

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Удовенко Олег Олександрович

УДК 62-83:629.423.1

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУДНИКОВОГО
АКУМУЛЯТОРНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2004

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
ТОВ ТД “Електричні машини”,
технічний директор (м.Харків)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Жуйков Валерій Якович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
декан факультету електроніки,
завідувач кафедри “Промислова електроніка”
(м. Київ)

кандидат технічних наук, доцент
Кутовий Юрій Миколайович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
доцент кафедри “Автоматизовані електромеханічні системи”
(м. Харків)

Провідна установа - Національний гірничий університет
Міністерства освіти і науки України,
кафедра “Електропривод” (м. Дніпропетровськ)

Захист відбудеться “___” _____ 2004 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

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

Автореферат розісланий “___” _____ 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Осічев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Актуальність теми

Надійність роботи електроустаткування електровозів у підземних умовах, як і раніше, залишається вкрай низькою. Термін служби тягових двигунів у середньому не перевищує 1...2-х місяців, контролерів – 3...4-х місяців, акумуляторних батарей – близько 6 місяців. Крім того, 40-50% електроенергії, яка споживається рудниковими електровозами, “втрачається” у пускорегулюючих реостатах. На позапланові ремонти та заміни електрообладнання рудникових електровозів щорічно витрачається десятки мільйонів гривень.

Звичайно, що в різні часи свого технічного розвитку електрифікований транспорт взагалі, та рудниковий частково, завжди були своєрідним “полігоном” для випробування нових видів електроприводів.

Досягнення сучасної напівпровідникової техніки - масове виробництво тиристорів, IGBT, спецконденсаторів і іншої елементної бази - розкривають додатково широкі можливості в створенні надійних і енергозберігаючих систем тягового електроприводу (ТЕП) з імпульсними перетворювачами (ПП) для рудникових акумуляторних електровозів. Однак, механічна заміна контакторів і тиристорів новими напівпровідниковими елементами приводить до створення дорогих і малоефективних пристроїв, котрі проміж тим споживають непродуктивно багато електроенергії.

Проблема постає уже не тільки і не стільки в необхідності розробки нових схемотехнічних рішень, а в необхідності наукового обґрунтування і отримання на цій основі нових підходів до стратегії та тактики оптимізації архітектур схемотехнічних рішень, параметрів їх складових, згідно з жорсткими критеріями електроенергетичної ефективності, масооб’ємних показників і мінімальних матеріальних витратах на їх впровадження.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до координаційного плану НАН України на 1996-2000р. (“Наукові основи електроенергетики” п.п. 1.9.2.2.1.2.8, 1.9.2.2.1.3.3, 1.9.2.2.1.3.4), Державною науково-технічною програмою на 1995-2000 рр., пріоритетних напрямків науки і техніки, п.04.00, п.01.11, комплексного проекту Державного Комітету України з питань науки, техніки і промислової політики, а також відповідно до плану НДР, затвердженого Радою Криворізького технічного університету на 1999-2003 р. Робота відповідає цілям галузевої науково-технічної програми “Створення ресурсозберігаючого устаткування для вугільної галузі (пріоритетний напрямок №1 “Ресурсозберігаюче устаткування і машини для паливно-енергетичного комплексу”, табл.5.1, п.2.7), затвердженої головою Державного комітету Міністерства промислової політики України 14.08.2001р.

Мета і задачі дослідження

Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії і розробка енергозберігаючого тягового електроприводу рудникового акумуляторного електровозу з компактним енергозберігаючим імпульсним перетворювачем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати концепцію енергоекономічного підходу до аналізу функціонування тягового електроприводу рудникових акумуляторних електровозів і розробити узагальнюючі критерії оптимізації споживання ними електроенергії;
- дослідити методи багатокритеріального аналізу та синтезу імпульсних перетворювачів, узагальнивши їх; розробити методика створення архітектури схемотехнічних рішень стосовно до умов тягового електроприводу рудникових акумуляторних електровозів;
- встановити залежність втрат електроенергії в елементах імпульсних перетворювачів від режимів роботи тягового електроприводу;
- розробити принципово нові схемотехнічні рішення імпульсних перетворювачів для рудникових акумуляторних електровозів з існуючим типом двигунів постійного струму послідовного збудження;
- розробити методи і алгоритми адаптивного керування тяговим електроприводом з імпульсним регулюванням напруги живлення за критерієм мінімізації енергоспоживання.

Об'єкт дослідження - електромагнітні та електроенергетичні процеси в електроприводі рудникових акумуляторних електровозів з імпульсними системами регулювання напруги живлення тягових двигунів.

Предмет дослідження - тяговий електропривод рудникових акумуляторних електровозів з імпульсним перетворювачем електричної енергії.

