

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Омельченко Олександр Володимирович

УДК: 622.625.28-83

**РЕЖИМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І СТРУКТУРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ
ТИПІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ РУДНИКОВИХ КОНТАКТНИХ
ЕЛЕКТРОВОЗІВ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ
2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент **Гузов Едуард Семенович**, ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Юрченко Олег Миколайович**, Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ), завідувач відділу транзисторних перетворювачів;

кандидат технічних наук, доцент **Кутовий Юрій Миколайович**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем.

Захист відбудеться « 16 » жовтня 2014 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпропетровськ, проспект К.Маркса, 19, тел. 0562-47-24-11).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою 49005, м. Дніпропетровськ, проспект К.Маркса, 19.

Автореферат розісланий « 15 » вересня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.В. Остапчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На вітчизняних рудникових електровозах, які нині експлуатуються, використовується контакторно-резисторна система тягового електроприводу (ТЕП) з двигунами постійного струму. Цій системі електроприводу властиві ряд недоліків: вона енергозатратна, ненадійна в експлуатації та морально застаріла.

Для ТЕП такого типу можлива модернізація за рахунок заміни контакторно-резисторних систем керування імпульсними перетворювачами на базі IGBT, що дозволяє досягти плавного регулювання напруги і частоти обертів тягових двигунів. Вона вирішує всі технічні проблеми, крім однієї – залишається ненадійний колекторно-щітковий вузол двигуна постійного струму.

Ефективним напрямом у створенні сучасних тягових систем для нових перспективних типів рудникових електровозів є використання ТЕП змінного струму, що складається з IGBT інвертора та асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. За результатами дослідження традиційна схема електроприводу змінного струму з трифазним інвертором і тяговим асинхронним двигуном (ТАД) для рудникових електровозів не є кращим рішенням з точки зору забезпечення жорстких вимог як з якості перетворення електричної енергії, так і з вагогабаритних показників, показників надійності, ККД і капітальних витрат.

Таким чином, актуальним науковим завданням є розробка компактного за структурою і параметрами та економічного тягового електроприводу на основі використання IGBT-перетворювача та двофазного асинхронного двигуна.

Зв'язок роботи з науковими і виробничими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає напряму наукових досліджень кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет» і виконувалася згідно з держбюджетними темами «Обґрунтування енергоресурсозберігаючих режимів і принципів керування електроенергетичних комплексів гірничо-металургійних підприємств» (№ ДР 0108U000539) та «Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості» (НДР № 30-98-14), де здобувач був виконавцем окремих розділів. Робота реалізує цілі державної програми розвитку машинобудування на 2006-2011 роки, затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 18.04.2006 р. № 516.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних положень, схемотехнічних рішень та алгоритмів управління тяговими електроприводами для підвищення електроенергоефективності функціонування рудникових контактних електровозів шляхом застосування електромеханічного комплексу на базі двофазних тягових асинхронних двигунів та IGBT інверторів.

Для досягнення мети дисертаційної роботи були поставлені та сформульовані наступні наукові завдання:

- обґрунтування підходу і розробка критеріїв оцінки ефективності тягових приводів рудникових електровозів для умов залізорудних шахт;
- проведення аналізу та розробка методів розрахунків фазних струмів двофазного перетворювача напруги, пульсацій магнітного потоку і частоти

обертання ротора двофазного тягового асинхронного двигуна при різних формах живлячої напруги;

- виконання теоретичних і комп'ютерних досліджень електромагнітних процесів і характеристик силових кіл тягового електроприводу з двофазним асинхронним двигуном;

- виконання аналітичного порівняння структур і схем перетворювачів та способів формування напруг і струмів у різних структурах тягових електроприводів з асинхронними двигунами;

- розробка методів розрахунків та порівняння параметрів тягових електроприводів з інверторами напруги різних типів; проведення аналізу та оцінка ефективності й доцільності застосування різних варіантів структур тягових електроприводів з двофазними і трифазними асинхронними двигунами, виявлення оптимального варіанту.

Об'єкт дослідження – динамічні електромагнітні процеси в тяговому електроприводі з двофазними тяговими асинхронними двигунами та IGBT перетворювачами.

