

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Пасько Ольга Володимирівна

УДК 62-83:629.423.1

**ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ З ПЛАВНО
МІНЛИВОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ РУДНИКОВОГО АКУМУЛЯТОРНОГО
ЕЛЕКТРОВОЗУ**

Спеціальність 05.09.03- електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Криворізькому технічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська область.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор,
Сінолиций Анатолій Філіпович,
Криворізький технічний університет Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри „Автоматизований електропривод”,
м. Кривий Ріг

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гончаров Юрій Петрович,
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри промислової та біомедичної електроніки, м. Харків

кандидат технічних наук, доцент
Рогоза Михайло Валентинович,
Національний гірничий університет Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри систем електропостачання,
м. Дніпропетровськ

Провідна установа - Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, м. Київ

Захист відбудеться "27" жовтня 2005 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.04 у 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 "10" вересня 2005р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Вітчизняні рудникові електровози (РЕ) оснащені тяговим електроприводом (ТЕП) з електричними двигунами постійного струму та резисторно-контакторною системою керування.

Даний тип ТЕП недостатньо ефективний, неекономічний і потребує прискорених темпів заміни на нові, сучасні види.

У цьому плані, економічно вигідним бачиться зміна стратегії оснащення шахтного парку електровозів шляхом заміни ТЕП постійного струму на апробований в промисловості та на магістральному транспорті високоефективний ТЕП змінного струму з асинхронними короткозамкнутими тяговими двигунами (ТАД) та імпульсними перетворювачами частоти напруги їх живлення (АІН).

Вагомою першопричинною частиною поки-що негативного моменту реалізації ефективних ТЕП змінного струму на РЕ є те, що попередні розроблювачі намагалися в силу різних причин без належних обґрунтувань застосовувати, а точніше в значній мірі дублювати розробки, виконані для загальнопромислових умов або для магістрального електрифікованого транспорту, при цьому упускаючи, що для рудникових акумуляторних електровозів дозволяється застосування лише електрообладнання, яким являється ТЕП РВ* виконання. Як відомо, при такому виді виконання, електрообладнання розташовують в вибухонебезпечну (спрощено в повітрянепроникаєму) оболонку, що призводить до практичної відсутності повітряної вентиляції обладнання. Останнє не дає можливості необхідного відводу тепла від елементів ТЕП, розташованих в середині “замкнутої сфери”. Це потребує як ні в якому другому виді виконання електрообладнання, вирішення проблеми мінімізації електроенергетичних втрат в силових елементах ТЕП і особливо в перетворювачах електричної енергії, як похідних факту їх нагріву. При цьому слід пам'ятати, що вибір елементів ТЕП з бажаним запасом потужності - неможлива реальність з причини надзвичайної жорсткості потреб масо-габаритних розмірів, продекларованих все тими ж шахтними умовами.

Приведені розуміння дозволяють стверджувати про актуальність пропонованої дисертаційної роботи, присвяченої обґрунтуванню наукового підходу до розробки та практичної реалізації електроенергоекономічного тягового електроприводу змінного струму: IGBT – перетворювач – ТАД з к.з. ротором для рудникових акумуляторних електровозів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Комплекс досліджень, виконаних в дисертаційній роботі, пов'язаний з напрямком НДР кафедри автоматизованого електроприводу Криворізького технічного університету.

З участю здобувача виконувався договір на створення науково-технічної продукції малим державним учбово-науково-виробничим підприємством АЕМС (м. Харків) «Розробка і виконання системи управління блока перетворювача частоти

РВ – рудникове вибухонебезпечне – вид виконання обладнання для шахт, небезпечних по газу та пилу, для умов котрих і виготовляються рудникові акумуляторні електровози

використованого керування асинхронним двигуном рудникового електровозу».

Дисертаційна робота відповідає цілям та напрямкам галузевої науково-технічної програми «Створення ресурсозберігаючого устаткування для вугільної області (пріоритетний напрямок №1 «Ресурсозберігаюче устаткування і машини для паливно-енергетичного комплексу», табл. 5.1., п.2.7), затвердженою головою Державного комітету Міністерства промислової політики України 14.08.2001р.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення електроенергоекономічності тягового електроприводу змінного струму рудникових акумуляторних електровозів. У процесі досягнення поставленої мети вирішені наступні наукові задачі:

- розроблена й обґрунтована принципово нова структура ТЕР з IGB - транзисторним перетворювачем, а саме, плавно змінюваною в процесі керування рудниковим акумуляторним електровозом;
- досліджено межі можливого діапазону зміни вихідної напруги АІН, розроблено та запропоновано принцип адаптивно-комбінованого багаторівневого регулювання напруги в системі зі змінюваною структурою;
- виконано аналітичні, комп'ютерні й експериментальні дослідження електромагнітних процесів у силовому ланцюзі електроприводу при граничних режимах зміни структури ТЕР;
- обґрунтовано й розроблено алгоритм векторного керування АІН із ШІМ напруги в процесі зміни структури ТЕР.

Об'єкт дослідження - електроенергетичні процеси в тяговому електроприводі рудникових акумуляторних електровозів з IGB – транзисторними інверторами та асинхронними двигунами.

Предмет досліджень – тяговий електропривод рудникових акумуляторних електровозів з імпульсним перетворювачем електричної енергії та асинхронними короткозамкнутими двигунами.

Методи дослідження. При рішенні поставлених у дисертаційній роботі задач використовувалися методи багатокритеріального аналізу, теорія електричних кіл, метод гармонійного аналізу, метод наближеного рішення систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів способом двох складових, методи математичного та фізичного моделювання для дослідження режимів роботи тягового електропривода на комп'ютері.