Методи дослідження. У ході проведення досліджень при рішенні поставлених у дисертаційній роботі задач використовувалися: множина Парето; методи наближеного розв'язку систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів; теорія мереж Петрі для синтезу структур систем тягового електроприводу й імпульсного перетворювача; методи математичного моделювання для дослідження режимів роботи тягового електроприводу, а також різні пакети комп'ютерних програм при моделюванні, оптимізації і розробці систем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- створено концепцію по узагальненню енергоекономічного підходу до аналізу функціонування електроустаткування рудникових електровозів, що дозволяє розвинути теорію тягового електроприводу;
- вдосконалено методи синтезу архітектури схемотехнічних рішень імпульсних перетворювачів у частині збільшення жорсткості енергоекономічних критеріїв, що дозволяє поширити засоби

проектування на новий вид систем тягового електроприводу з двигунами постійного струму послідовного збудження;

- уперше формалізована структура системи електроприводу рудникового електровозу за допомогою мереж Петрі, що дозволило отримати оригінальну причинно-наслідкову модель для дослідження за критеріями структурного і параметричного аналізу електроенергозбереження імпульсних перетворювачів у комплексі тягового електроприводу;
- розроблені принципово нові схемотехнічні рішення імпульсних перетворювачів з використанням комбінації одноопераційних тиристорів і IGBT, що дозволяє використовувати E-комутацію без додаткових елементів для тягового електроприводу;
- вперше отримані співвідношення залежності коефіцієнту пульсації струму від частоти модуляції, шпаруватості та параметрів тягового ланцюга тягового електроприводу з імпульсними перетворювачами з плавним паралельно-послідовним з'єднанням тягових електродвигунів, що дозволяє визначити оптимальну частоту модуляції ПП;
- розроблені і вперше реалізовані методи й алгоритми управління тяговим електроприводом з імпульсними перетворювачами, що дозволило забезпечити їх економічну роботу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що представлені в дисертаційній роботі дослідження дозволили:

- розробити і рекомендувати для використання принципи (методи) побудови імпульсних систем керування тяговим електроприводом рудникових електровозів з паралельно-послідовним з'єднанням тягових електродвигунів;
- розробити схемотехнічні рішення імпульсних систем керування тяговим електроприводом;
- розробити адаптивні алгоритми керування і регулювання електроприводом з імпульсними перетворювачами з E-комутацією, що забезпечують економічність їх функціонування;
- створити промисловий зразок тягового електроприводу рудникового акумуляторного електровозу з імпульсною системою керування.

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота заснована на результатах науково-дослідних і дослідницько-конструкторських робіт, виконаних за участю автора у Криворізькому технічному університеті.

Наукові положення і результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать:

- стратегія підходу до аналізу і синтезу ТЕП з ПП;
- дослідження електромагнітних процесів в ланцюзі ТЕП при імпульсному регулюванні напруги;
- одержання розрахункових формул для визначення оптимальної частоти модуляції ПП;

- розробка узагальнюючої моделі ТЕП з ІІ у вигляді маркірованої мережі Петрі;
- дослідження стійкості і безпеки структур ІІ за допомогою МП;
- розроблено алгоритм керування ІІ при двоступеневому управлінні напругою живлення;
- отримано результати експериментальних досліджень СУ ТЕП.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції: Power Electronics, Devices Compatibility. PEDC 2001. 2nd Conference. Zielone Gora, Poland. 3-5 September, 2001; науково-технічній конференції з міжнародною участю: “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. Алушта, Крим, 2001, 2002, 2003р.; міжнародній науково-технічній конференції “Електромеханічні системи, методи моделювання й оптимізації”, м. Кременчук, 2003р.; 2-й міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційна техніка й електромеханіка”, м. Луганськ, 2003р.; міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми розвитку рейкового транспорту”, Крим, 2002, 2003р.; міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка і енергоефективність”, Алушта, Крим, 2002, 2003рр.; науково-технічній конференції “Проблеми електромеханічних систем в гірничо-металургійному комплексі”, м. Дніпропетровськ 2004р., щорічних науково-технічних конференціях Криворізького технічного університету м. Кривий Ріг, 1999-2003 рр.

У цілому робота доповідалася на XI-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”, Україна, Крим, 2003 р., розширеному засіданні кафедри “Автоматизовані електромеханічні системи” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (м.Харків, 2003).

Система керування ТЕП рудникового електровозу демонструвалася на ряді міжнародних виставок. У тому числі розробка “Система керування тяговим електроприводом рудникового акумуляторного електровозу” демонструвалась на III-му Московському міжнародному салоні інновацій і інвестицій (м. Москва, Росія, 2003р.).

Публікації

Основні результати дисертаційної роботи викладені в 6 публікаціях, що опубліковані у фахових наукових виданнях.

