

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Морозов Дмитро Іванович

УДК 62-83: 622.732: 681.5

**СИНТЕЗ РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Алчевськ Луганської обл.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Шевченко Іван Степанович,
Донбаський державний технічний університет,
м. Алчевськ, професор кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпродзержинський державний технічний університет,
м. Дніпродзержинськ, проректор з наукової роботи

кандидат технічних наук
Худяєв Олександр Андрійович,
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків,
доцент кафедри систем управління технологічними
процесами і об'єктами

Провідна установа – **Національний гірничий університет**
Міністерства освіти і науки України, м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться “ 2 ” листопада 2006 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті ”Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету ”Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 14 ” вересня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Робота електропривода дробарки супроводжується випадковим характером зміни струму. У цьому випадку електропривод є джерелом пульсацій струму і спотворень напруги, що впливають на енергосистему і її елементи. При аналізі процесів змінення струмів при роботі досліджуваної дробарки ДМ1500х1500 з'ясувалося, що в окремі моменти сплески амплітуд струмів статора досягають 30% від номінального струму. Крім спотворення живильної напруги, пульсації струмів викликають перегрівання елементів щіткового механізму. Зокрема, при експлуатації дробарок двигуни періодично виходять з ладу внаслідок відпаювання обмоток ротора від контактних кілець.

З огляду на те, що для привода досліджуваної молоткової дробарки застосований асинхронний двигун з фазним ротором, що є універсальним електромеханічним перетворювачем, то є можливість побудувати на його базі привод з можливістю регулювання реактивної потужності, це тим більше доцільно, якщо врахувати, що потужність привода, що розглядатиметься, складає 630 кВт.

У даній роботі розглядаються питання поліпшення якості споживання енергії, що є актуальним напрямком технічного удосконалення електроустаткування. Одним із способів зменшення низькочастотних пульсацій струму при роботі дробарки є застосування спеціальних алгоритмів керування перетворювачем і, отже, електроприводом. Іншими словами – фільтрація низькочастотних пульсацій струмів статора (і ротора) за допомогою електропривода. Це цілком можливо за рахунок погіршення якості стабілізації швидкості, що припустимо для дробарок, до електроприводів яких не висувається жорстких вимог.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з науковою тематикою кафедри АЕМС ДонДТУ „Розробка систем оптимального релейного керування електроприводами постійного і змінного струму”. Запропоновані засоби побудови систем векторного керування, а також методи аналізу роботи перетворювача живлення обмоток ротора були використані при виконанні держбюджетної НДР №127 “Розробка елементів теорії та принципів побудови ефективних електронних і електромеханічних систем перетворення параметрів електричної енергії” (ДР №0103U002536, 2004–2006 рр.), в якій здобувач є виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є поліпшення якості споживання струмів асинхронними електроприводами механізмів з випадковим характером навантаження шляхом застосування алгоритмів релейного векторного керування, що забезпечують знижену амплітуду низькочастотних пульсацій струму і можливість регулювання реактивної потужності. Дослідження виконані на основі електропривода молоткової дробарки, побудованого на базі машини подвійного живлення.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

– дослідження і статистичний аналіз показників роботи молоткової дробарки. Розробка моделі формування сигналу моменту опору дробарки;

– розробка алгоритмів релейного керування контуром швидкості системи електропривода як фільтра випадкового процесу навантаження;

– синтез класичних полеорієнтованих систем векторного керування асинхронним електроприводом дробарки за ротором, що дозволяють знизити низькочастотні пульсації струмів двигуна і регулювати реактивну потужність, споживану приводом. Розробка спрощеної системи векторного керування, що не поступається класичним у плані забезпечення статистичних і енергетичних властивостей. Статистичний аналіз пульсацій струмів статора при роботі цих систем;

– вибір типу силової частини перетворювача частоти в ланцюзі ротора і параметрів її елементів. Експериментальна перевірка отриманих алгоритмів керування на лабораторному макеті.

Об'єктом дослідження є процеси, що виникають в електроприводі з випадковим характером навантаження.

Предметом дослідження є асинхронний електропривод молоткової дробарки, побудований на базі машини подвійного живлення (МПЖ).

Методи дослідження. При рішенні поставлених задач використовувалися концепція зворотних задач динаміки керованих систем (метод релейного модального керування), методи теорії систем, стійких при необмеженому збільшенні коефіцієнта підсилення, методи цифрового моделювання і чисельного вирішення систем диференціальних рівнянь. Аналіз показників роботи молоткової дробарки проведено методами теорії імовірностей і математичної статистики. Для уточнення параметрів силової частини перетворювача живлення роторних ланцюгів застосовано методи імітаційного моделювання електропривода.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

– стосовно асинхронних керованих за ротором електроприводів дробарок вперше показана можливість використання релейної системи векторного керування для зниження низькочастотних пульсацій амплітуд струмів статора і ротора;

– розроблено методику побудови системи регулювання швидкості з релейним модальним керуванням, що має оптимальні фільтруючі властивості за критерієм мінімуму площі амплітудно-частотної характеристики каналу струм навантаження – струм ротора, за рахунок побудови внутрішнього контуру струму за принципом компенсації;

– запропоновано новий спосіб побудови системи векторного керування, орієнтованої за узагальненим вектором напруги статора, зі стабілізацією індуктивної складової струму намагнічування, і методика синтезу алгоритмів релейного модального керування в такій системі.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані системи релейного

векторного керування електроприводом, рекомендації з їхнього вибору, а також методи синтезу релейних керувань, що забезпечують найкращу фільтрацію струмів при дії змінного навантаження, можуть бути застосовані розробниками при проектуванні електроприводів з випадковим характером моменту опору, зокрема у вугільній та теплоенергетичній галузях. Методи аналізу роботи перетворювача при релейному керуванні можуть бути використані для вибору виду перетворювача при побудові енергетично ефективних асинхронних електроприводів, керованих за ротором.