Предмет дослідження – системи енергоефективних тягових асинхронних приводів у структурах рудникових електровозів.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань виконувалось з використанням: теорії ймовірності та ймовірнісно-статистичного методу – розрахунок навантажень тягових двигунів рудникових електровозів; методу еквівалентування значень функцій – дослідження необхідної потужності тягових двигунів; диференціальних рівнянь і методу двох складових – аналіз електромагнітних процесів у асинхронній машині; еквівалентного статичного навантаження і гармонійного аналізу – дослідження форм струмів і напруг тягових асинхронних двигунів; диференціальних та алгебраїчних рівнянь, математичного моделювання – модельні дослідження тягових електроприводів із трифазними і двофазними асинхронними двигунами.

Наукові положення:

1. Ймовірнісно-статистичний метод дослідження навантажень і визначення потужності тягових двигунів двомодульного електроприводу для рудникових контактних електровозів в силу того, що перехідні режими роботи становлять 75% всього часу циклу їх руху, є найбільш прийнятним з точки зору максимальної точності розрахунків.

2. Побудова структури тягових електроприводів на базі IGBT-перетворювачів і двофазних асинхронних двигунів здійснюється з використанням широтно-імпульсної модуляції напруги живлення за законом трапеції, що дозволяє зменшити вміст вищих гармонік і підвищити енергоефективність.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше в режимі реального часу встановлені та досліджені характерні режими функціонування тягових двигунів електроприводів двоосних електровозів в умовах вітчизняних залізничних шахт – перехідні процеси під час руху в гірничих виробках та вантажно-розвантажувальних операцій, що дозволило обґрунтувати напрям пошуку сучасної ефективної структури електроприводу;

- формалізовані в обсязі тягової електромеханічної структури, – IGBT-перетворювачі та двофазні асинхронні двигуни, – складові теорії аналізу і

синтезу електроприводів змінного струму для рудникових контактних електро-
возів;

- розроблено математичну модель, адаптовану для дослідження характеристик двофазного тягового асинхронного приводу, що на відміну від відомих має блок завдання сигналу за формою трапеції;
- вперше для різних форм і способів модуляції напруги розроблені нові та модернізовані відомі методи розрахунку фазних струмів інвертора і рівня пульсацій магнітного потоку двофазного тягового асинхронного двигуна;
- вперше для тягових приводів рудникових електровозів розроблено спосіб прямого формування вихідної напруги двофазним IGBT-перетворювачем за законами синусоїди і трапеції, що відрізняє останній меншим вмістом гармонік у формах кривих струму та меншими динамічними втратами в транзисторах перетворювача.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується коректністю постановки теми та вирішуваних теоретичних завдань; використанням вихідних даних, що підтверджуються в реальних умовах; обґрунтованістю прийнятих допущень; адекватністю розроблених математичних моделей відповідних реальних процесів; коректним використанням методів теоретичної електротехніки та математичного аналізу відповідно до завдань досліджень.

Практичне значення отриманих результатів. Представлені в дисертаційній роботі теоретичні розробки дозволили:

- розробити нову структуру тягового електроприводу з двофазним асинхронним двигуном, кожна обмотка якого живиться від свого однофазного IGBT-інверторного моста;
- розробити методика розрахунків параметрів елементів тягових електроприводів, зокрема, двофазних перетворювачів у різних варіантах їх структур;
- отримати методика проведення розрахунків основних техніко-економічних показників тягових асинхронних приводів;
- розробити алгоритм прямого керування IGBT-перетворювачем за законом трапеції для двофазних тягових асинхронних приводів.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети та основних завдань досліджень, збиранні, обробці та аналізі інформації щодо режимів роботи тягових двигунів електровозів, розробці математичної моделі, адаптованої для дослідження характеристик двофазного тягового асинхронного приводу, що дозволило підвищити енергоефективність електрифікованих видів транспорту.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові та практичні результати роботи доповідалися та обговорювалися на XIX та XX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (смт. Миколаївка, вересень 2012 р.; м. Алушта, вересень 2013 р.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, травень 2013 р.); XXII та XXIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми розвитку рейкового транспорту» (м. Ялта, вересень 2012-2013 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, травень 2012 р.); XVIII

та XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Алушта, вересень 2012-2013 рр.); X та XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, березень 2012-2013 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Проблеми енергоефективності та енергозбереження» (м. Кіровоград, листопад 2012 р.); XXXVI науково-технічній конференції викладачів, аспірантів та співробітників Харківської національної академії міського господарства «Міський електротранспорт, електропостачання та освітлення міст» (м. Харків, квітень 2012 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені в 23 наукових працях, у тому числі: 11 статей у фахових наукових журналах і збірниках, 2 з яких – статті в журналі з високим індексом цитування (Index Scopus).

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 247 сторінок, з них 172 сторінки – основний текст, 21 сторінка – ілюстрації по тексту, 5 сторінок – таблиці по тексту, 15 сторінок – найменування використаної літератури, 34 сторінки – додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність, наукова новизна та практична цінність роботи, зв'язок теми дисертаційної роботи з науковими програмами і планами, викладено аналіз проблем, сформульовані мета і наукові завдання, які вирішувалися для досягнення мети.

У першому розділі наведені результати комплексних за обсягом і змістом експериментів з аналізу та оцінки режимів і ефективності функціонування рудникових контактних електровозів.

На підставі експериментів у ряді залізрудних шахт м. Кривого Рогу виявлено, що основними режимами тягових двигунів електровозів є несталі режими, які займають до 75-80% всього часу технологічного циклу руху електрорухомого складу (ЕРС). Встановлено, що існуючі методи розрахунків очікуваних навантажень тягових електричних двигунів (ТЕД), які ґрунтуються на методах математичної статистики, є не ефективні і дають досить приблизний результат.

У ході досліджень підтверджено, що форма графіка навантаження циклу руху електровозів визначається низкою факторів, різноманітних за комбінацією та значних за кількістю і рівнем впливу. Ці фактори носять не завжди чітко та однозначно оцінюваний характер. Як результат встановлено, що для ТЕД електровозів, які працюють в однакових умовах, ступінь впливу цих факторів досить різний, тому фактичне навантаження ТЕД є, по суті, реалізацією випадкового процесу. В зв'язку з цим, у загальному випадку, значення струму тягових двигунів рудникового електровоза можна представити як функцію декількох змінних:

$$I = f(Q_n, i, U, v, \psi, \xi),$$

де: Q_n – вантажопідйомність ЕРС; i – ухили відкатних шляхів; U – режим живлення контактної мережі; v – швидкість руху ЕРС; ψ – коефіцієнт зчеплення коліс електровоза з рейками; ζ – стан рейкових шляхів.

Статистичний аналіз рейсових діаграм руху ЕРС дозволив уперше одержати обґрунтовані практичними дослідженнями впорядковані діаграми навантаження ТЕД, статистичні функції розподілу струму та інтегральну криву його розподілу протягом рейсу ЕРС (рис. 1). Отриману криву запропоновано використовувати при проектуванні і виборі потужності будь-яких ТЕД, у тому числі перспективних, асинхронних видів для двохосьових електровозів рудних шахт.

Проведені дослідження дозволили отримати діаграму (рис. 2) перевищення температури нагріву обмоток двигуна при реалізації дійсного, впорядкованого й усередненого графіків навантаження.