Структура і обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4-х розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 236 сторінок, з них 63 ілюстрація по тексту, 22 ілюстрації на 22 сторінках; 13 таблиць, з них 6 таблиць на 7 сторінках; 13 додатків на 52 сторінках і 125 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми і необхідність роботи, зв'язок її з науковими

програмами і планами, сформульовані мета і задачі дослідження, показані наукова новизна і практична цінність результатів досліджень, наведені відомості про їх апробацію, дані про публікації і впровадження отриманих результатів.

У першому розділі виконані дослідження за тактикою глобального пошуку базової структури тягового електроприводу для рудникового акумуляторного електровозу. Представлено обґрунтовані критерії оцінки варіантів ТЕП і вибору кращих. Основними критеріями прийняті:

- енергетичний (мінімум втрат електроенергії);
- надійності (мінімум оперативної контакторної апаратури, складних напівпровідникових приладів і інших комплектуючих, мінімум пульсацій струму);
- вартісний (мінімум капітальних витрат і експлуатаційних витрат);
- вагаоб'ємний (компактність імпульсного перетворювача й іншого електроустаткування).

За теоретичну основу дослідження і визначення найбільш ефективної структури ТЕП з імпульсним перетворювачем прийнято алгоритм глобального пошуку базової структури, відповідно до якого відомі і гіпотетично можливі структури ТЕП об'єднані в множину Парето:

$$D^K = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n k_{ij}(x_i) \times P_j \\ O_K(x_i) \\ O_C(x_i) \end{array} \right\} \quad \text{при } y = \text{const}$$

Тут: x_i – параметри;

P_j – коефіцієнти переваги;

K_{ij} – показники якості варіантів;

O_K – обмеження показників K_{ij} ;

O_C – обмеження параметрів і структур;

y – клас умов роботи – загальних для всіх ТЕП.

При цьому коефіцієнти переваги відповідають важливості прийнятих критеріїв оцінки варіантів ТЕП:

$P_j = 3$ для оцінки характеристик, діапазону регулювання, особливостей експлуатації та ін.;

$P_j = 2$ для оцінки надійності і вага-об'ємних показників;

$P_j = 1$ для оцінки економії електроенергії і вартості.

Варіанти ТЕП з найменшими показниками $K_{ij} = K_{\Pi}$, оцінювані в множині Парето з коефіцієнтом $P_j = 3$, далі розглядаються в множині припустимих структур $M_{\text{д}}$ із $P_j = 2$ і потім у множині кращих структур $M_{\text{л}}$ із $P_j = 1$.

Таким чином, багатокритеріальна задача оцінки варіантів із суперечливими показниками, локальні мінімуми яких не збігаються в діапазоні заданих параметрів x_i , зводиться до послідовного

рішення ряду однокритеріальних задач.

У результаті з множини M_L визначається базовий варіант із мінімальним узагальненим показником:

$$K_{\min} = \min \sum_{j=1}^3 \{K_{ij}(x_i) \times P_j\}$$

При аналізі структур ТЕП враховані переваги відомих схем, такі як:

- паралельно-послідовне з'єднання секцій акумуляторної батареї в процесі розгону і тривалого режиму роботи електровозу;
- паралельно-послідовне з'єднання тягових двигунів у процесі розгону і тривалого режиму роботи електровозу;
- перехресне взаємозбудження двигунів у гальмовому режимі;
- відмовлення від примусового послаблення електромагнітного поля тягових двигунів;
- застосування напівпровідникових імпульсних перетворювачів із ШІМ напруги, що використовуються як у тяговому, так і в гальмовому режимах.

В ході досліджень у першому варіанті та подальшому пошуку отримано ряд ІІ з наступними відмінними рисами:

- використано комбінацію одноопераційних тиристорів і IGBT;
- відключення тиристорів здійснюється за допомогою Е – комутації без будь яких додаткових комутаційних елементів;
- схеми забезпечують двоступеневе регулювання напруги живлення на тягових двигунах.

Сполучення тиристорів і IGBT забезпечує низькі капітальні витрати на виготовлення ІІ у порівнянні зі схемами, реалізованими цілком на IGBT, при однаково високих частотах ШІМ, а також зниження втрат електроенергії, зменшення ваги й об'єму ІІ, підвищення надійності.

