і потребує значних капітальних вкладень. Одним із перспективних шляхів підвищення експлуатаційних показників асинхронного електропривода скребкового конвеєра є повне використання можливостей тиристорних перетворювачів з квазічастотним керуванням.

2. На підставі аналізу умов створення і технічної реалізації двошвидкісного асинхронного частотного електропривода запропоновано й теоретично обґрунтовано принцип формування квазісинусоїдальної напруги в системі живлення одношвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, при якому за допомогою фазоімпульсного керування в системі «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» з мінімальною кількістю елементів переключення забезпечується дискретний зсув вектора магнітного потоку на кут 60 електричних градусів і перехід на стійку зниженої частоти обертання ротора на рівнях $1/3$ і $1/5$ від номінальної.

3. У процесі досліджень математичних та імітаційних моделей низки можливих систем імпульсно-фазового керування запропоновано та обґрунтовано закони квазічастотного керування асинхронним електроприводом скребкового конвеєра у перехідних режимах, в яких гармонічні коливання з дискретно регульованою початковою фазою і оптимальним гармонічним складом симетричної напруги живлення асинхронного двигуна формуються функціями переключення груп тиристорів з розбиттям періоду модуляції, відповідно, на 6 або 10 інтервалів з урахуванням коливань частоти мережі. З урахуванням тенденцій розвитку підземного транспорту найбільш перспективним є варіант, який забезпечує маневрову швидкість за частоти

обертання двигуна 0,2 номінальної з частотою потрібної гармоніки квазісинусоїдальної напруги 10 Гц.

4. Доведено, що вплив ефекту витіснення струму та насичення магнітної системи асинхронного двигуна, який живиться напругою з широким спектром гармонік, істотно впливає на динамічні режими роботи електропривода скребкового конвеєра. Розроблено метод урахування впливу ефекту витіснення струму та насичення магнітної системи в динамічних режимах роботи асинхронного електропривода з використанням параметра «динамічна індуктивність», який визначається чисельним диференціюванням залежності потокозчеплення від струму за результатами моделювання магнітної системи асинхронного двигуна, що дає змогу на основі рівнянь Парка – Горева синтезувати математичну модель асинхронного двигуна зі змінними параметрами і забезпечує підвищення точності визначення параметрів електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів. Зіставлення пускових характеристик промислових зразків двигунів серії ЕДКОФВ за каталожними даними, результатами їх періодичних випробувань із результатами за розробленими математичними моделями показало високу збіжність даних (похибка не перевищує 8 %).

5. Встановлено, що повний струм стрижня може прийматись як інтегральна характеристика насичення магнітної системи і ефекту витіснення струму, інваріантна до розподілу струму по перетину стрижня та до форми паза ротора, що дає змогу визначати пускові характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненою обмоткою ротора при живленні від тиристорних перетворювачів частоти. Перевірка вдосконаленого методу розбиття на шари й визначення опорів стрижня ротора шляхом проведення 150 дослідів для п'яти значень середньої густини струму показала, що насичення магнітної системи двигуна призводить до зміни індуктивних опорів на 40–50 % і збільшення активного опору стрижня у 2–3,5 рази, а розбіжність з експериментальними даними не перевищує 10 %.

6. З використанням розробленої комплексної математичної моделі привода скребкового конвеєра, яка містить удосконалену модель асинхронного двигуна, модель системи імпульсно-фазового керування і модель тягового органу скребкового конвеєра, який, на відміну від уявлення навантаження як матеріальної точки, представлено сукупністю елементів з силами тертя і пружно-дисипативними зв'язками, розроблено оптимальні закони квазічастотного керування, що забезпечують маневрову швидкість, пуск навантаженого конвеєра, його автоматичне розштибування або плавне зупинювання, що дає змогу уникнути пошкодження привода скребкового конвеєра. Середній пусковий момент зростає від 2,3 до 3,85 номінального і залежить від місця заштибовки конвеєра. Показано, що при заклинюванні тягового органу в середині ланцюга і далі від приводного двигуна величина моменту, що розвивається приводом, значно перевищує момент сил опору в місці заштибовки, що забезпечує зрушення тягового органу з місця і розштибування при заклинюванні на відстані більш ніж 0,1 довжини конвеєра від приводної зірочки, що дає змогу уникнути близько 85 % аварійних випадків.