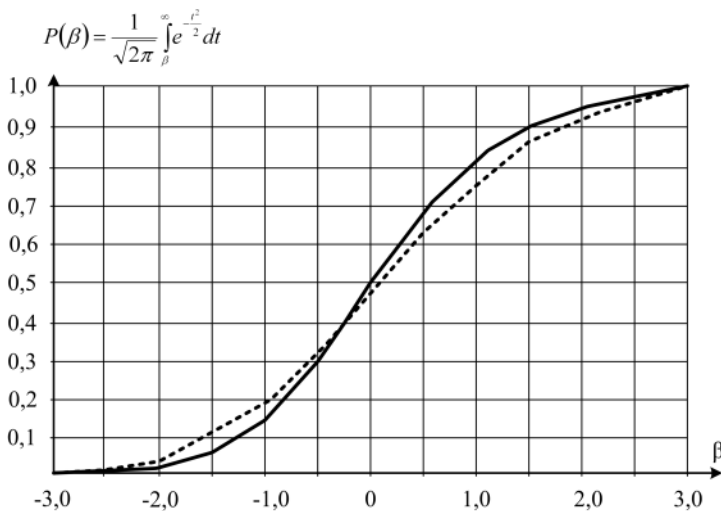


Рис. 1. Інтегральна крива розподілу струму тягових двигунів рудникового електровоза

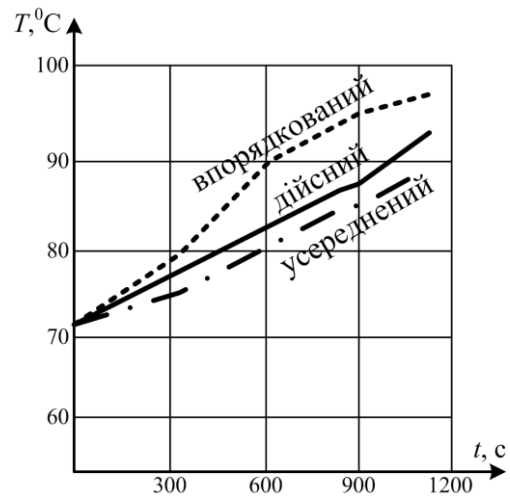


Рис. 2. Перевищення температури обмоток двигуна ДТН-45 при реалізації дійсного, впорядкованого й усередненого графіків навантаження

Збіг кривих нагрівання дійсного й усередненого графіків навантаження може бути досягнуто шляхом врахування різниці між ними додаткового навантаження, вираженою додатком $\beta\sigma$ у формулі $I_p = \bar{I} + \beta\sigma$.

За дослідними даними збіг кривих нагрівання здійснюється при $\beta = 0,5$. У результаті для визначення тривалого струму тягового двигуна запропонована формула:

$$I_{dl} = \bar{I}_1 + 0,5\bar{\sigma}_1,$$

де \bar{I}_1 – генеральне середнє навантаження для періоду руху, $\bar{I}_1 = 0,51Q_n + 10$; σ_1 – середнє квадратичне відхилення.

У другому розділі превентивно сформульована очікувана та реально підтверджена ефективність ТЕП на базі ТАД для рудникових типів електровозів. Показано, що теоретичним обґрунтуванням ідентичності трифазного і двофазного асинхронних двигунів є рівність узагальнених параметрів при однакових потужностях, моментах, обертах та ін.

Узагальнений просторовий вектор потокозчеплення (поток магнітного поля) $\bar{\psi}_S$ трифазної асинхронної машини визначається виразом:

$$\bar{\psi}_S = \frac{2}{3} \left(\psi_A + \bar{a} \cdot \psi_B + \bar{a}^2 \cdot \psi_C \right),$$

де $\bar{a} = \exp\left(j \frac{2}{3} \pi\right)$; $\bar{a}^2 = \exp\left(j \frac{4}{3} \pi\right)$.

Для двофазної машини:

$$\bar{\psi}_S = \bar{\psi}_\alpha + j \bar{\psi}_\beta,$$

де α – дійсна вісь, β – уявна вісь j (рис. 3).

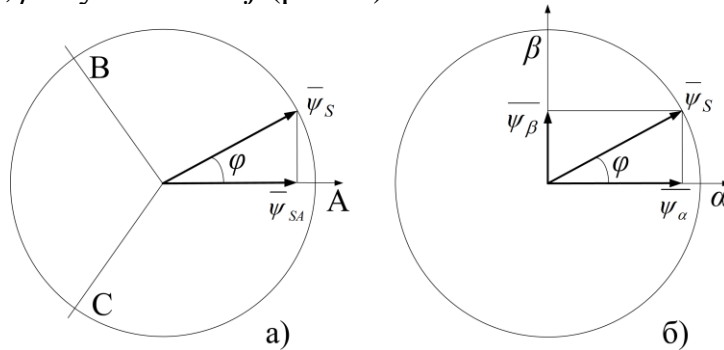


Рис. 3. Подання узагальненого просторового вектора потоку $\bar{\psi}_S$: а) у трьох нерухомих осях А, В, С; б) у двох нерухомих осях α , β

Аналогічно для струмів і напруг.