Виконано аналітичні дослідження квазіперехідних електромагнітних процесів у силовому ланцюзі ТЕП з ІІ із ШІМ напруги акумуляторного електровозу. Встановлено залежність пульсацій струму тягового двигуна від його параметрів і частоти ШІМ:

$$K_i = \frac{\Delta i = i_{\max} - i_{\min}}{2I_M} = \frac{E}{2RI_M} \times \frac{1 - \exp(-\frac{q}{f\tau}) - \exp(\frac{q-1}{f\tau}) + \exp(-\frac{1}{f\tau})}{1 - \exp(-\frac{1}{f\tau})} \quad (1)$$

де K_i – коефіцієнт пульсації струму тягового двигуна;

i_{\max}, i_{\min} – відповідно максимальне і мінімальне миттєві значення струму двигуна;

I_M – середнє значення струму двигуна;

R, L – сумарні активні опори і лінеаризована індуктивність двигуна;

$\tau = \frac{L}{R}$ - електромагнітна постійна часу двигуна;

E – е.р.с. акумуляторної батареї в зневазі її опором і силовими ланцюгами;

f – частота ШІМ напруги;

q – шпаруватість включення ІІ.

Оскільки для тягових двигунів вітчизняних рудникових акумуляторних електровозів при $f \geq 400$ Гц, показники ступеня експонент у рівнянні (1) менш 0,1, припустиме наближення з абсолютною похибкою 3×10^{-3} :

$$K_i = \frac{q(1-q)}{q_0(2.733 f\tau - 1)}, \quad (2)$$

де $q_0 = \frac{RI_{M \max}}{E_G}$ - шпаруватість при рушії електровоза ($n = 0$, протиерс = 0).

$$\text{З (2) випливає: } f = 0.366 \frac{q_0 k_i + q(1-q)}{q_0 k_i \tau}, \quad (3)$$

$$\text{яке має мінімум } f_{\min} \approx \frac{1}{10q_0 k_i \tau}, \quad (4)$$

при $q_m = 0,5$.

З аналізу (4) випливає, що при загальноприйнятому у відомих схемах ІІ однозонному регулюванні напруги на тягових двигунах від $q_0 E$ до E частота f_{\min} , для забезпечення одного і того ж коефіцієнта пульсації струму, повинна бути удвічі більша, ніж при запропонованому в дисертаційній роботі двоступеневому регулюванні напруги – у першій зоні від $\frac{q_0 E}{2}$ до $\frac{E}{2}$, у другій зоні від $\frac{E}{2}$ до E .

Таким чином, одержана пропозиція дає зниження комутаційних втрат у ІІ вдвічі у порівнянні з відомими схемами за інших рівних умов.

Результати аналітичних досліджень електромагнітних процесів у ТЕП підкріплені комп'ютерними дослідженнями, в основу яких покладена модернізована автором математична модель двигуна послідовного збудження.

Комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів проведене за допомогою розроблених програм, розрахункова модель наведена на рис.1. При моделюванні прийняті параметри тягового двигуна ДРТ-13М з врахуванням його тягової характеристики на електровозі АМ8Д. Зняті розрахункові криві струму тягового двигуна на частотах модуляції $f = 300, 400$ і 500 Гц при різних значеннях шпаруватості: q_1 – у першій зоні і q_2 – у другій зоні. Результати представлені на рис.2, де $q_0 = 0,233$ – шпаруватість при рушії електровоза ($n = 0$ об/хв; $U_m = 0$ В), $q_n = 0,363$ – у точці зламу тягової характеристики (при $q_2 \leq q_n$, $I_M = \text{const} = I_{M \max}$; при $q_2 > q_n$, $I_M = \text{var} < I_{M \max}$).

Комп'ютерні значення коефіцієнта пульсації струму тягового двигуна перевищують значення, отримані аналітичним шляхом з (2), (найбільше відхилення 13 % при $q_2 = 0,5$), це обумовлюється, в першу чергу, тим, що в комп'ютерному дослідженні задіяні миттєві значення е.р.с. двигуна.

Результати досліджень електромагнітних процесів у ТЕП використані для оцінки структур, розглянутих у множині M_L , з точки зору якості перетворення електроенергії. Крім того, ці результати враховані при розрахунках комутаційних втрат у напівпровідникових приладах та виконанні їх порівняльного аналізу для оцінки структур у множині M_L .

У підсумку, проведеному у розділі глобального пошуку, виявлена базова структура ТЕП для рудникового акумуляторного електровозу, якою є схема з імпульсним перетворювачем, що плавно перемикає тягові двигуни паралельно-послідовно із ШІМ напруги на них при двоступеневому регулюванні в тяговому режимі і з перехресним взаємозбудженням у гальмовому режимі. Схема наведена на рис.3.

Роботу базової схеми в тяговому режимі ілюструють діаграми на рис. 4.

У другому розділі виконані дослідження і розробка імпульсного перетворювача для отриманого базового ТЕП рудникового акумуляторного електровозу.