Наукова новизна одержаних результатів

- створено й формалізовано концептуальний підхід, що узагальнює і розвиває тактику побудови структур тягових електроприводів змінного струму з імпульсними перетворювачами та змінюваною структурою для рудникових електровозів, який на відміну від відомих способів синтезу ТЕР дозволяє конструювати архітектури останніх з урахуванням всього комплексу критеріїв оцінки оптимальностей;
- теоретично обґрунтовано і синтезовано на основі відомих, метод комбінованого багаторівневого регулювання величини та частоти напруги живлення ТЕД, що на відміну від існуючих дозволяє розширити діапазон регульованої частоти обертів ТЕД при живленні від АІН до 1:30 замість 1:15 і досягти при цьому бажаної плавності рушіння електровозу з місця, що дозволить мінімізувати факт ковзання коліс з рейками, яке в свою чергу зменшить негативні уда-

- рні пускові моменти в ТЕП;
- модифіковано метод “двох складових” шляхом апроксимації останніх для аналізу електромагнітних процесів і поширено можливості його застосування для дослідження раніше неаналізованих процесів в системах АІН-ТАД при багаторівневій напрузі живлення тягових електричних двигунів електровозу з отриманням необхідних законів керування ТЕП;
- встановлені аналітичні залежності частоти модуляції для IGBT-перетворювача в функції величини пульсації струму на основній його гармоніці в ланцюзі ТАД та параметрах останнього, що дозволило отримати оптимізовану частоту ШІМ з урахуванням суперечливих фактів – недопущення рівня пульсації струму в ТЕД вище допустимого, з одного боку, та додаткових витрат електричної енергії в елементах ІІ та ТЕП, з другого;
- вперше отримано і досліджено ефект адаптивного керування АІН при вірогідних позаштатних режимах роботи ТЕП – асиметрії напруги живлення та параметрів ТАД, дозволяючий диференційно розпізнавати псевдоаварійні та аварійні режими функціонування з видачею сигналу системі керування щодо компенсації асиметрії в першому випадку та відключення системи - в іншому.

Практичне значення одержаних результатів

Представлені у дисертаційній роботі теоретичні розробки дозволили:

- застосувати в практиці створення ТЕП принцип комбінованого багаторівневого регулювання напруги в системі АІН-ТАД, що дозволило досягти розширення діапазону регулювання напруги ТЕП в два рази (1:30 замість 1:15);
- розробити схемотехнічні рішення АІН у ТЕП зі змінюваною структурою й алгоритм керування їм;
- впровадити в практику теоретичного аналізу електромагнітних процесів апроксимацію методу двох складових аналізу напруг і струмів у системі АІН-ТАД;
- створити промисловий зразок тягового асинхронного IGB-транзисторного електроприводу рудникового акумуляторного електровозу;
- впровадити результати досліджень у практику створення нового типу високоефективного електроустаткування для рудникових акумуляторних електровозів - «електропривод змінного струму з IGBT-перетворювачами».

Практична цінність дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження її результатів у гірничо-металургійну промисловість шляхом передачі науково-технічної документації та результатів дослідження спеціалізованим організаціям з випуску електрообладнання для рудникових електровозів – ВАТ “Електромашина” (м. Харків), ДП НВК “Електровозобудування (м. Дніпропетровськ), що дозволило закласти основу для створення промислових зразків систем ТЕП рудникових електровозів.

Основні положення дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі при читанні лекцій з дисциплін “Теорія електроприводу”, “Системи керування електроприводами”, “Моделювання в електроприводі”, а також в лабораторному практикумі, курсовому та дипломному проектуванні студентами спеціальностей “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”, “Електричний транспорт”.

Особистий внесок здобувача

Основні наукові ідеї, положення та розробки, які виносяться на захист, належать здобувачу і отримані особисто. Серед них:

- розробка тактики підходу до технічного розвитку ТЕМ рудникових акумуляторних електровозів;
- обґрунтування та розробка нової архітектури ТЕМ змінного струму: ТАД і IGBT – перетворювач з плавно змінною структурою;
- розробка схемотехнічного рішення перетворювача зі структурою, що змінюється, та алгоритму керування їм;
- розробка способу комбінованого регулювання напруги в тяговому електроприводі змінного струму;
- розробка апроксимації методу двохскладового аналізу напруги й струму в системі АІН-ТАД;
- аналітичні дослідження квазіперехідних електромагнітних процесів у силовому ланцюзі тягового електроприводу АІН-ТАД;
- одержання аналітичних розрахункових співвідношень параметрів системи АІН-ТАД.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання й оптимізації» (м. Кременчук, 2003-2005рр.); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми розвитку рейкового транспорту» (Крим, 2003р., 2004р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Стабільний розвиток гірничо-металургійної промисловості» (м. Кривий Ріг, 2004р., 2005р.); науково-технічній конференції «Проблеми електромеханічних систем у гірничо-металургійному комплексі» (м. Дніпропетровськ, 2004р.); науково-технічній конференції з міжнародною участю: «Електромашинобудування й електроустаткування» (м. Одеса, 2004р.); міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка й енергоефективність», МНТК СЗЭ'2004 (Крим, м. Алушта, 2004р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених і фахівців «Електромеханічні системи, методи моделювання й оптимізації» (м. Кременчук, 18-20 травня, 2005р.); щорічних науково-технічних конференціях Української державної академії залізничного транспорту (м. Харків, 2000-2003р.) і Криворізького технічного університету (м. Кривий Ріг, 2003-2005рр.).