Результати дисертаційної роботи передані для впровадження і використання на ВАТ «Алчевськкокс» (м. Алчевськ). Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ) при курсовому і дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. У розробці наукових результатів, винесених на захист, здобувачем особисто зроблено:

– розроблено методику визначення параметрів формуючого фільтра випадкових процесів, з використанням якої отримано математичну модель формування сигналу моменту опору, а також розроблено математичну модель асинхронної машини, придатну для використання разом з моделями перетворювача в роторному ланцюзі;

– запропоновано використання фільтруючих властивостей релейних систем електропривода для згладжування пульсацій викликаних змінами моменту опору та спосіб побудови релейної системи векторного керування при якому забезпечується найкраща фільтрація струмів;

– синтезовано керування в релейних полеорієнтованих системах векторного керування, методом релейного модального керування, а також досліджено вплив середньгеометричного кореня підсистеми регулювання швидкості на статистичні показники цих систем у цілому;

– запропоновано спрощену систему векторного керування за ротором, що дозволяє з одного боку, забезпечити фільтрацію струмів статора, а з іншого – регулювання споживаної реактивної потужності приводом в цілому;

– проведено експериментальне дослідження системи векторного керування, орієнтованої за узагальненим вектором напруги статора, з релейними керуваннями, синтезованими за запропонованим алгоритмом.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2003 – 2004 р.р.), «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта 2005 р.), на наукових семінарах Національної академії наук України «Динаміка автоматизованих електромеханічних систем» (м. Алчевськ, 2003 – 2005 р.).

Публікації. Основні результати роботи відображено у 16 наукових працях, з них 14 – у фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів, висновків і 8 додатків. Повний обсяг дисертації складає 277 сторінок, з них 17 ілюстрацій та 8 таблиць по тексту, 47 ілюстрацій та 8 таблиць на 49 сторінках; 8 додатків на 77 сторінках; 214 найменувань використаних літературних джерел на 22 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, наукову новизну та практичну цінність роботи; показано зв'язок теми дисертації з науковими програмами; сформульовано мету роботи та задачі, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети.

В **першому розділі** розглянута технологія вуглепідготовки на коксохімічних підприємствах. Було встановлено, що зменшення швидкості ротора молоткової дробарки на 10-15% не приведе до істотного зниження продуктивності і якості помелу вугільної шихти. Показано необхідність зниження пульсацій струмів, що споживаються дробаркою як з точки зору енергетики, так і з метою збільшення надійності щіткового механізму.

В результаті аналізу систем керування асинхронним двигуном за ротором, проведеним у даному розділі, було показано, що врахувати динамічні властивості об'єкта і сформувати повноцінне керування асинхронним електроприводом можна в системах векторного керування. У даному розділі показано, що в системах векторного керування доцільно використовувати релейні керування, тому що такі системи мають властивості квазіінваріантності до координатних і параметричних збурень. Ця властивість дозволяє спростити структури систем векторного керування і синтезувати керування в каналах регулювання активної і реактивної потужності роздільно.

Керування синтезовано методом релейного модального керування, заснованого на застосуванні концепції зворотної задачі динаміки і довизначення Долголенко Ю.В., тому що системи з таким керуванням забезпечують наперед задану динаміку.

Аналіз систем керування об'єктами, з випадковими збуреннями, показав, що в даний час немає алгоритмів оптимальної фільтрації, які б ґрунтувалися не на інформації про спектральну функцію сигналу збурення, а автоматично робили би фільтрацію цього впливу, незалежно від виду його характеристик. Крім того, у літературі не розглядаються питання забезпечення оптимальних фільтруючих властивостей в системах з релейним керуванням.

У **другому розділі** розглянута робота молоткової дробарки. Виявлено, що зміни моменту інерції та коливання молотків враховувати немає необхідності, а робота дробарки може бути промодельована роботою механізму з відповідним моментом опору.

Для визначення моделі сигналу моменту опору були досліджені процеси змінення ампліту-

ди струму статора. Вважаючи процес стаціонарним, із процесу, що спостерігається, була виділена ділянка, яка і піддавалася статистичному дослідженню (рис.1). Результати дисперсійного аналізу процесу зміни амплітуди струму статора наступні: середнє значення – 88,46 А (84,5% від номінального); середньоквадратичне відхилення центрованої складової – 2,7%. Кореляційна функція і функція спектральної щільності отримані за допомогою функцій пакета Statistics Toolbox середовища MATLAB, приведені на рис. 1. Середній час кореляції складає 0,254 с.

Рис. 1. Реальний процес зміни амплітуди струму статора, кореляційна функція і функція спектральної щільності його центрованої складової

У **третьому розділі** розроблена математична модель асинхронного двигуна, а також на підставі аналізу результатів моделювання роботи двигуна з сумарним моментом інерції системи, знайдена модель формування сигналу моменту опору.