7. Обґрунтовано способи підвищення стійкості роботи привода на зниженій швидкості. Показано, що зниження струму і стабілізація швидкості електропривода досягається шляхом включення послідовно з обмоткою статора фільтруючих індуктивностей або введенням затримки імпульсу в системі імпульсно-фазового керування. При введенні затримки імпульсу на 3,5 мс коливання швидкості обертання ротора відносно номінальної не перевищують 5 %. Система імпульсно-фазового керування забезпечує склад вищих гармонік квазічастотної напруги, у якому 5 і 7 гармоніки мають практично однакові амплітуди, що дає змогу скомпенсувати їх вплив на механічну характеристику електропривода. За допомогою експериментального дослідження макетного зразка підтверджено адекватність запропонованих математичних моделей скребкового конвеєра. Рівень похибки визначення пускових струмів не перевищує 3,5 %, пускових моментів – 4 %.

8. Для інтегральної оцінки якості пускових властивостей привода пропонується ввести коефіцієнт якості пуску, що визначається співвідношенням середніх значень електромагнітного моменту до квадрата струму за період пуску. Одношвидкісний двигун має кращі показники добротності (зростання в 1,3 раза) і коефіцієнта якості пуску (зростання в 1,4 раза) при квазічастотному керуванні ніж двошвидкісний двигун. Середній коефіцієнт потужності й ККД електропривода за цикл роботи скребкового конвеєра з використанням одношвидкісного двигуна і квазічастотного керування з урахуванням частих пусків зростають відповідно на 4 та 3 %. При використанні скребкового забійного конвеєра серії СП330 з трьома асинхронними двигунами потужністю 160 кВт річна економія тільки електроенергії становитиме близько 0,5 млн грн.

9. Отримані практичні результати дисертації рекомендуються до використання та впровадження у галузях з важкими умовами роботи безперервного транспорту. Позитивні результати освоєння нових методик розрахунків, практичне їх застосування при розробленні нових двигунів на Первомайському електромеханічному заводі, який випускає одно- і двошвидкісні вибухобезпечні асинхронні двигуни для скребкових конвеєрів, а також на державному науково-виробничому підприємстві «Фотон» довели економічну доцільність запропонованих рішень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Худобин К. В., Л. Н. Комаревцева Разработка методики определения мощности двигателя центрифуги с заданным моментом инерции, работающей по специальному графику. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2010. Вып. 30. С. 270–279. *(Здобувачем розроблено методіку розрахунку номінальної потужності двигуна по заданому моменту інерції двошвидкісного привода, який працює за спеціальним графіком).*

2. Цодик И. А., Худобин К. В., Бакаев О. В. Испытание асинхронного двигателя в многоскоростном электроприводе. Вестник Национального

технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2011. № 60. С. 74–78. *(Здобувачем розроблено математичну модель і проведено чисельне моделювання у середовищі Comsol).*

3. Цодик І. А., **Худобин К. В.** Определение параметров стержня короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных машин, с помощью полевых расчетов. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2012. Вып. 36. С. 425–429. *(Здобувачем розроблено методику визначення активних і індуктивних опорів стержня короткозамкнутого ротора асинхронного двигуна з урахуванням ефекту витіснення струму та насичення коронок зубців).*

4. Худобин К. В. Применение тиристорного управления в приводе скребкового конвейера. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2012. Вып. 38. С. 303–308.

5. Цодик І. А., **Худобин К. В.** Исследование асинхронного привода с квазичастотным управлением. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2012 № 61. С. 124–128. *(Здобувачем проведено дослідження та обробку їх результатів).*

6. Цодик І. А., **Худобин К. В.** Квазичастотное управление в приводе скребкового конвейера и учет влияния вибраций на работу привода. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2013. № 36. С. 135–136. *(Здобувачем синтезовано математичну модель АД зі змінними параметрами, виконано дослідження СІФУ та здійснено обробку результатів).*

7. Цодик І. А., Худобин К. В. Учет эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной цепи в математической модели асинхронного двигателя. Електротехніка і електромеханіка 2014. № 2. С. 56–59. *(Здобувачем розроблено послідовність знаходження параметрів асинхронного двигуна на основі чисельно-польового моделювання під управлінням Matlab).*