Система керування асинхронним тяговим електроприводом змінного струму рудникових акумуляторних електровозів демонструвалася на міжнародних науково-технічних виставках, в тому числі у складі комплексної експозиції холдингової компанії «Електромеханічні заводи KLG» на міжнародній виставці «Вугілля - Майнінг 2004», м. Донецьк, 2004р.

Публікації

Основні результати дисертаційної роботи викладені у 12 наукових статтях, які входять до переліку фахових наукових видань ВАК України.

Структура й об'єм дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи - 232 сторінки, з них 73 ілюстрації по тексту на 52 сторінках; 13 таблиць по тексту на 12 сторінках; 11 додатків на 52 сторінках та 132 найменування використаної літератури на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтована своєчасність теми, потреба в її дослідженні і розробці, зв'язок з науковими програмами і планами, сформовані мета і задачі дослідження, показані наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, приведені відомості про їх апробацію, публікації та впровадження.

У першому розділі з аналізу проблем і шляхів їхнього подолання в існуючому ТЕП постійного струму виконаний добір прогресивних принципів побудови систем ТЕП з імпульсними перетворювачами (ІП), що можуть бути використані при створенні ТЕП змінного струму:

- секціонування акумуляторної батареї і паралельно-послідовне з'єднання секцій у міру розгону електровоза;
- послідовно-рівнобіжне з'єднання блоків «імпульсний перетворювач - двигун»;
- ослаблення електромагнітного поля тягового двигуна.

На базі формалізованих критеріїв оцінки варіантів структур ТЕП змінного струму за основу для досліджень прийнято алгоритм глобального пошуку базової структури, в пошукову частину якого залучені аналізовані структури ТЕП, об'єднані в множину Парето. Вирішення поставленої задачі багатокритеріального аналізу оцінки варіантів структур ТЕП із суперечливими показниками, локальні мінімуми котрих не збігаються в діапазоні заданих параметрів X_i , спрощено до послідовного вирішення ряду однокритеріальних задач.

В результаті пошуку у якості вихідної з множини M_n для порівняння і базової для подальшого розвитку на перспективу ТЕП змінного струму, обґрунтована та вибрана традиційна „тверда” структура ТЕП (рис.1), із IGB – транзисторними інверторами, виконаними за класичною схемою (рис. 2).

Рис. 1. Спрощена традиційна „жорстка” структура ТЕП тягового електроприводу змінного струму

Рис. 2. Спрощена схема IGB – транзисторного інвертора напруги

В подальшому підлягли аналізу гіпотетичні варіанти „негірших” „гнучких” структур ТЕП (структур, що перебудовуються плавно в процесі руху електровозу).

На даному (заключному) етапі аналізу порівняння структур ТЕП змінного струму з вагою питомаю вагою „коефіцієнтів переваги” прийняті критерії відносної втрати потужності в перетворювачах та відносна вартість комплектуючих силових напівпровідникових приладів.

В результаті проведених досліджень ОПР виявлена найбільш енергоекономічна «гнучка» схема ТЕП з переключенням фаз двигунів, приведена на рис. 3.

Рис. 3. „Гнучка” структура ТЕП з переключенням фаз двигунів

У пусковому режимі двигуни $M1$ і $M2$ з'єднуються послідовно через одноопераційні тиристори. По мірі розгону електровоза схема плавно переходить на рівнобіжне з'єднання двигунів у тривалому режимі. В результаті «гнучка» структура ТЕП з переключенням фаз має при пуску втрати 1,48 у.о. проти 2,65 у.о. в традиційній «твердій» структурі при однакових втратах 1,0 у.о. в тривалому режимі. Істотно те, що

«гнучка» схема забезпечує зниження амплітуди імпульсів струму, споживаних від акумуляторної батареї при пуску майже вдвічі, тобто на рівні тривалого режиму (у параметрах електровоза АМ8Д), внаслідок чого зменшується термін зносу акумуляторної батареї.

В другому розділі досліджено електромагнітні процеси в системі «інвертор - асинхронний двигун» в граничних умовах зміни структури ТЕРП змінного струму.

Приведено огляд і порівняння методів аналітичних досліджень електромагнітних процесів у системі «інвертор - асинхронний двигун» при «повному» керуванні:

- метод кусочно-лінійної апроксимації (припасовування) з використанням класичного аналізу тимчасових функцій за допомогою лінійних диференціальних рівнянь чи перетворення Лапласа;
- метод зведення трифазної машини, яка описується рівняннями Максвелла й еквівалентною двофазною, яка описується рівняннями Парка - Крона;
- метод узагальненого вектора перемикаючих (комутаційних) функцій з рішенням шляхом прямого інтегрування рівнянь чи шляхом гармонійного аналізу.

Спрощеним в процесі обчислення, а не якості, варіантом останнього є метод двох складових - синусоїдальної (першої гармонійної) і несинусоїдальної (сумою усіх вищих гармонійних), що прийнятий у якості базового для дослідження квазіперехідних електромагнітних процесів в асинхронному двигуні при живленні від інвертора напруги з «повним» керуванням у силу своєї наочності і досить високої точності.

Запропоновано апроксимацію методу двох складових, підставою для якої служать наступні розуміння, показані на рис. 4.