Для моделювання привода з асинхронним двигуном керованим за ротором модель двигуна повинна дозволяти одержати в чистому виді е.р.с., що наводяться в обмотках ротора. Цього досягнуто побудовою моделі в координатах стану $\Psi_S - I_R$. Координати статора і ротора моделюються у «власних» триосьових просторових системах координат. В основу моделі двигуна покладений стандартний математичний опис на базі рівнянь рівноваги напруг статора і ротора, і вираз для електромагнітного моменту. Записавши вихідні рівняння через координати $\Psi_S - I_R$ у формі Коші, одержимо математичну модель електричної частини асинхронної машини (АМ):

де $\mathbf{u}_S, \mathbf{u}_R$ – вектори-стовбці миттєвих значень напруг, що прикладаються до обмоток статора і ротора.;

\mathbf{i}_R, Ψ_S – вектори-стовбці миттєвих значень струмів роторних і потокозчеплень статорних обмоток;

\mathbf{e}_R – вектор миттєвих значень е.р.с., що наводяться в обмотках ротора

;

$\mathbf{D}\Psi_S$ – вектор похідних від потокозчеплень статора.;

ω_E – електрична швидкість обертання ротора, $\omega_E = p\Omega$;

R_S, R_R – активні опори обмоток фаз статора та ротора;

L_S, L_R, σ – повні індуктивності обмоток статора та ротора, коефіцієнт розсіювання за Блонделем;

\mathbf{M}_A – матриця взаємних індуктивностей між обмотками статора та ротора

,

M_{12} – максимальне значення взаємної індуктивності між обмотками статора та ротора,

A_C – матриця коефіцієнтів геометричного перетворення (розміром 3×3), що містить косинуси вуглів просторового положення між відповідними обмотками статора та ротора;

M_B – матриця взаємних індуктивностей, ортогональних до коефіцієнтів матриці M_A (містить взаємну індуктивність та синуси відповідних вуглів).

Електромагнітний момент у рівнянні руху формується так:

На підставі одержаного математичного опису складені структурна (у середовищі Simulink/MATLAB) та імітаційна (реалізована у середовищі Pspice/OrCad) моделі привідного асинхронного двигуна типу АК4-450 ($P_H = 630$ кВт, $n_H = 980$ об/хв, $E_{2H} = 680$ В).

Модель сигналу моменту опору сформована як сума детермінованої складової і випадкової складової, отриманої як вихідний сигнал фільтра першого порядку на вхід якого поданий сигнал типу «білий шум». Параметри моделі (сердній момент опору, коефіцієнт підсилення та постійну часу фільтра, що формує випадкову складову) визначалися за розробленою методикою шляхом багаторазового моделювання роботи дробарки та порівнянні статистичних оцінок (середнього значення, дисперсії та середнього часу кореляції) процесів змінення амплітуд струмів статора реального та отриманого при моделюванні.

Постійна часу формуючого фільтра $T_{ff} = 0,02$ с. При впливі моменту опору, сформованого моделлю, будуть збігатися не тільки числові оцінки реального і модельного процесів змінення амплітуди (модуля узагальненого вектора) струму статора, але і частотні властивості цих сигналів. Однаковість законів розподілення ймовірностей двох процесів змінення струму доказана за критерієм однорідності Смирнова.

Одержаний процес моменту опору має наступні характеристики й оцінки: середнє значення – 81,8% від номінального моменту; середньоквадратичне відхилення – 15,7% від середнього значення.

У **четвертому розділі** синтезовано релейні керування у полеорієнтованих системах векторного керування, запропоновано спосіб синтезу релейних керувань, що додають системі найкращих властивостей фільтрації струмів, зроблено статистичний аналіз даних систем. Розглянуто системи з трьома способами орієнтації: за узагальненими векторами потокозчеплення статора, ротора і головного потокозчеплення.

Структура асинхронної машини як об'єкта керування отримана, розглядаючи координати стану АМ у проєкціях на осі ортогональної просторової системи координат, одна з осей якої обертається разом з вектором опорного потокозчеплення. Об'єкт являє собою дві перехресно зв'язаних системи – системи регулювання активної і реактивної потужності. Властивості релейних систем

керування дозволяють розглядати ці два підоб'єкта другого порядку незалежно одне від одного за умови наявності в системі ресурсу керування.

Відповідно до процедури релейного модального керування в системі стабілізації модуля поточкозчеплення статора (ССП-С), сигнали, що використовуються для керування, отримані як у просторі основної координати і її похідної, так і в просторі природних координат:

''

де;

x_1, x_2 – модуль поточкозчеплення статора і реактивний струм ротора () у відносних одиницях;

ω_{01} – середньгеометричний корінь (СГК), що прийнятий при синтезі керувань;

a_{11}, a_{12} – елементи матриці стану об'єкта керування;

U_m – максимальне значення фазної напруги роторного перетворювача.

З-за того, що до електропривода дробарки не висувається вимог точності, то для дослідження прийнято керування з використанням природних координат.

Об'єкт керування в підсистемах стабілізації модулів поточкозчеплень ротора і головного поточкозчеплення (ССП-Р, ССП-Г) також має другий порядок, однак містить форсуючу складову, тобто має розривну праву частину. У дисертації доведено, що ці підсистеми можуть розглядатися як об'єкти першого порядку, і релейні керування в цьому випадку будуть мати найпростіший вигляд:

,

де x_1^* і x_1 – задане і реальне значення модулів поточкозчеплень ротора і головного поточкозчеплення у відносних одиницях.

З-за того, що електромагнітний момент створюється активним струмом ротора, то пульсації моменту навантаження відбиваються на відповідній зміні насамперед активного струму. Тому досягти мети керування можна, знизивши пульсації активної складової струму ротора, сформувавши відповідним чином керування в підсистемі регулювання швидкості (СРШ). У роботі розглянуто два способа побудови керувань.