8. Заблудский Н. Н., **Худобин К. В.** Квазичастотное управление – как средство улучшения эксплуатационных качеств скребкового конвейера. Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. 2016. Вып. 1. С. 76–81. *(Здобувачем розроблено, реалізовано і досліджено математичну модель скребкового конвеєра, проведено обробку результатів досліджень).*

**Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародних наукометричних баз даних:**

9. Цодик І. А., **Худобин К. В.** Синтез динамической модели асинхронного двигателя на основе численно-полевых расчетов. Вісник Кременчуцького університету імені Михайла Остроградського. 2013. № 3. С. 16–19. *(Здобувачем синтезовано та досліджено математичну модель асинхронного двигуна, що базується на методі розбиття паза ротора на шари).*

10. Цодик І. А., **Худобин К. В.** Применение квазичастотного управления в приводе скребкового конвейера. Вісник Кременчуцького університету імені

Михайла Остроградського. 2013. № 4. С. 19–22. *(Здобувачем розроблено і досліджено математичну модель різних систем імпульсно-фазового управління та виконану обробку результатів).*

11. Заблодский Н. Н., **Худобин К. В.** Применение квазичастотного управления в двухскоростных приводах. Вісник Кременчуцького університету імені Михайла Остроградського. 2016. Вип. 1. С. 9–14. *(Здобувачем розроблено, реалізовано і досліджено в структурних блоках пакета Matlab/Simulink математичну модель асинхронного двигуна на основі чисельно-польових розрахунків, яка враховує ефект витіснення струму і насичення магнітного ланцюга, проведена обробка результатів досліджень).*

12. Заблодский Н. Н., **Худобин К. В.** Синтез математической модели асинхронного двигателя с учетом геометрии зубцовой зоны ротора. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 240. С. 52–60. *(Здобувачем розроблено, реалізовано і досліджено математичну модель асинхронного на основі удосконаленого способу розбиття стрижня по висоті на шари, випробувальний стенд, проведено обробку результатів математичних та експериментальних досліджень).*

Статті у наукових виданнях інших держав:

13. Худобин К. В. Усовершенствование тягового органа скребкового конвейера. Проблемы недропользования. 2012. Ч. 1. С. 200–203.

14. Худобин К. В. Синтез математической модели асинхронного двигателя с учетом геометрии зубцовой зоны ротора. Электро. 2015. № 3. С. 180–183.

15. Zablodskiy Mykola, Gritsyuk Volodymyr, Yevgen Rudnev, Timofeeva Olga, **Khudobin Konstantin**. Energy Balance of Electromechanical Converters with Common Massive Rotor. Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering. 2017. P. 16–19. *(Здобувачем виконано дослідження енергетичних процесів у електромеханічному перетворювачі двомодульної структури тиристорно-керованого привода гвинтового конвеєра).*

Патенти України на корисну модель:

16. Цодик І. А., **Худобін К. В.**, Бакаєв О. В. Патент 63380 України, МПК(2011.01) H02P 7/00. Багатошвидкісний асинхронний електропривод. № u 2011 02331; заявлено 28.02.2011; опубліковано 10.10.2011. Бюл. № 19. *(Здобувачем запропоновано багато-швидкісний асинхронний електропривод, проведено його дослідження).*

17. Цодик І. А., Бакаєв О. В., **Худобін К. В.** Патент 71485 України, МПК(2012.01) H02P 7/00. Багатошвидкісний асинхронний електропривод. № u2012 00918; заявлено 30.01.2012; опубліковано 10.07.2012. Бюл. № 13. *(Здобувачем запропоновано багато-швидкісний асинхронний електропривод).*

18. Цодик І. А., Бакаєв О. В., **Худобін К. В.** Патент 71487 України, МПК(2012.01) H02P 7/00. Багатошвидкісний асинхронний електропривод. № u2012 00920; заявлено 30.01.2012; опубліковано 10.07.2012. Бюл. № 13.

(Здобувачем запропоновано багато-швидкісний асинхронний електропривод, проведені його дослідження).