Рис. 4. Діаграми фазних струму та напруги ТАД з апроксимацією вищих гармонік

- де: U_d - постійна напруга на вході інвертора;
 U_s - фазна напруга двигуна при „повному” керуванні інвертора;
 U_1 - перша гармоніка фазної напруги при цьому;
 i_1, i_s - струми

$$\text{На розрахунковому інтервалі } \left[\frac{\pi}{3} \dots \frac{2\pi}{3} \right] \quad (1)$$

$$\text{Амплітуда першої гармоніки напруги:} \quad (2)$$

$$\text{Середнє значення синусоїди на розрахунковому інтервалі:} \quad (3)$$

$$\text{Середнє значення відхилень (площинки } \bar{U}_{(+)} = \bar{U}_{(-)}): \quad (4)$$

тобто складає 3,1% від U_c .

$$\text{Тут } \sin \theta_1 = 0,955, \quad \theta_1 = 1,27 \text{ рад}; \quad \theta_1 + \theta_2 = \pi; \quad \Delta\theta = \pi - 2\theta_1 = 0,6 \text{ рад};$$

$$\sin \frac{\Delta\theta}{2} = 0,2955.$$

Малі величини відхилень синусоїди від середнього значення дозволяють допустити її заміну на розрахунковому інтервалі прямої U_n . Тоді сумарна напруга усіх вищих гармонік (друга складова) буде

(5)

Допускаючи початкові умови для сумарного струму вищих гармонік рівними кінцевим на розрахунковому інтервалі, але із знаком „мінус”, маємо

(6)

де x_k - індуктивний опір схеми заміщення короткого замикання. Наприкінці інтервалу, підставляючи $\theta = 2\pi / 3$ в (6), одержуємо

(7)

Для визначення максимально можливого піка струму двигуна приймаємо, $\varphi_1 = \pi / 6$, тоді

$$I_{s \text{ à èñ}} = I_{1m} + I_{\Sigma} \approx \left(\frac{0,637}{Z_1} + \frac{0,031}{x_k} \right) U_d. \quad (8)$$

Це максимум максимум можливого, розрахункове значення якого при параметрах двигуна АД-14 в номінальному режимі не перевищує 127% амплітуди синусоїди струму тобто при «повному» керуванні інвертора не потрібно збільшувати номінал IGB - транзисторів по струму, розрахований за максимальним струмом.

Останнє твердження дозволило автору запропонувати принцип комбінованого багаторівневого регулювання напруги в «гнучкому» ТЕР змінного струму рудникового акумуляторного електровозу - регулювання напруги на двигунах здійснюється в три етапи з використанням комбінації векторної ШІМ напруги з «повним» керуванням IGBT-інверторів:

1 етап: пуск і розгін електровоза починаються практично з нульового значення напруги на двигунах до рівня, пропорційного $U_d/2$, спочатку за допомогою векторної ШІМ, а потім шляхом збільшення скважності провідного стану протилежних груп IGBT і тиристорів зв'язку до збільшення при «повному» керуванні (двигуни з'єднані послідовно).

2 етап: подальший ріст напруги від рівня $U_d / 2$ до U_d також здійснюється спочатку за допомогою векторної ШІМ шляхом зменшення скважності тиристорів зв'язку до 0 і збільшення скважності IGBT до граничної при синусоїді, а потім з переходом на «повне» керування IGBT шляхом збільшення їхньої скважності до 1 (при цьому двигуни плавно переходять з послідовного з'єднання на рівнобіжне і ТЕР виходить на годинний режим роботи).

3 етап: напруга на кожному двигуні постійна і дорівнює максимальному значенню. При «повному» керуванні, двигуни працюють паралельно, частота збільшується до граничної, реалізується режим плавного ослаблення поля тягових двигунів.

У третьому розділі приведені результати синтезу алгоритмів векторної ШІМ і «повного» керування перетворювачем, що дозволяють реалізувати принцип комбіно-

ваного багаторівневого регулювання напруги в «гнучкій» системі ТЕП змінного струму. Можливі алгоритми симетричного і асиметричного керування, останній прийнятий у роботі як більш простий, - який передбачає меншу кількість перемикачів напівпровідникових приладів на періоді модуляції T_m .

В таблиці 1 надано перелік станів перетворювача при векторній ШІМ, де:

V_0, W_0 – нульовий стан тривалістю t_0 ; V_j – стан послідовного з’єднання тривалістю t_v ; W_j – стан паралельного з’єднання тривалістю t_w ; $j=1...6$.

Алгоритми модуляції на трьох етапах наведені у табл.2., де T_s - період першої гармонійної, який розбитий на $i=6$ інтервалів переключення фаз кожний тривалістю $t_i = T_s/i$.

Таблиця 1

Таблиця стану перетворювача

Позначка стану перетворювача	Включені транзистори, тиристори, діоди					
V0	SU	SV	SW			
V1	PU1	SV	SW	MU2		
V2	PU1	PV1	SW	MU2	MV2	
V3	SU	PV1	SW		MV2	
V4	SU	PV1	PW1		MV2	MW2
V5	SU	SV	PW1			MW2
V6	PU1	SV	PW1	MU2		MW2
W0	PU1	PV1	PW1	MU2	MV2	MW2
W1	PU1	MV1	MW1	MU2	PV2	PW2
W2	PU1	PV1	MW1	MU2	MV2	PW2
W3	MU1	PV1	MW1	PU2	MV2	PW2
W4	MU1	PV1	PW1	PU2	MV2	MW2
W5	MU1	MV1	PW1	PU2	PV2	MW2
W6	PU1	MV1	PW1	MU2	PV2	MW2