Проведено порівняльний аналіз сучасної напівпровідникової елементної бази, у першу чергу IGBT і одноопераційних швидкодіючих (інверторних) тиристорів (SCRI), на предмет можливості їх використання в базовому ПП. Практично IGBT за своїми характеристиками дуже близький до ідеального ключа і може бути використаний у якості VI і VB у базовій схемі ТЕП за рис.3. Однак, такий механічний підхід веде до створення ПП не з кращими енергетичними, вартісними і вага-об'ємними показниками, оскільки прямі і комутаційні втрати в IGBT у 1,5-2,0 рази більші, ніж у SCRI, IGBT істотно дорожче і складніше в керуванні. У цьому плані переваги за SCRI, але для них необхідні пристрої примусового відключення по силовому ланцюзі на базі коливальних LC – контурів, що зводить нанівець переваги SCRI. Рішення проблеми – у використанні комбінації IGBT і SCRI.

На основі проведених досліджень запропоновано використовувати E – комутацію SCRI, коли до тиристора у перебіг часу його відключення прикладається зворотна напруга $E > 60$ В.

В результаті синтезу схем, на базі проведених досліджень, одержано реальну схему ТЕП з ПП, у якій в якості VB використаний одноопераційний тиристор, а в якості VI1 і VI2 використані IGBT. E- комутація тиристора VB здійснюється включенням VI1 і VI2 на час відключення VB.

Розглянуті також практичні питання вибору системи охолодження ПП і конструкторсько-технологічні особливості з урахуванням виконання РВ. Розроблено рекомендації з застосування напівпровідникових приладів у модульному виконанні з розміщенням їх на внутрішніх стінках контейнера ПП із природним повітряним охолодженням.




Теплові розрахунки підтвердили можливість зниження об'єму контейнера ІІ, наприклад, у порівнянні з контролером КТВ виробництва ВАТ "Електромашина" (м. Харків).

Запропоновано до відомої схеми захисту напівпровідникових приладів від наднапружень за допомогою варисторів внести індикатори струму послідовно з варисторами для обліку наробітку останніх. При відпрацьовані ресурсу блок діагностики видає сигнал на заміну варистора.

Розроблено алгоритм двоступеневого керування базовим ІІ рис.5, реалізований у мікропроцесорному блоці керування.

У **третьому розділі** виконано заключний теоретичний аналіз базової структури ТЕП з комбінованим ІІ за методом мереж Петрі й обґрунтування відповідності базової схеми ТЕП і ІІ для рудникового акумуляторного електровозу. Моделі структур ТЕП і ІІ, виконані на базі теорії мереж Петрі, дозволяють наочно описувати структурні особливості функціонування систем.

Для представлення базової структури ТЕП у вигляді моделі відповідно до теорії мереж Петрі послідовність зміни станів структури замінена причинно–наслідковими зв'язками між подіями. Для прив'язки до часу моменти й інтервали часу представлені як події. Взаємодії подій описуються ситуаціями, при яких вони можуть відбутися. Ситуації формуються локальними операціями – умовами реалізації подій. Події й умови представляються символами відповідно в безлічі переходів і безлічі позицій. Графічно переходи зображуються бар'єрами і позначаються t_j , позиції зображуються кружками і позначаються P_j , що зв'язані між собою спрямованими дугами. Позиції мають ємність, вимірювану числом фішок n , що вказується в кружку:

- P_j  , $n = 0$, умова не виконана;
- P_j  , $n = 1$, умова виконана;
- P_j  , умова виконана з n кратним запасом.

Робота мережі Петрі представляється спрацьовуваннями переходів – зміною розмітки позицій шляхом вилучення із вхідних позицій по одній фішці і додавання по одній фішці у вихідні позиції. Якщо жоден з переходів мережі не може спрацювати, мережа зупиняється – ситуація тупикова, у мережу необхідно вводити операції для ліквідації несприятливої ситуації. У підсумку визначається базовий варіант. На рис.6 представлена узагальнена модель базової структури електроприводу у вигляді маркірованої мережі Петрі в тяговому режимі, на рис. 7 узагальнена модель базової структури у гальмовому режимі.

Для раціонального вирішення задачі оптимального керування процесами в системі використано математичний апарат МП, що дозволяє одержати інформацію про систему у вигляді матричного представлення, який добре аналізується і досить адекватно описує причинно-наслідкові залежності, полегшує розробку матричного представлення причинно-наслідкових зв'язків. Описом

МП є визначення двох матриць D^- і D^+ , що представляють вхідну і вихідну функції. Кожна матриця має m рядків (по одному на перехід) і n стовпців (по одному на позицію).

$D^-(j,i) = \#(p_i, I(t_j))$, і $D^+(j,i) = \#(p_i, O(t_j))$, де D^- визначає входи до переходів, а D^+ - виходи.

$e(j)$ - m - вектор, що містить нулі, за винятком j - го компонента. Перехід t_j представляється m - вектором $e(j)$. Перехід t_j у маркіруванні μ дозволений, якщо $\mu \geq e(j)D^-$, а результат запуску переходу t_j в маркіруванні μ , записується як:

$$\begin{aligned} \delta(\mu, t_j) &= \mu - e(j)D^- + e(j)D^+ = \\ &= \mu + e(j)(-D^- + D^+) = \mu + e(j)D \end{aligned}$$

де $D = D^+ - D^-$ - матриця змін.