Зв'язок між трифазною і двофазною системами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\psi}_\alpha &= \frac{2}{3} \left(\bar{\psi}_A - \frac{\bar{\psi}_B + \bar{\psi}_C}{2} \right) = \bar{\psi}_A \\ \bar{\psi}_\beta &= \frac{\bar{\psi}_B - \bar{\psi}_C}{\sqrt{3}} \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} \bar{\psi}_A &= \bar{\psi}_\alpha \\ \bar{\psi}_B &= -\frac{1}{2} \bar{\psi}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\psi}_\beta \\ \bar{\psi}_C &= -\frac{1}{2} \bar{\psi}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\psi}_\beta \end{aligned} \right\}.$$

Аналіз електромагнітних процесів в асинхронній машині у тяговому (руховому) і гальмівному (генераторному) режимах тягового електроприводу виконано на базі узагальнених параметрів.

$$\begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{I}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt}; \quad \bar{U}_r = 0 = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt}; \\ \bar{\psi}_S &= (L_S + L_\mu) \cdot \bar{I}_S + L_\mu \cdot \bar{I}_r; \quad \bar{\psi}_r = L_\mu \cdot \bar{I}_S + (L_r + L_\mu) \cdot \bar{I}_r, \end{aligned}$$

де L_S , L_r – індуктивності розсіювання обмоток статора і ротора відповідно;

L_μ – індуктивність намагнічування;

$(L_S + L_\mu) = L_{S\Sigma}$ і $(L_r + L_\mu) = L_{r\Sigma}$ – повні індуктивності обмоток.

Відповідно до цих рівнянь побудовані схеми заміщення асинхронної машини в тяговому та гальмівному режимах. Також побудовані векторні діаграми холостого ходу, навантаженого двигуна в тяговому і гальмівному режимах роботи тягового електроприводу.

При регулюванні за допомогою ШІМ напруги живлення частота і форма напруги двигуна задаються інвертором (рис. 4).

Оскільки викривлення напруги відбувається з частотою модуляції $f_m=2\dots 5$ кГц, то воно позначається на збільшенні втрат у сталі асинхронного двигуна, але практично не веде до збільшення пульсацій моменту асинхронного двигуна. Тому рекомендована частота модуляції IGBT 2-3 кГц.

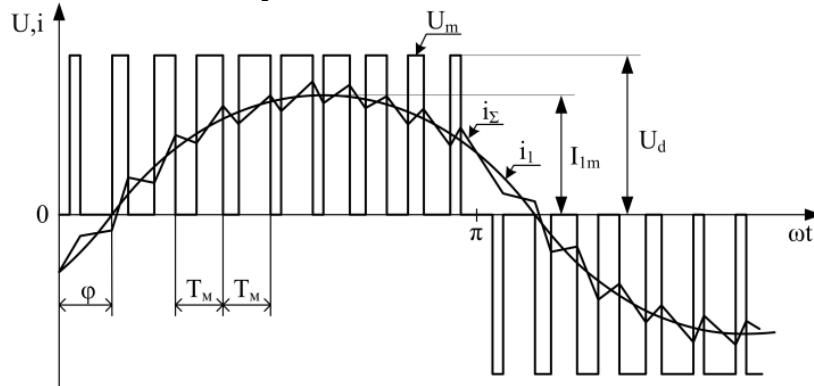


Рис. 4. Діаграми, що модулюються, по синусоїді напруги і струму асинхронного двигуна

У третьому розділі наведено аналіз кривих напруги та струмів асинхронного двигуна, що формуються за різними законами. При амплітудному регулюванні (АР) напруги в системі гармонійному аналізу підлягає крива напруги, що поєднує різні окремі випадки (рис. 5).