Таблиця 2

Алгоритми модуляції в рівнях регулювання напруги ГАД

Інтервали перемикачів фаз		Алгоритм модуляції			
Позначення	Межі	І рівень		II рівень	
		$\left[0... \frac{T_m}{2}\right]$	$\left[\frac{T_m}{2}...T_m\right]$	$\left[0... \frac{T_m}{2}\right]$	$\left[\frac{T_m}{2}...T_m\right]$
τ_1	$0... \frac{T_s}{6}$	w0→v2→v1→v0	v0→v1→v2→w0	v2→w2→v2→w2	w2→v2→w2→v2
τ_2	$\frac{T_s}{6}... \frac{T_s}{3}$	w0→v2→v3→v0	v0→v3→v2→w0	v3→w3→v3→w3	w3→v3→w3→v3
τ_3	$\frac{T_s}{3}... \frac{T_s}{2}$	w0→v4→v3→v0	v0→v3→v4→w0	v4→w4→v4→w4	w4→v4→w4→v4
τ_4	$\frac{T_s}{2}... \frac{2T_s}{3}$	w0→v4→v5→v0	v0→v5→v4→w0	v5→w5→v5→w5	w5→v5→w5→v5
τ_5	$\frac{2T_s}{3}... \frac{5T_s}{6}$	w0→v6→v5→v	v0→v5→v6→w0	v6→w6→v6→w6	w6→v6→w6→v6
τ_6	$\frac{5T_s}{6}...T_s$	w0→v6→v1→v0	v0→v1→v6→w0	v1→w1→v1→w1	w1→v1→w1→v1

1 етап: на початку $U=0$, $t_0=mask$, $t_{v(j=i+1)}=min$, потім ріст напруги за рахунок, $t_0 \rightarrow 0 \uparrow t_v$ при формуванні синусоїди струму за допомогою векторної ШІМ до кордонного значення; збільшення напруги до $U_d/2$ за рахунок переходу на „повне” керуван-

ня шляхом $t_{v(j=1)} \rightarrow 0, t_{v(j=1+1)} = \left(\frac{T_i}{2} - t_{v(j=1)} \rightarrow \hat{i} \hat{a} \hat{e} \hat{n} \right)$; наприкінці $t_{v(j=i+1)} = \frac{T_M}{2}$

2 етап: напруга змінюється від $\frac{U_d}{2}$ до U_d за рахунок $t_v \rightarrow 0$ і $t_w = \left(\frac{T_i}{2} - t_v \right) \rightarrow \hat{i} \hat{a} \hat{e} \hat{n}$, спочатку шляхом формування синусоїди струму методом векторної ШІМ, а потім при „повному” керуванні $t_v = 0, t_w = \frac{T_i}{2}$, часовий режим.

3 етап: $t_v = const = 0, t_w = const = \frac{T_i}{2}, F_s = \frac{1}{T_s} \rightarrow \hat{i} \hat{a} \hat{e} \hat{n}$. Режим послаблення поля тягових двигунів – довгостроково. Тиристри зв'язку S відключаються примусово шляхом подачі на них напруги джерела живлення в зворотному напрямку на час відновлення їх керуючих властивостей порядку 25 мкс, наприклад відключення SU1 здійснюється короткочасним включенням пари PU2+MU1. Приведено результати аналітичних досліджень залежності частоти модуляції $f_M = 1/T_M$ від допустимого коефіцієнта пульсації першої гармонійної струму і параметрів двигуна з метою визначення мінімальної f_M (рис. 5).

Рис. 5. Діаграма ШІМ-ованого струму ТАД

Коефіцієнт пульсації струму визначається як:

(9)

і має найбільше значення при скважності провідного стану IGBT $q_j = \frac{t_{vj}}{T_M} = 0,5$,

де t_v - тривалість провідного стану, коли до фази прикладається імпульс напруги $U_v = 2U_d/3$ (крайній випадок), у паузах $t_0 = T_i - t_v$ напруга дорівнює нулю.

$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{Z_1} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_d}{Z_1}$ - амплітуда синусоїди струму.

У якості розрахункової прийнята схема заміщення для режиму короткого замикання з параметрами $R_k, x_{\hat{e}i} = 2\pi \cdot f_M \cdot L_{\hat{e}}, \tau_k = \frac{L_k}{R_k}$.

Вихідні дані:

(10)

Граничні умови:

;

(11)

Використовуючи які знаходимо:

У результаті підстановок і перетворень рівнянь одержуємо:

$$f_M = \frac{1}{2\tau_k \ln \frac{A+1}{A-1}} \quad (13)$$

$$\text{де: } A = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{Z_1}{R_K \cdot k_1} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{L_1}{R_K \cdot k_1} \cdot f_1.$$

При параметрах тягового двигуна АД-14 і коефіцієнтів пульсації $k_1 = 0,05$ маємо $f_m > 20f_1$; при номінальній частоті $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц частота модуляції повинна бути $f_{M\text{min}} > 1000$ Гц.

В розділі вперше визначено поняття – псевдоаварійний режим роботи ТАД.

Теоретично обґрунтовано і показано, що даний режим є позаштатним по факту розбіжностей параметрів електричної машини (пофазної асиметрії), може бути компенсований системою керування електроприводом. Для цього запропоновано та реалізовано математичний апарат для оцінки рівня асиметрії та необхідного рівня її компенсації. Рівняння компенсації асиметрії ТАД за умови симетрії магнітних осей машини і взаємних індуктивностей між статором і ротором має вигляд:

$$U_{ns} = U_s \frac{Z_2 Z_{R_1}}{Z_0 Z_{R_1} + X_\mu^2}.$$

При цьому система фазних напруг для компенсації: де індексом "К" позначені компенсуючі напруги.

Отримані рівняння дозволяють одержати коефіцієнти β і γ для різних випадків асиметрії ТАД.