Процедура синтезу керувань методом релейного модального керування для підсистем регулювання швидкості однакова, тому що об'єкт описується системою диференціальних рівнянь другого порядку з коефіцієнтами, які незначно розрізняються, в залежності від обраного опорного поточкозчеплення.

Бажаний характеристичний поліном (відповідно до процедури, порядку $n-1$):
 $Q_\omega(p) = \omega_{02}^{-1}p + 1$, де ω_{02} – прийнятий СГК СРШ.

Керування в просторі природних координат:

$$u = U_m \text{sign} \left[(x_1 - x_1^*) + h_2 x_2 \right], \quad h_2 = q_1 c_{12} < 0, \quad q_1 = \omega_{02}^{-1}. \quad (1)$$

c_{12} – коефіцієнт з матриці динаміки об'єкту крування в СРШ.

Передавальна функція (ПФ) активний струм ротора – струм навантаження при застосуванні керування в просторі природних координат являє собою фільтр першого порядку з заданою при синтезі динамікою:

З точки зору статичних властивостей система має статизм за навантаженням. Таким чином, першим способом побудови керування в каналі регулювання активної потужності є релейне модальне керування в просторі природних координат (1).

Другим запропонованим способом оптимізації системи регулювання швидкості є застосування в базовій системі з релейним керуванням додаткового каналу компенсації відхилення сигналу активного струму від середнього значення. Для формування сигналу компенсації виділяється центрована складова випадкового сигналу активного струму ротора. У свою чергу математичне очікування $\bar{i}_{RV}(t)$ одержано шляхом фільтрування сигналу $i_{RV}(t)$, для чого застосовано фільтр першого порядку зі сталою часу T_F . Таким чином, центрований сигнал виділяється наступною ланкою

, або.

З урахуванням компенсуючого впливу з коефіцієнтом a_2 повна передавальна функція сигналу зворотного зв'язку за струмом буде визначатися наступною ПФ

$$W_i(p) = \frac{1}{i_{RVm}} \left(h_2 + \frac{a_2 T_F p}{T_F p + 1} \right) = \frac{h_2}{i_{RVm}} \left(\frac{T_2 p + 1}{T_1 p + 1} \right), \quad (2)$$

де T_1 – стала часу фільтра, $T_1 = T_F$; a_2 – коефіцієнт впливу зв'язку, що компенсує, $a_2 < 0$; $T_2 = (1 + a_2 / h_2) T_F$, причому $T_2 > T_1$.

Застосувавши до отриманої релейної системи довизначення Долголенко Ю.В., одержано передатну функцію струм навантаження – струм ротора

$$W_{i_{RV}, -I_C} = \frac{T_1 p + 1}{q_1 T_2 p^2 + (q_1 + T_1) p + 1}. \quad (3)$$

Як видно з (3), характеристичне рівняння

$$M(p) = q_1 T_2 p^2 + (q_1 + T_1) p + 1. \quad (4)$$

містить три параметри, причому q_1 – приймається і відповідає прийнятому СГК СРШ, T_1 – стала часу фільтра, що приймається за умови найкращого формування середнього значення струму. Стала часу T_2 визначається з умови надання системі найкращих фільтруючих властивостей.

Відповідно до теореми Хінчина-Вінера і закону перетворення характеристик випадкового

сигналу в частотній області можна сказати, що для забезпечення мінімальної дисперсії вихідного сигналу (i_{RV}) АЧХ ПФ $W_{i_{RV}, -I_C}$ повинна мати мінімальну площу

де $S_{I_C}(\omega)$ – функція спектральної щільності сигналу струму навантаження.

Мінімальну площу АЧХ мають фільтри з біноміальним розподілом полюсів. Таким чином, стала T_2 визначається з умови рівності (4) і

де T_B – еквівалентна стала часу біноміального розподілення.

$$\text{Так } T_B = \sqrt{q_1 T_2}, \quad T_2 = (q_1 + T_1)^2 / 4q_1.$$

Таким чином, на підставі q_1 і T_1 можна визначити T_2 . Аналіз частотних властивостей ПФ $W_{i_{RV}, -I_C}$ показав, що при співвідношенні $T_1 < 3,16q_1$, АЧХ ПФ (3) не мають максимумів, більших за одиницю. Таким чином, коефіцієнт каналу, що компенсує, у системі з релейним керуванням запропоновано визначати, задаючись необхідними динамічними властивостями замкненої системи в цілому.

Аналіз статистичних параметрів запропонованих систем було проведено шляхом оцінки результатів їх структурного моделювання в середовищі Simulink/MATLAB. На рис.2,а приведені залежності дисперсій модуля струму статора (приведеного до ротора, $k_I=8,38$) у СВУ з СРШ без каналу, що компенсує (при моделюванні прийнято, що потужність перетворювача в роторному ланцюзі дорівнює 100 кВт). Залежності $D_{|I_S|}(\omega_{02})$ в системах, орієнтованих за векторами $\vec{\Psi}_0$ і $\vec{\Psi}_R$, мають такий же характер із практично такими ж значеннями дисперсії при $\omega_{02}=1\text{c}^{-1}$, і 1000 A^2 та 1100 A^2 при $\omega_{02}=100\text{c}^{-1}$ відповідно. У розглянутих системах дисперсії модулів струмів статора зменшені в ~ 2 рази порівняно з роботою двигуна без системи регульованого електропривода (при короткозамкненому роторі).