Тези наукових доповідей:

19. Цодик І. А., Худобин К. В. Динамическая модель асинхронного двигателя на основе численно-полевых расчетов. Проблемы підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Севастополь, 2012 року: тези доповіді. Севастополь, 2012. С. 85–86. *(Здобувачем розроблено, реалізовано і досліджено математичну модель асинхронного двигуна, яка дозволяє враховувати ефект витіснення струму у динамічних режимах).*

20. Цодик І. А., Худобин К. В. Исследование асинхронного двигателя в тиристорно-управляемом приводе скребкового конвейера. Проблемы підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Севастополь, 2012 року: тези доповіді. Севастополь, 2012. С. 94–95. *(Здобувачем виконано дослідження асинхронного двигуна в тиристорно-керованому приводі скребкового конвеєра, проведено обробку результатів досліджень).*

АНОТАЦІЯ

Худобін К. В. Підвищення експлуатаційних показників асинхронного електропривода скребкового конвеєра. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.03 «Електромеханічні комплекси і системи. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2018.

Дисертацію присвячено питанням підвищення ефективності роботи привода скребкового конвеєра, зниження динамічних навантажень шляхом застосування частотно-регульованого привода з квазічастотним керуванням.

Розроблено математичну модель скребкового конвеєра, складовими частинами якої є: модель перетворювача частоти з квазічастотним керуванням різними системами імпульсно-фазового керування; модель асинхронного двигуна, в основі якої лежить удосконалений метод розбиття стрижня ротора на шари, доповнений чисельно-польовими розрахунками магнітного поля, що дає змогу враховувати ефект витіснення струму та насичення магнітної системи; модель навантаження тягового органу скребкового конвеєра як системи кінцевих елементів, на кожний з яких діє сила тертя і лінійний пружно-дисипативний зв'язок між елементами (скребками тягового органу).

На підставі результатів дослідження моделей запропоновано: закон формування квазісінусоїдальної напруги, який забезпечує найкращі експлуатаційні показники скребкового конвеєра. Виконано експериментальні дослідження макетного зразка привода, які підтвердили адекватність розроблених математичних моделей та довели, що застосування квазісінусоїдальної напруги живлення забезпечує двошвидкісний режим

роботи привода, знижує динамічні навантаження при пуску і в аварійних режимах.

Ключові слова: скребковий конвеєр, квазічастотне управління, математична модель, чисельно-польові розрахунки, динамічна індуктивність, асинхронний двигун зі змінними параметрами, розподілене навантаження.

АННОТАЦІЯ

Худобин К. В. Повышение эксплуатационных показателей асинхронного электропривода скребкового конвейера. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2018.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности работы привода скребкового конвейера, снижения динамических нагрузок путем применения частотно-регулируемого привода с квазічастотным управлением.

На основе анализа условий создания и технической реализации двухскоростного асинхронного частотного электропривода предложен и теоретически обоснован принцип формирования квазисинусоидального напряжения в системе питания односкоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, при котором с помощью фазоимпульсного управления в системе «тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель» с минимальным количеством элементов переключения обеспечивается дискретный сдвиг вектора магнитного потока на угол 60° электрических градусов и переход на устойчивую пониженную частоту вращения ротора на уровнях $1/3$ и $1/5$ от номинальной.

В процессе исследований математических и имитационных моделей ряда возможных систем импульсно-фазового управления предложены и обоснованы законы квазічастотного управления асинхронным электроприводом скребкового конвейера в переходных режимах, в которых гармонические колебания с дискретно регулируемой начальной фазой и оптимальным гармоническим составом симметричного напряжения питания асинхронного двигателя формируются функциями переключения групп тиристоров с разбивкой периода модуляции, соответственно, на 6 или 10 интервалов с учетом колебаний частоты сети. С учетом тенденций развития подземного транспорта наиболее перспективным является вариант, который обеспечивает маневровую скорость при частоте вращения двигателя $0,2$ номинальной с частотой нужной гармоники квазисинусоидального напряжения 10 Гц.

Разработан метод учета влияния эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной системы в динамических режимах работы асинхронного электропривода с использованием параметра «динамическая индуктивность», который определяется численным дифференцированием зависимости потокосцепления от тока по результатам моделирования магнитной системы

асинхронного двигателя, что позволяет на основе уравнений Парка – Горева синтезировать математическую модель асинхронного двигателя с переменными параметрами и обеспечивает повышение точности определения параметров электромагнитных и электромеханических переходных процессов. Сопоставление пусковых характеристик промышленных образцов двигателей серии ЕДКОФВ по каталожным данным, результатами их периодических испытаний с результатами расчетов по разработанным математическими моделями показало высокую сходимость данных (погрешность не превышает 8 %).