У четвертому розділі наведені результати комп'ютерних досліджень електромагнітних процесів в ТЕП змінного струму зі стандартною «твердою» та з «гнучкою» структурами. Розробка комп'ютерної моделі силової частини системи й системи керування проведені в середовищі пакета MATLAB. IGB - транзистори й одноопераційні тиристори представлені ідеальними напівпровідниковими ключами зі зворотною провідністю.

Розроблена, набрана й налагоджена узагальнена комп'ютерна модель (рис.6) дозволяє досліджувати обидві структури на єдиній базі вхідних даних, що необхідно для їхнього коректного порівняння. У схему введено блок вентилів міжфазних зв'язків «Gross Gates».

Рис. 6. Схема узагальненої моделі

Виробіток імпульсів, що включають, ключі за законом синусоїдальної ШІМ напруги проведено з використанням моделі генератора, що задає трифазну систему синусоїдальних напруг з регульованою частотою й амплітудою, та моделі генератора трикутної різнополярної напруги частотою 3 кГц. Компаратор з малою петлею гістерезису забезпечує порівняння напруг генераторів і фіксацію збігу їхніх миттєвих значень; блок 1 LEVEL - для послідовного з'єднання фаз і формування 1-го рівня й блок 2 LEVEL для роботи по зміні чередування фаз і формування 2-го рівня регулювання напруги живлення.

Результати комп'ютерних досліджень підтверджують аналітичні: комп'ютерне значення максимального миттєвого фазного струму при «повному» керуванні на ~

5% менш розрахункового аналітичного; максимальний імпульс струму, споживаного від акумуляторної батареї в стандартній схемі становить 200 АЧ2, а в «гнучкій» схемі 300А (максимальний струм рис.12).

На моделі розраховані й побудовані статичні механічні характеристики тягового асинхронного двигуна АД-14 (рис. 7).

Рис. 7. Статичні механічні характеристики ТАД АД-14

У п'ятому розділі приведені результати експериментальних досліджень розроблених робочих структур і принципової схеми експериментального зразку блоку перетворювача в системі тягового електроустаткування для рудникового акумуляторного електровозу з асинхронними двигунами типу АД-14. Реалізовано лабораторний і дослідницький стенди.

Електромагнітні процеси в розглянутих структурах ілюструють комп'ютерні осцилограми (рис. 8 – рис. 11):

Рис. 8. «Гнучка» структура: пуск, послідовне з'єднання фаз, 1-й рівень регулювання напруги із ШІМ

Рис. 10. «Гнучка» структура на 2-му рівні із ШІМ

Рис.9. «Гнучка» структура наприкінці 1-го рівня з «повним» керуванням

Рис. 11. «Гнучка» структура наприкінці 2-го рівня з „повним” керуванням, вихід у тривалий режим, 50 Гц

На лабораторному стенді налагоджено робочий алгоритм системи керування перетворювачем і регулювання ТЕП. Розроблена програма й методика випробувань системи в тяговому, гальмівному та інших режимах. Наведено результати експериментальних досліджень і виконане порівняння їх з теоретичними в номінальному режимі (рис. 12).

Рис. 12. Зведені значення викидів струму I_{Σ} при „повному” керуванні інвертором, що отримані аналітичним, комп'ютерним та експериментальними дослідженнями

Тут $I_{1i} = 155,6$ А (100%) – амплітуда першої гармонічної фазного струму; I_{Σ} - викид (максимальне миттєве значення суми вищих гармонік) фазного струму при „повному” керуванні інвертором; $I_{\Sigma\lambda} = 36,4$ А (23,4% I_{1m}) – розраховано за апроксимованим методом двох складових; $I_{\Sigma\lambda} = 30,6$ А (19,7% I_{1m}) – розраховано за класичним методом двох складових, $I_{\Sigma\gamma} \approx 26$ А (16,7% I_{1m}) – експериментальне значення; $I_{\Sigma\epsilon} \approx 23$ А (15% I_{1m}) - комп'ютерне значення.

Порівняння результатів досліджень дає слідуючі відхилення значень піка струму розрахованого апроксимуючим методом, від розрахованого класичним методом двох складових:

$$\Delta_{\lambda}^{\lambda} = \frac{36,4 - 30,6}{155,6 + 30,6} \cdot 100 = 3,1\%$$

що підтверджує обґрунтованість прийнятих допущень.

Відхилення значень піка струму, розрахованого апроксимуючим методом, від експериментального значення становить

Оскільки розбіжність експериментальних і теоретичних значень - 5,73% не виходить за рамки припустимих 10%, можна стверджувати про достатню точність запропонованого методу й рекомендувати отримані аналітичні залежності для практичних розрахунків.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано перспективний напрямок розвитку теорії й практики ТЕП змінного струму для рудникових електровозів на базі ТАД та IGBT інверторів.

Отримані наукові результати являють собою комплексне рішення науково-технічної задачі, що складається з встановлення закономірностей поведінки складових системи ТЕП змінного струму в запропонованому варіанті управління, в розробці тактики перебудовування структури, силової частини ТЕП, трансформуванні алгоритмів як в «штатних», так і в «позаштатних» режимах функціонування ТЕП в жорстких специфічних умовах рудникового електровозного транспорту.