При наявності зв'язку, що компенсує, у СРШ залежності дисперсій від ω_{02} СГК також мають однаковий характер (рис.2,б). Однак мінімальні дисперсії в такій системі нижче в порівнянні з попереднім варіантом.

Для застосування запропонованого способу фільтрації, на відміну від класичних методів, не потрібно знання спектральної або кореляційної функцій випадкового процесу. Такий спосіб побудови системи і синтезу релейного керування можна рекомендувати для приводів з випадковим або з різко-змінним навантаженням при відсутності обмежень на стабільність швидкості.

а)

б)

Рис.2. Залежності дисперсії модуля струму статора у СВУ-С:

а) при варіації SGK СРШ (ω_{02}) і різних SGK ССП (ω_{01});

б) з каналом, що компенсує, при $\omega_{01}=100\text{с}^{-1}$ і варіації ω_{02}

Доказано, що вибір опорного вектора потокозчеплення не додає системам переваг у плані кращої фільтрації збурюючого впливу у вигляді сигналу моменту навантаження.

У цілому розглянуті системи мають низькі енергетичні показники з-за певної залежності коефіцієнта потужності статорного ланцюга від величини завдання на модуль потокозчеплень. Для можливості роботи машини як універсального перетворювача енергії ці системи повинні бути доповнені вузлами контролю реактивної складової струму статора і регуляторами, що коригують сигнал завдання на величину модуля опорного потокозчеплення.

У **п'ятому розділі** запропонована система векторного керування, орієнтована за вектором напруги статора (СВУ-Н) зі стабілізацією індуктивної складової струму намагнічування. Ця система має більш просту структуру і дозволяє регулювати (стабілізувати) розподіл реактивної енергії.

Теоретичне обґрунтування такої системи базується на розгляді опису АМ у проекціях координат стану $\Psi_S - I_R$ на ортогональні осі просторової системи координат, пов'язаної з узагальненим вектором напруги статора. Можливість регулювання реактивної складової струму статора шляхом зміни реактивної складової струму намагнічування можна довести розглянувши вираз для вектора струму статора в комплексному вигляді, вважаючи дійсну складову вектора струму намагнічування постійною і номінальною. Одержана таким чином залежність буде лінійною: при збільшенні $\text{Im}(\vec{I}_0)$ реактивна складова струму статора буде змінюватися у бік «випередження».

Система містить два релейних регулятори (рис.3): регулятор струму намагнічування (РСН) і регулятор швидкості (РШ). Регулювання енергетичного режиму здійснюється формуванням відповідного завдання (I_{0V}^*). Релейне керування реактивної складової струму ротора має найпростіший вигляд

тому що об'єкт керування в цьому випадку може бути представлений об'єктом першого порядку. Синтез керувань у СРШ не відрізняється від керувань у полеорієнтованих СВУ припустивши, що проекція вектора потокозчеплення статора на уявну вісь незмінна.

Рис.3. Функціональна схема СВУ, орієнтованої за вектором напруги статора

Фільтруючі властивості запропонованої системи також оцінювалися, аналізуючи результати моделювання системи в середовищі Simulink/MATLAB. Аналізувалася ділянка тривалістю 20 с.

За показниками роботи системи без компенсуючого зв'язку (рис.4,а), можна сказати: мінімальне значення дисперсії модуля струму статора для досліджуваного діапазону СГК у 7,6 рази менше порівняно з мінімальними дисперсіями класичних СВУ, і в 15,5 раз порівняно з показниками роботи двигуна без системи керування за ротором, і має місце при $\omega_{02}=1\text{с}^{-1}$. Це обумовлено меншою величиною високочастотних пульсацій струму. Крім того, істотною позитивною особливістю досліджуваної СВУ є відсутність прямого впливу переключень регуляторів на пульсації модулів поточкозчеплень.

При наявності каналу, що компенсує, у СРШ залежність дисперсій від СГК має зростаючий характер (рис.4,б). Наявність каналу, що компенсує, у СРШ забезпечує поліпшення статистичних показників при однакових q_1 . Значення дисперсій у розглянутій системі в ≈ 6 разів менше порівняно з полеорієнтованими СВУ.

а)

б)

Рис.4. Залежності дисперсій модуля вектора струму статора у СВУ-Н від СГК СРШ:

а) без каналу, що компенсує, при різних енергетичних режимах (у статорі);

б) із каналом, що компенсує, при різних T_1 і активному струмі статора

У результаті проведених досліджень можна сказати, що запропонована система векторного керування має наступні властивості: характеризується зниженим рівнем високочастотних пульсацій проєкцій струмів і струмів фаз статора, що викликані перемиканнями силових ключів; дозволяє знизити середньоквадратичне відхилення активного струму статора в 2,56 рази порівняно з полеорієнтованими СВУ, і в 3,66 рази порівняно з відхиленням струму при роботі дробарки без системи регульованого електропривода; дозволяє регулювати реактивну енергію, споживану приводом та має спрощену структуру в порівнянні з полеорієнтованими системами.

У шостому розділі наведено результати технічного пророблення й експериментального дослідження на лабораторному макеті системи векторного керування, орієнтованої за напругою статора, проаналізована економічна ефективність впровадження пропонованої системи електропривода.