Тоді для послідовності запусків переходів $\sigma = t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}$ маємо: $\delta(\mu, \sigma) = \mu + f(\sigma)D$.

Реальні маркіровані оцінки стану (M_{1p}) системи (її блоків) дають відхилення від бажаних маркірованих показників ефективності (M_1), що буде відповідати відхиленням маркіруванню моделі:

$$\Delta M = M_1 - M_{1p} \quad (5)$$

З рівняння визначається ідеальний вектор операцій:

$$X = (M_1 - M_0) \cdot D^{-1} \quad (6)$$

На основі рівнянь одержано систему:

$$\begin{cases} X = (M_1 - M_0) \cdot D^{-1} \\ X_p = (M_{1p} - M_0) \cdot D^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

В результаті отримано модель врахування відхилень від нормального режиму:

$$\Delta X = (M_1 - M_{1p}) \cdot D^{-1} \quad (8)$$

Аналіз моделей мереж Петрі на відповідність властивостям обмеженості (відсутність тупикового маркірування), безпеці і схоронності дозволяє стверджувати про їх оптимальну побудову.

У четвертому розділі наведені результати й аналіз експериментальних досліджень ТЕП рудникового акумуляторного електровозу, наведено їх порівняння з теоретичними розрахунками.

Розроблено схеми макета ТЕП для досліджень у тяговому і гальмовому режимах. Макет виготовлений у натуральну величину, його параметри ідентичні параметрам ТЕП електровозу АМ8Д з тяговим двигуном ДРТ-13М. Розроблені програма і методика експериментальних

досліджень, відповідно до яких проведені дослідження макета, близькі до реальних умов на електровозі. Частота ШІМ напруги живлення двигуна в тяговому режимі складала $f = 400$ Гц, у гальмовому режимі ІІ забезпечував $f = 400$ і 800 Гц.

Порівняння експериментальних даних з аналітичними і розрахованими на комп'ютері дають розбіжність не більше 10 %, що дозволяє стверджувати про достатню подібність результатів досліджень і рекомендувати виведені аналітичні співвідношення для практичних розрахунків оптимальної частоти модуляції при заданому коефіцієнті пульсацій струму тягового двигуна і відомих параметрів ланцюгів.

У процесі випробування була також практично підтверджена методика розрахунку снабберів напівпровідникових приладів ІІ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі знайшла подальший розвиток теорія аналізу і синтезу тягових електроприводів з імпульсними перетворювачами напруги для рудникових акумуляторних електровозів на основі рішення задач багатокритеріальної оптимізації і теорії мереж Петрі.

Отримані в дисертаційній роботі результати теоретичних досліджень у сукупності своїй становлять значний внесок у розвиток теорії і практики створення тягових електровозів з імпульсним перетворювачем, а розроблені схемотехнічні рішення дозволяють розробити необхідну високоефективну і енергоекономічну систему керування вітчизняними рудниковими акумуляторними електровозами.

Виконані дослідження дають можливість сформулювати узагальнюючі висновки:

1. В умовах сталості тенденції підвищення цін на електроенергію і збільшення питомої ваги останньої в загальних витратах на видобуток КК підземним способом, запропоновані стратегія і тактика подальшого розвитку методів оптимізації структур і параметрів ТЕП з ІІ, що відкриває можливість створення СУ рудниковими акумуляторними електровозами з очікуваними енергозберігаючими показниками.
2. Уперше розроблений і запропонований теоретико–експериментальний підхід до синтезу ТЕП з ІІ напруги на основі задач багатокритеріальної оптимізації, що відрізняється від відомих розширеним обсягом імовірнісних можливостей перебору аналізованих варіантів, які дозволяють одержати алгоритм оптимізації структур і на його основі поетапно конструювати архітектуру побудови ІІ з необхідними параметрами і техніко-економічними показниками.
3. Запропоновано математичне забезпечення методів оптимізації ТЕП з ІІ, що дозволяє вперше одержати рішення подвійної задачі – забезпечення достатньої наочності поетапного аналізу електромагнітних процесів при високому ступені вірогідності оцінки втрат електричної енергії, що відбуваються в елементах ІІ у функції режимів роботи ТЕП.