Виконані дослідження дозволяють сформулювати наступні узагальнюючі висновки:

- Науково обґрунтований підхід та реалізація в практику вітчизняного електровозобудування високоефективної системи ТЕП, якою, як показано у роботі, є ТЕП змінного струму на базі ТАД з к.з. ротором і IGBT - інверторів, дозволяють стверджувати про реальний внесок у вирішення цієї проблеми, оскільки досягається необхідне зниження загальних електроенергоекономічних витрат на транспортування корисних копалин підземним способом.
- Створена концепція, узагальнююча та розвиваюча методологію синтезу систем ТЕП змінного струму для «жорстких» технологічних умов експлуатації рудникових електровозів, дозволяє створювати принципово нові ТЕП на основі розробленого алгоритму зміни структури, що плавно перебудовує архітектуру силової частини ТЕП зі збільшенням загального ККД до 0,80, зменшення споживання електроенергії в порівнянні із класичними аналогами на 40 % та зменшення ударних струмових навантажень на АБ у 2 рази.
- Розроблений і реалізований принцип комбінованого багаторівневого регулювання величини напруги в системі АІН - ТАД, шляхом синтезу «векторного» і «повного» способів керування інвертором, дозволяє вперше використати в практиці ТЕП максимально можливий діапазон регулювання величини й частоти вихідної напруги АІН і тим самим досягти очікуваного розширення діапазону регулювання ТЕП електровозу в 2 рази (1:30 замість 1:15).
- Запропонована апроксимація методу «двох складових» аналізу квазіперехідних електромагнітних процесів у системі АІН-ТАД, дозволяє при максимальній наочності й високій ступені точності очікуваних результатів, проводити аналітичні дослідження, у тому числі процесів утворення сплесків величин струмів ТАД, з мінімальними трудовитратами й часом.

- Установлена аналітична залежність частоти ШІМ напруги IGBT інвертора у функції величини пульсації на основній гармоніці струму й параметрів ТАД, дозволяє визначити нижній поріг частоти ШІМ (~ 800Гц) і тим самим додатково зменшити загальні втрати електричної енергії в ТЕП.
- Модифікований спосіб «векторного» керування IGBT -перетворювачем із ШІМ напруги в умовах структури АІН, що змінюється, дозволяє досягти необхідної відповідності робочих і захисних характеристик ТЕП рудникового електровозу, як складної електромеханічної системи.
- Вперше встановлено, досліджено й класифіковано вплив позаштатних режимів роботи ТЕП, викликаних асиметріями живлячої напруги й параметрів ТЕД. Показано, що «заважаючі» асиметричні режими, у відмінності від «небезпечних», можна й доцільно корегувати відповідними адаптивними відгуками СУ, що дозволить мінімізувати негативні явища в системі не прибігаючи до дорогого процесу заміни складових елементів ТЕП.
- Результати теоретичних і експериментальних досліджень і нові патентоспроможні схемотехнічні рішення використані в науково-дослідних роботах Криворізького технічного університету й передані ДП «НВК Електровозобудування» (м. Дніпропетровськ) та ВАТ «Електромашина» (м. Харків) для освоєння випуску нового вітчизняного вискооефективного електроустаткування й систем керування рудниковими електровозами.
- Дослідний зразок ТЕП змінного струму рудникового акумуляторного електровозу успішно витримав комплекс лабораторних досліджень та попередніх випробувань.
- Отримано науково-технічне рішення, економічний ефект якого становить 15,07 тис. грн. на один електровоз у рік, що підтверджено замовниками.
- Результати досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, запропоновані й впроваджені в навчальному процесі в Криворізькому технічному університеті (м. Кривий Ріг) і Кременчуцького державному політехнічному університеті (м. Кременчук).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лебьодкін С.В., Сінолиций А.П., Пасько О.В. Вугільна промисловість і перспективні напрямки розвитку тягових електроприводів рудникових електровозів (проблеми і перспективи) // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2004. - №4. – с.12-15.

Здобувачу належить виявлення особливостей технічного розвитку ТЕП рудникових акумуляторних електровозів для шахт України.

2. Пасько О.В. Комбінаторика схем тягового електропривода переменногo тока // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 43. – с.121-124.

3. Гусевський Ю.І., Шаповал В.П., Пасько О.В. Розрахунок фазних струмів двофазної системи «автономний інвертор напруги – асинхронний двигун // Збірник наукових праць Харківської державної академії залізничного транспорту. – Харків: ХарДАЗТ. – 2000. - Вип.44. - с.59-64.

Здобувачем виконані аналітичні дослідження електромагнітних процесів в сило-

вому ланцюгу ТЕР АІН – ТАД.

4. Пасько О.В. Исследования электромагнитных процессов в тяговом асинхронном электроприводе рудничных электровозов // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків: 2004. - №4(10). – с.89-93.

5. Пасько О.В. Аналіз електромагнітних процесів у тягових електроприводах із ШІМ напруги інвертора // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. - 2004. – Вип. 3/(26). - с. 97-99.

6. Черный А.П., Пасько О.В. Адаптивное управление процессами преобразования энергии в асинхронном тяговом электроприводе с частотным регулированием напряжения питания рудничного аккумуляторного электровоза // Гірнична електромеханіка та автоматика (Національна гірнична академія України). –Дніпропетровськ: 2004. – Вип. 72. – с.156-161.

Здобувачем обґрунтована та розроблена тактика побудови алгоритму керування IGB – перетворювачем ТЕР в позаштатних режимах роботи ТАД.

7. Пасько О.В. Пульсации тока асинхронного тягового двигателя электровоза при питании от инвертора напряжения // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2004. – Ч.1.- №8(78). – с.220-226.

8. Пасько О.В. К вопросу максимизации диапазона регулирования ШИМ напряжения инвертора тягового электропривода // Технічна електродинаміка.. – Київ: 2004. – Ч.1. Тематичний випуск Силова електроніка і електродинаміка – с. 87-89.

9. 5. Синолицый А.Ф., Пасько О.В. Спаренный тяговый асинхронный IGBT-электропривод рудничного аккумуляторного электровоза и алгоритм управления им // Разработка рудных месторождений (Криворізький технічний університет). – Кривий Ріг: КТУ. – 2004. – Вип.87. – с.76-80.