З огляду на те, що за технологічними вимогами дробарка повинна працювати при швидкості близької до номінальної роторний перетворювач доцільно будувати як інвертор напруги. Імітаційне моделювання показало, що необхідна потужність перетворювача визначається робочою швидкістю привода й енергетичним режимом. Так, при робочій швидкості що дорівнює 0,95 від синхронної, для трьох режимів збудження: збудження з боку статора ($\cos \varphi_{S1}$); чисто активного струму статора ($\cos \varphi_{S2} = 1$) і ємнісного струму статора з $\cos \varphi_{S3} = \cos \varphi_{S1}$, значення необхідної по-

тужності роторного перетворювача відповідно дорівнюють 33,4 кВт, 54,8 кВт і 122,3 кВт.

Лабораторна установка (рис.5) містить: мікродвигун та диференціальний сельсин НЭД 101 (M1, M2); тахогенератор 2,5 ТПП-4 (BR); двигун постійного струму СЛ-369 (M3), що використаний як навантажувальна машина; перетворювач частоти, побудований на IGBT-транзисторах, що містить драйвер формування керування транзисторів, конденсатор напруги проміжного контуру і систему силового живлення постійного струму; керуючу ПЕОМ на базі IBM PC – сумісного комп'ютера; встановлену в ПЕОМ багатофункціональну плату збору, обробки даних і керування PCI-1711; буферні схеми і схеми узгодження, до складу яких входять модулі нормалізації аналогових і дискретних сигналів з гальванічним розв'язуванням; лабораторний автотрансформатор і некерований випрямляч для одержання напруги проміжного контуру постійного струму.

Сельсин (M2) використаний як датчик положення ротора двигуна (загального вала установки). Кутове положення ротора відносно положення узагальненого вектора напруги визначається на підставі сигналів е.р.с., що наводяться в обмотках ротора при збудженні статора трифазною системою напруг.

Перетворювач частоти U2 містить міст IGBT-транзисторів типу IRG4BC20UD, драйвер DC1 формування керувань транзисторами типу IR2136 і систему гальванічної розв'язки UZ керуючих сигналів.

Керовані ключі K1 і K2 дозволяють сформувати навантаження з випадковою складовою (бінарною).

Розрахунок керуючих впливів реалізовано в пакеті MATLAB із застосуванням середовища структурного моделювання Simulink та Real Time Workshop (RTW). Релейні сигнали керування формуються на цифрових виходах плати PCI-1711.

При лабораторних дослідженнях доведена здатність відпрацювання приводом заданої діаграми зміни швидкості і регулювання енергетичного режиму привода та підтверджена адекватність використаного математичного описання об'єкту керування. Окремим дослідженням є перевірка фільтруючих властивостей привода. На рис.6 наведено процеси прийому навантаження при різних СГК СРШ (при забезпеченні чисто активного струму статора). Розгін проводився до третини від синхронної швидкості – 1000 об/хв. Видно, що вигляд процесів і статизм системи відповідають прийнятним середньгеометричним кореням.

Економічна ефективність застосування запропонованої системи електропривода може бути забезпечена, в основному, за рахунок зменшення кількості капітальних ремонтів силового устаткування, зокрема – ротора двигуна. Аналіз ціни перетворювача і собівартості ремонту двигуна показав, що впровадження привода окупиться за один термін між капітальними ремонтами.

Рис.5. Функціональна схема лабораторної установки

а)

б)

в)

Рис.6. Процеси змінення швидкості й активного струму ротора при СГК СРІШ рівних 10 c^{-1} (а), 40 c^{-1} (б), 100 c^{-1} (в)

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі побудови релейних систем векторного керування асинхронними машинами за ротором для механізмів, з випадковим характером навантаження на прикладі молоткової дробарки. Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному:

1. На підставі аналізу роботи молоткової дробарки показано, що поліпшення енергетичних показників можливо за рахунок погіршення статичних властивостей привода і збільшення амплітуди пульсацій швидкості ротора дробарки, що за технологічними вимогами цілком припустимо.

2. Розроблено методику визначення параметрів формуючого фільтра процесів, що мають випадкову складову, з використанням якої на підставі статистичних показників процесу змінення струму статора, знайдено параметри моделі формування сигналу моменту опору розглянутої дробарки. Процес моменту опору містить детерміновану і випадкову складові.

3. Запропоновано спосіб побудови системи релейного керування каналом активної енергії систем векторного керування, що полягає в застосуванні зв'язку, що компенсує, по струму й оптимізації системи в цілому таким чином, щоб розподілення коренів замкненої системи було біноміальним. Підтверджено, що такі системи мають кращі статистичні показники.

4. Визначено, що вибір опорного вектора при побудові полеорієнтованих систем векторного керування не дає системам переваг у плані поліпшення фільтрації низькочастотних пульсацій струмів при дії змінного навантаження.

5. Запропонована система векторного керування, орієнтована за вектором напруги статора, регулювання реактивних складових струмів у якій відбувається зміною реактивної складової струму намагнічування. Показано, що застосування відповідних релейних керувань у даній системі дозволяє знизити середньоквадратичне відхилення активного струму статора в 2,56 рази в порівнянні з відхиленням струму у СВУ, орієнтованих за векторами поточозчеплень і в 3,66 рази в порівнянні з показниками роботи дробарки без системи регульованого привода.

6. Показано, що силову частину роторного перетворювача в електроприводах, що працюють на швидкостях близьких до синхронної, має сенс будувати як інвертор напруги. При роботі з незначним ковзанням (до 5%) потужність роторного перетворювача може бути істотно знижена. У

розглянутому випадку, рекомендована потужність роторного перетворювача, що дозволяє забезпечити роботу системи з одиничним «косинусом фі» у статорних ланцюгах складає 54,8 кВт (при потужності двигуна 630 кВт) з величиною напруги проміжного контуру, рівної 76 В.