Разработана математическая модель скребкового конвейера, составными частями которой являются: модель преобразователя частоты с квазичастотным управлением различными системами импульсно-фазового управления; модель асинхронного двигателя, в основе которой лежит усовершенствованный метод разбиения стержня ротора на слои, дополненный численно-полевыми расчетами магнитного поля, что позволяет учитывать эффект вытеснения тока и насыщение магнитной системы; модель нагрузки тягового органа скребкового конвейера как системы конечных элементов, на каждый из которых действует сила трения и линейная упруго-диссипативная связь между элементами (скребками тягового органа). С использованием комплексной математической модели привода скребкового конвейера разработаны оптимальные законы квазичастотного управления, обеспечивающие маневровую скорость, пуск загруженного конвейера, его автоматическое разштыбровку или плавную остановку. Средний пусковой момент возрастает от 2,3 до 3,85 номинального и зависит от места заштыбровки конвейера. Показано, что при заклинивании тягового органа в середине цепи и дальше от приводного двигателя величина момента, развиваемого приводом, значительно превышает момент сил сопротивления в месте заштыбровки, что позволяет избежать около 85 % аварийных случаев.

Выполненные экспериментальные исследования макетного образца привода подтвердили адекватность разработанных математических моделей, доказали, что применение квазисинусоидального напряжения питания обеспечивает двухскоростной режим работы привода, снижает динамические нагрузки при пуске и в аварийных режимах.

Для интегральной оценки качества пусковых свойств привода предложен коэффициент качества пуска, определяемый соотношением средних значений электромагнитного момента к квадрату тока за период пуска. Односкоростной двигатель с квазичастотным управлением имеет лучшие показатели добротности (рост в 1,3 раза) и коэффициента качества пуска (рост в 1,4 раза) чем двухскоростной двигатель. Средний коэффициент мощности и КПД электропривода за цикл работы скребкового конвейера с использованием односкоростного двигателя при квазичастотном управлении с учетом частых пусков возрастают, соответственно, на 4 и 3 %.

Положительные результаты освоения новых методик расчетов, практическое их применение при разработке новых двигателей на Первомайском электромеханическом заводе, который выпускает одно- и

двухскоростные взрывобезопасные асинхронные двигатели для скребковых конвейеров, а также на государственном научно-производственном предприятии «Фотон» подтвердили экономическую целесообразность предлагаемых решений.

Ключевые слова: скребковый конвейер, квазичастотное управление, математическая модель, численно-полевые расчеты, динамическая индуктивность, асинхронный двигатель с переменными параметрами, распределенная нагрузка.

ANNOTATION

Khudobin K. V. Improving the performance of asynchronous electric drive of scraper conveyor. – The Manuscript.

Thesis for scientific degree of a candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 «Electromechanical Complexes and Systems». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2018.

Dissertation is devoted to the issues of improving the efficiency of drive of scraper conveyor, for the reducing of dynamic loads through the use of variable frequency drive, with quasi-frequency control regulation of supply voltage.

A mathematical model of the scraper conveyor, components of which are: the model of the asynchronous motor on the basis of an improved method for the decomposition of the rotor shaft into layers, supplemented by numerical-field calculations of the magnetic field, which enables to take into account the effect of current displacement, and saturation of the magnetic system; models of different variants of formation voltage, which are provided corresponding pulse-phase control pulse phase control systems thyristors; load model traction organ scraper conveyor as a system of finite elements, each of which operates the friction force and the linear elastic-dissipative coupling between the elements – scrapers drawbar organ.

The work proposed and justified: the quasi-sinusoidal voltage formation laws, which provide the best performance of the drive; the study its effect on engine start-up process after jamming of drawbar organ; methods of improving the stability of the drive on reduced speed of movement of the drawbar organ and developed requirements for the pulse phase control systems.

Were done experimental studies of the sample of model drive, which confirmed the adequacy of the developed mathematical models, and were established that the use of quasi-sinusoidal power supply provides two-speed drive mode, reduced the dynamic loads at startup and during emergency modes of works.

Key words: scraper conveyor, quasi frequency control, mathematical model, numerical-field calculations, dynamic inductance, asynchronous motor with variable parameters, distributed load.