4. Запропонована вперше узагальнююча математична модель ТЕП з ІП, що стала базовою для модернізованих методів аналізу і синтезу останніх за критеріями енергоефективності, обумовлює раніше недосягну можливість моделювання комплексу фізичних процесів у ІП ТЕП, спрощуючи сам процес моделювання, а також прискорюючи процес одержання результатів.
5. Уперше створена принципово нова енергоефективна схема комбінованого ІП з Е – комутацією і зонним регулюванням випрямленої напруги в ТЕП рудникових акумуляторних електровозів, що відрізняється від відомих можливістю досягнення зниження на 20-25 % електричних втрат в елементах перетворювача, збільшенням на 25-30% часу роботи АБ, зменшує електромагнітний вплив СУ електровозом на саму систему і канали зв'язку й автоматики, організовані по лініях, прокладених уздовж гірничих виробіток шахт.
6. Розроблена методика аналізу процесів у ланцюгах ТЕП з ІП, що дозволяє, на відміну від відомих, за заданими вхідними параметрами ІП і внутрішнім параметрам ланцюга електроприводу в цілому, врахувати взаємний вплив системи: ТЕП – АБ і тим самим вперше одержати необхідні рівні адаптації керованих сигналів СУ ІП у функції рівня пульсації струму в ланцюзі тягового двигуна.
7. Розроблені вперше методи й алгоритми керування ТЕП з імпульсним регулюванням напруги живлення за критеріями мінімізації енергоспоживання від АБ рудникового електровозу, що відрізняються достатньою універсальністю і дозволяють створювати енергоефективні системи керування електроприводами з двигунами постійного струму, виключивши чи знизивши при цьому до мінімуму пульсації струму в силовому ланцюзі двигуна без застосування громіздких засобів згладжування форм кривих струму.
8. Отримані розрахункові співвідношення і криві для визначення границь ефективного керування ІП за критеріями мінімуму енергоспоживання, що відрізняються від відомих можливістю ефективно використовувати весь діапазон регулювання без ускладнення самої системи і залучення для цього додаткових силових елементів.
9. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження, нові патентоспроможні схемотехнічні рішення використані в науково-дослідних роботах Криворізького технічного університету і передані до ВАТ “Електромашина” для створення вітчизняного вискоефективного електроустаткування і систем керування новими видами рудникових акумуляторних електровозів.

Дослідний зразок СУ рудниковим акумуляторним електровозом з тяговим електроприводом типу та імпульсним регулюванням випрямленої напруги проходить випробування в шахтах.

Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 17,15 тисяч грн. на один електровоз у рік, підтверджений – 4,41 тис. грн. на один електровоз у рік.

Результати досліджень дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в Криворізькому технічному університеті, Українському політехнічному технікумі (м. Кривий Ріг) і Кременчуцькому державному політехнічному університеті (м. Кременчук).

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, рекомендації і висновки є достатньо обґрунтованими, базуються на теоретичному аналізі, коректній постановці розв'язуваних наукових задач, узгоджені в розроблених математичних і фізичних моделях з експериментальними результатами і раніше відомими даними з літературних джерел, апробацією основних положень і результатів на представницьких конференціях і симпозіумах.

Список основних наукових праць, опублікованих за темою дисертації

1. Синчук О.Н., Удовенко О.А., Синтез структуры тягового электропривода с импульсным преобразователем для рудничного аккумуляторного электровоза. // Праці інституту електродинаміки НАН України.-К.-2003.-№3(6).-С.59-63.

Здобувачу належить методика глобального пошуку та визначення очікуваних по мінімуму енергетичних витрат в елементах ТЕП з ІІ, їх оптимальних структур на базі теорії мереж Петрі

2. Сінчук О.М., Удовенко О.О., Сушко Д.Л., Чернишов А.О. До питання про пульсації струму двигуна в тяговому електроприводі з двозонним чопером // Вісник Національного технічного університету "ХПІ".-Харків: НТУ "ХПІ".-2003.-Вип.10.-Т.1.-С.199-202.

Здобувачу належить розробка методології підходу до аналізу і синтезу ТЕП з ІІ із двоступеневим регулюванням напруги живлення, дослідження електромагнітних процесів, виведення аналітичної залежності рівня пульсацій струму в тягових електродвигунах від частоти модуляції імпульсного перетворювача

3. Синчук О.Н., Удовенко О.А., Чернышов А.А. Алгоритм двухзонного управления комбинированным импульсным преобразователем напряжения тягового двигателя электровоза. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.-2003.- Вып.6(6).-С.4-6.

Здобувачу належить розробка теорії та алгоритму керування ІІ при двоступеневому управлінні напругою живлення

4. Сінчук О.М., Удовенко О.О. Энергосберегающий тяговый электропривод с импульсным преобразователем напряжения для рудничных аккумуляторных электровозов // Вісник Східноукраїнського національного університету.-2003.-Вип.10 (68).-Ч.2.-С.34-41.