7. Шляхом співставлення результатів математичного моделювання та експерименту підтверджена правильність методик розрахунку релейних керувань, доведена можливість побудови запропонованої системи, орієнтованої за вектором напруги статора і її здатність регулювати споживану реактивну потужність.

8. Результати дисертаційної роботи використовуються на ВАТ «Алчевськкокс» (м. Алчевськ), а також у навчальному процесі Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шевченко И.С., Карпук И.А., Морозов Д.И. Цифровое моделирование асинхронной машины в реальных фазовых координатах с учетом насыщения магнитопровода // Проблемы создания новых машин и технологий. – Кременчуг: КГПУ. – 2001. – Вып. 1(10). – С. 315-320.

Здобувачем розроблений математичний опис асинхронної машини з врахуванням насичення магнітопроводу.

2. Шевченко И.С., Морозов Д.И., Карпук И.А. Цифровое моделирование электропривода на базе реальной асинхронной машины двойного питания // Технічна електродинаміка. – Київ, ІЕДНАУ, 2002. – Тематичний вип. Ч. 8. – С. 11-16.

Здобувачем синтезовані аналогові керування МПЖ і структура системи керування.

3. Скурятин Ю.В., Самчелеев Ю.П., Шевченко И.С., Морозов Д.И. Частотно-токовый преобразователь с релейным управлением // Технічна електродинаміка. – Київ, ІЕДНАУ, 2003. – Тематичний вип. Ч. 3. – С. 5-8.

Здобувачем проведено дослідження алгоритмів роботи частотно-струмового керування на цифровій моделі.

4. Карпук И.А., Морозов Д.И., Скурятин Ю.В., Самчелеев Ю.П., Шевченко И.С. Асинхронный вентиляционный каскад с синусоидальными роторными токами и высоким коэффициентом мощности // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2003. – Вип. 10, Т.2. – С. 401-405.

Здобувачем розроблено математичний опис асинхронної машини для побудови моделі при дослідженні розглянутого електропривода.

5. Карпук И.А., Морозов Д.И., Шевченко И.С., Самчелеев Ю.П. Вибір підходів для цифрового моделювання асинхронної машини з вентиляними перетворювачами в роторному колі // Електро-

техніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – №2. – С. 60-67.

Здобувачем розроблена імітаційна модель АМ у середовищі Spice пакета DesignLab, що дозволяє використовувати її разом з імітаційною моделлю претворювача в роторному колі.

6. Морозов Д.И. Принцип построения системы векторного управления машиной двойного питания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ – 2004. – Вип. 2(25). – С. 68-70.

7. Морозов Д.И. Система векторного керування машиною подвійного живлення з релейними регуляторами // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2004. – №1. – С. 36-42.

8. Шевченко И.С., Морозов Д.И., Карпук И.А. Электропривод с высокой перегрузочной способностью на базе асинхронного вентильного каскада // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. – Вип. 43. – С. 78-80.

Здобувачем досліджені статичні властивості запропонованої системи електропривода.

9. Морозов Д.И. Прямое релейное управление объектами с дифференцированием управляющего сигнала // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – Вип. 3(32). – С. 97-99.

10. Шевченко И.С., Карпук И.А., Морозов Д.И. Формирование цифровых моделей электроприводов на базе регулируемого источника тока с релейным управлением // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – Вип. 4(33). – С. 165-168.

Здобувачем розроблені математичні та комп’ютерні моделі вентильних груп і формування комутаційних функцій.

11. Морозов Д.И. Синтез системы управления электроприводом механизма со случайным характером нагрузки // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – Вип. 45. – С. 180-185.

12. Деклараційний патент 66190 А Україна, МКІ 7 Н 02 Р7/62. Асинхронний вентильний каскад. / І.А. Карпук, Д.І. Морозов, Ю.В. Скурятін, І.С. Шевченко, Ю.П. Самчелєєв. – №2003087621; Заявл. 12.08.2003; Опубл. 15.04.2004; Бюл. №4. – 24 с.

Здобувач брав участь у моделюванні роботи асинхронного вентильного каскаду, що запатентований.

13. Деклараційний патент 66191 А Україна, МКІ 7 Н 02 М5/27. Перетворювач частоти струму. / Ю.В. Скурятін, Ю.П. Самчелєєв, І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – №2003087622; Заявл. 12.08.2003; Опубл. 15.04.2004; Бюл. №4. – 22 с.

Здобувач брав участь у моделюванні роботи перетворювача частоти, що запатентований.

АНОТАЦІЇ

Морозов Д.І. “Синтез релейних систем векторного керування асинхронним електроприводом молоткової дробарки”. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2006.

Дисертація присвячена поліпшенню енергетичних показників роботи молоткової дробарки. Проаналізована робота дробарки і розроблена модель асинхронної машини, придатна для дослідження при керуванні машиною за ротором. Розглянуто релейні системи векторного керування асинхронним електроприводом за ротором. Зроблено синтез релейних модальних керувань у системах, орієнтованих за узагальненими векторами потокозчеплень статора, ротора і головного потокозчеплення. У роботі запропонований спосіб побудови релейної системи, що забезпечує поліпшення властивостей фільтрації струмів при наявності випадкової складової в моменті опору. Цей спосіб полягає в застосуванні додаткового зв'язку, що компенсує центровану складову сигналу активного струму ротора, і у відповідному виборі середньгеометричного кореня в каналі регулювання активної потужності. Запропоновано систему релейного векторного керування, орієнтовану за узагальненим вектором напруги статора, з каналом регулювання реактивної потужності, побудованим як контур стабілізації реактивної складової струму намагнічування. Показано, що дана система дозволяє регулювати реактивну потужність статора і має кращі властивості фільтрації струмів статора і ротора. Проведено експериментальне дослідження запропонованої системи й алгоритмів релейного керування. Доведено здатність системи до стабілізації як енергетичних так і статистичних показників роботи привода. Зроблено висновки за результатами досліджень.