Здобувачем обґрунтовані нові архітектури ТЕР змінного струму з ТАД і IGB-перетворювачем з плавною змінною структурою.

10. Лебедкин С.В., Пасько О.В. Исследование и предварительные испытания комбинированного способа управления преобразователем тягового электропривода переменного тока рудничного электровоза // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків: 2005. - №2/2(14). – с.37-40.

Здобувачем розроблена методика дослідження випробувань комбінованого засобу керування перетворювачем для рудникового электровозу.

11. Лебедкин С.В., Зайцев И.Н., Пасько О.В. Предварительные испытания опытного образца тягового электропривода переменного тока для рудничных электровозов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. - Вип. 4/2005 (33). – с. 111-114.

12. Синолицый А.Ф., Колотило В.И., Лебедкин С.В., Пасько О.В. Опытный образец энергоэкономичного тягового электропривода: IGBT-преобразователь - асинхронный двигатель для рудничных электровозов // Разработка рудных месторождений (Криворізький технічний університет). – Кривий Ріг: КТУ. – 2005. – Вип.88. - с. 117-120.

Здобувачу належить розробка теорії синтезу та схемотехнічні рішення тягового електроприводу змінного струму з IGBT – перетворювачем і АД рудникового электровозу та методика експериментальних випробувань дослідницького тягового електроприводу.

АНОТАЦІЇ

Пасько О.В. Тяговий електропривод змінного струму з плавно мінливою структурою для рудникового акумуляторного електровозу. - Рукопис.

Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси і системи. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" - Харків - 2005.

Дисертація присвячена розвитку теорії та практики синтезу тягового електроенергоощадного електроприводу змінного струму з плавно мінливою структурою для рудникових акумуляторних електровозів.

Визначено критерії вибору базової структури тягового електроприводу, розв'язаний і конкретизований алгоритм пошуку оптимальної структури тягового електроприводу й імпульсного перетворювача.

Запропоновано схемотехнічні рішення тягового електроприводу з секціями, що переключаються плавно послідовно паралельним перемиканням тягових двигунів з забезпеченням при цьому істотного зниження струмових навантажень акумуляторної батареї в процесі розгону електровозу.

Проведено аналітичні комп'ютерні та експериментальні дослідження електромагнітних процесів у силовому ланцюгу тягового електроприводу при ШІМ напруги живлення тягових двигунів, в результаті яких встановлена аналітична залежність між частотою модуляції, шпаруватістю імпульсного перетворювача, коефіцієнтом пульсації струму, параметрами силового ланцюга.

Обґрунтовані переваги двоступеневого регулювання напруги, розроблено алгоритм регулювання, що реалізується мікропроцесорним блоком керування.

Ключові слова: тяговий електропривод, електромеханічні системи, вентиляльні перетворювачі.

Пасько О.В. Тяговый электропривод переменного тока с плавно изменяемой структурой для рудничного аккумуляторного электровоза. - 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 - 2005.

Диссертация посвящена развитию теории и практики синтеза электроэнергосберегающего тягового электропривода переменного тока с плавно изменяемой структурой для рудничных аккумуляторных электровозов.

Определены критерии выбора базовой структуры тягового электропривода, развит и конкретизирован алгоритм глобального поиска оптимальной структуры тягового электропривода и импульсного преобразователя.

Предложены схемы тягового электропривода с плавным последовательно-параллельным переключением тяговых двигателей, что обеспечивает существенное снижение токовых нагрузок аккумуляторной батареи в процессе разгона электровоза.

Проведены аналитические компьютерные и экспериментальные исследования электромагнитных процессов в силовой цепи тягового электропривода при ШИМ напряжения, в результате которых установлена аналитическая зависимость между частотой модуляции, скважностью импульсного преобразователя, коэффициентом пульсации тока, параметрами и режимами работы силовой цепи.

Обоснованы преимущества двухступенчатого регулирования напряжения, разработан алгоритм регулирования, реализуемый микропроцессорным блоком управления.

Ключевые слова: тяговый электропривод, электромеханические системы с вентиляционными преобразователями.

Pasko O.V. AC traction electric drive with smoothly variable structure for accumulator locomotive - Manuscript

Thesis for a candidate's degree by specialty 05.09.03 – electrical complexes and systems. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” – Kharkiv – 2005.

The thesis is devoted to research and development of an energy-efficient AC traction electric drive for a mine accumulator locomotive with a combination pulse converter.

Criteria for choosing the basic structure of the traction electric drive have been defined, a global optimal structure searching algorithm has been elaborated and specified for the traction electric drive and combination pulse converter.

Schematics of a traction electric drive with smoothly-switching parallel-series accumulator battery sections and traction motors have been introduced to provide significant reduction of the accumulator current loading during the locomotive acceleration.

Analytical computer-aided and experimental research on quasitransient processes in the traction electric drive power circuit with PWM voltage applied to the traction motors has been conducted, which has allowed specifying analytic dependence between the modulation frequency, pulse converter off-duty factor, current ripple factor, and power circuit parameters and operation modes, and proving advantages of two-stage voltage regulation. A two-stage voltage regulation algorithm has been developed and implemented in form of a microprocessor control unit.

Key words: traction drive, electromechanical system valve converter.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Кутовий Ю.М.

Підписано до друку 05.09.2005р.
Формат видання 60x84 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. Арк. 0,9.
Тираж 100 прим. Замовлення № 507635

Надруковано СПД ФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво №04058841Ф0050331 від 21.03.2001р.
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 4/10