Здобувачу належить теоретичне та практичне обґрунтування і створення на основі задач багатокритеріальної оптимізації, з урахуванням комбінації напівпровідникових приборів різного типу, плавно послідовно-паралельно самоперемикаємих архітектур схемотехнічних рішень в залежності від режимів роботи ТЕП

АНОТАЦІЇ

Удовенко О.О. Энергозберігаюча система тягового електроприводу рудникового акумуляторного електровозу. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси і системи. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” – Харків –2004.

Дисертація присвячена дослідженню і розробці енергозберігаючого тягового електроприводу рудникового акумуляторного електровозу з комбінованим імпульсним перетворювачем.

Визначено критерії вибору базової структури тягового електроприводу, розвинений і конкретизований алгоритм глобального пошуку оптимальної структури тягового електроприводу й імпульсного перетворювача.

Проведено аналітичні комп'ютерні та експериментальні дослідження перехідних 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 двоступеневого регулювання, що реалізується мікропроцесорним блоком керування.

Запропоновано схему імпульсного перетворювача, що використовує сполучення IGBT і одноопераційних SCR1 – тиристорів з E – комутацією, дослідження якої методами мереж Петрі підтвердили її відповідність для рудникового акумуляторного електровозу.

Ключові слова: тяговий електропривод, імпульсний перетворювач, частота модуляції, моделі мереж Петрі.

Удовенко О.А. Энергосберегающая система тягового электропривода 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 –2004.

Диссертация посвящена исследованию и разработке энергосберегающего тягового электропривода рудничного аккумуляторного электровоза с комбинированным импульсным преобразователем.

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 плавно переключаемыми параллельно – последовательно секциями аккумуляторной батареи и тяговыми двигателями, обеспечивающие существенное снижение токовых нагрузок аккумуляторной батареи в процессе разгона электровоза.

Проведены аналитические компьютерные и экспериментальные исследования квазипереходных электромагнитных процессов в силовой цепи тягового электропривода при ШИМ напряжения, питающего тяговые двигатели, 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 двухступенчатого регулирования, реализованный микропроцессорным блоком управления.

Выполнены аналитические обзоры современной полупроводниковой базы, систем охлаждения и конструктивные особенности преобразователей в исполнении РВ.

Предложены схемы импульсных преобразователей, использующих сочетание IGBT и однооперационных SCRI – тиристоров с E – коммутацией последних. Исследованы электромагнитные процессы в снабберах, выведены аналитические зависимости и разработана методика для выбора параметров снабберов.

Разработаны рекомендации по применению полупроводниковых приборов в модульном исполнении с размещением их на внутренних стенках контейнера ИП с естественным воздушным охлаждением.

К известной схеме защиты полупроводниковых приборов от перенапряжения при помощи варистора, предложено добавить индикаторы тока последовательно с ним для учета его наработки, и при отработки его ресурса блок диагностики выдает сигнал на замену варистора.

В результате сравнительного анализа известных, гипотетически возможных и предложенных схем тягового электропривода с импульсным преобразователем, проведенного по методу глобального поиска, выявлена базовая структура тягового электропривода, исследования которой методами сетей Петри подтвердили ее возможность применения для рудничного аккумуляторного электровоза. Схема тягового электропривода содержит импульсный преобразователь на базе IGBT и SCRI с E – коммутацией, который осуществляет двухступенчатое регулирование напряжения тяговых двигателей посредством ШИМ и плавное параллельно-последовательное соединение их в тяговом режиме. В тормозном режиме в схеме реализуется перекрестное взаимовозбуждение двигателей.

Ключевые слова: тяговой электропривод, импульсный преобразователь, частота модуляции, модели сетей Петри.

Udovenko O.A. Energy conservation system of the traction electric drive of a miner storage electric locomotive. - 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 “Kharkov Politechnical Institute” –Kharkov - 2004.

The dissertation is devoted to research and development energy conservation the traction electric drive of a miner storage electric locomotive with the combined pulse converter.

Criteria of a choice of base structure of the traction electric drive are determined, the algorithm of global search of optimum structure of the traction electric drive and the pulse converter is advanced and concretized.

Are carried out analytical computer and experimental researches transient electromagnetic processes in a power circuit of the traction electric drive at breadth pulse modulation (BPM) the pressure having traction engines as a result of which analytical dependence between frequency of modulation is established, by porosity of the pulse converter, factor of a pulsation of a current, parameters and operating modes of a power circuit; advantages of two-zoned regulation of a voltage are proved. The algorithm of two-zoned regulation realized by the microprocessor block of management is developed.

Circuits of the pulse converters using combination IGBT and one-operational SCRI - thyristor with E - switching of the last are offered. which research by methods of Petri net have confirmed its optimality for a miner storage electric locomotive is offered.

Key words: the traction electric drive, the pulse converter, frequency of modulation, models of Petri net.

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Касаткіна І.В.

Підписано до друку 30.04.2004 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60 x 90/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Обсяг 0,86 авт. аркуша. Наклад 100 прим. Замовлення №

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