Ключові слова: регульований асинхронний електропривод, система векторного релейного керування, ковзний режим, молоткова дробарка.

Морозов Д.И. Синтез релейных систем векторного управления асинхронным электроприводом молотковой дробилки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2006.

Диссертация посвящена улучшению энергетических показателей работы молотковой дробилки посредством применения систем векторного управления с релейными управлениями по ротору, разработке алгоритмов релейного управления, позволяющего улучшить статистические по-

казатели работы привода и системы векторного управления, и регулировать энергетические показатели привода, а также анализу процессов в рассмотренных системах. Состоит из введения, шести разделов, выводов, списка литературы и 8 приложений.

Рассмотрены способы управления асинхронной машиной по ротору, показаны преимущества применения релейных управлений в системах векторного управления, рассмотрены способы синтеза релейных управлений. Проанализированы способы поиска управляющих воздействий в системах со случайными возмущающими воздействиями.

Рассмотрены физика процесса дробления и особенности работы молотковой дробилки. Произведен статистический анализ реально наблюдаемого процесса изменения тока статора при работе дробилки, получены числовые и функциональные характеристики этого процесса.

Описана разработанная математическая модель асинхронной машины, полученная в реальных координатах состояния и пригодная для использования совместно с моделью роторного преобразователя. Путем моделирования по сопоставлению процессов изменения амплитуды тока статора определены параметры модели формирования момента сопротивления дробилки.

Рассмотрен синтез релейных модальных управлений в системах векторного управления, ориентированных по векторам потокосцепления статора, ротора и главного потокосцепления. Проанализировано влияние среднегеометрического корня подсистемы регулирования мощности на статистические показатели работы привода в целом. Предложен способ построения и синтеза управлений в подсистеме регулирования активной мощности, позволяющий улучшить статистические показатели работы привода. Этот способ заключается в применении дополнительной связи, компенсирующей отклонения активного тока ротора от среднего значения и определении коэффициентов в управлениях таким образом, чтобы система в целом имела наилучшие фильтрующие свойства. Произведен статистический анализ рассмотренных систем.

Предложен способ построения системы векторного управления, ориентированной по вектору напряжения статора, регулирование реактивной мощности в которой производится путем изменения реактивной составляющей тока намагничивания. Показано, что такая система имеет более простую структуру по сравнению с полеориентированными системами, позволяет регулировать реактивную мощность и имеет лучшие статистические показатели работы.

Путем имитационного моделирования систем векторного управления произведено обоснование мощности преобразователя в роторной цепи. Приведено описание экспериментальной установки для исследования систем релейного векторного управления и результаты экспериментальных исследований.

Отмечено, что проведенные путем математического и физического моделирования исследования электропривода, подтвердили научные положения диссертации. Рассмотренные методики предложены для использования для построения систем электропривода соответствующих меха-

НИЗМОВ.

Приведены экспериментальные процессы изменения тока при работе дробилки, структуры моделей АМ, расчет параметров и режимов двигателя АК4-450, структуры моделей СВУ, результаты имитационного моделирования СВУ, параметры элементов лабораторной установки.

Результаты исследований используются в учебном процессе на кафедре Автоматизированных электромеханических систем Донбасского государственного технического университета, а также предложены к использованию на ОАО «Алчевсккокс»

Ключевые слова: регулируемый асинхронный электропривод, система векторного релейного управления, скользящий режим, молотковая дробилка.

Morozov D.I. “Synthesis of relay systems of vector control of the asynchronous electrical drive of a hammer bucker”. – the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a speciality 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2006.

The thesis is devoted to improvement of power metrics of operation of a hammer bucker. The operation of a bucker is parsed and the model of the asynchronous machine, suitable for her research designed at regulation on a rotor. The synthesis of relay modal regulations in systems oriented on generalized vectors of linkages stator, rotor and main linkage is manufactured. In operation the way of build-up of the relay system providing improvement of properties of filtering of currents is offered at presence of a random component in the moment of a resistance. The system of relay vector control oriented on a generalized voltage stator, outline of stabilization of a reactive component of a magnetizing current is offered. Is shown, that the given system allows to regulate a wattless power stator and has the best properties of filtering of currents stator and rotor. The experimental research of the offered system and algorithms of relay regulatin is manufactured.

Keywords: the adjustable asynchronous electric drive, vector relay-type system of the control, the slipping mode, the hammer bucker.

Підп. до друку 1.09.2006 р. Формат 60×90 $\frac{1}{16}$. Папір офс.

Друк RISO. Ум. друк. арк. 0,9. Зам. №236. Накад 100 пр.

Видавництво не несе відповідальності за зміст матеріалу, наданого автором до друку.

Видавець та виготовник:

Донбаський державний технічний університет

94204, Луганська обл., м. Алчевськ, пр. Леніна, 16. (ТВО “ЛАДО”, ауд. 2113, т/факс 2-02-59)

Свідотство Держкомтелерадіо серія ДК, № 2010 від 12.11.2004