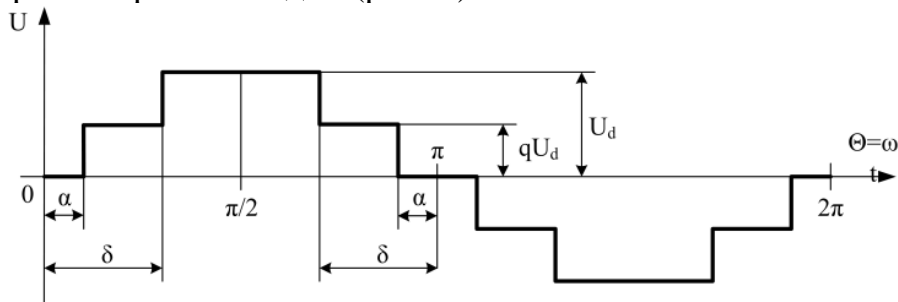


Рис. 5. Об'єднуюча крива напруги: $\lambda = \text{var}$ – кут нульового ступеня; $\delta = \text{var}$ – кут проміжного ступеня; $q = \text{var}$ – рівень проміжного ступеня напруги, (0...1) від U_d , що живить перетворювач

У результаті варіацій λ , δ , q отримано, що в традиційній схемі ТАП при $\lambda=0$, $\delta = \pi/3$, $q=0,5$ відношення діючого значення першої гармоніки напруги до діючого значення всієї кривої $\tilde{U}_1/\tilde{U}_\Sigma = 0,955$. Найкраще наближення до синусоїди $\tilde{U}_1/\tilde{U}_\Sigma = 0,979$ дає $\lambda=0$, $\delta = \pi/5$, $q=0,354$.

При різних λ , δ , q розраховані криві миттєвих значень фазних струмів двигуна за методом двох складових, при якому: основні гармоніки струмів розраховані для схеми заміщення двигуна, що обертається; сумарне значення струмів вищих гармонік обчислено за параметрами схеми заміщення загальмованого двигуна, оскільки ковзання вищих гармонійних у полі основної гармоніки близько до одиниці, з урахуванням допущення про можливість представлення загальмованого ТАД еквівалентним статичним активно-індуктивним навантаженням.

Таким чином, струм фази $i_\phi(\Theta)$ представляється у вигляді двох складових: струму першої гармоніки $i_1(\Theta)$, що залежить від частоти обертання ротора ω_r ТАД, та суми струмів усіх вищих гармонік $i_B(\Theta)$, що практично не залежить від ω_r :

$$i_\phi(\Theta) = i_1(\Theta) + i_B(\Theta).$$

Процедура обчислення фазного струму зводиться до основного співвідношення методу двох складових:

$$i_\phi(\Theta) = i_1(\Theta) + i_K(\Theta) - i_{1K}(\Theta) = i_c(\Theta) + i_K(\Theta),$$

де $i_K(\Theta)$ – реакція схеми заміщення загальмованого ТАД на прикладену ступеневу напругу по рис. 5;

$i_{1K}(\Theta)$ – струм першої гармоніки в режимі загальмованого ТАД;

$i_c(\Theta) = i_1(\Theta) + i_K(\Theta)$ – синусоїдна складова струму фазного струму ТАД, визначається першою гармонікою прикладеної напруги.

Струм $i_K(\Theta)$ обчислюється за методом припасовування по інтервалах протягом дії ступеня напруги об'єднуючої форми.

Аналіз форми струму і напруги асинхронного двигуна в традиційній системі ТАП при регулюванні за допомогою ШІМ напруги виконана методом векторної ШІМ синусоїдної форми. Миттєві значення фазних напруг зводяться в узагальнений вектор аналогічно:

$$\bar{U}_S = \frac{2}{3}(U_A + \bar{a}U_B + \bar{a}^2U_C).$$

Модуль узагальненого вектора

$$|\bar{U}_S| = U_S = \frac{2}{3}U_d.$$

За період $T_S = 1/f_S$ вихідної напруги вектор \bar{U}_S робить повний оберт по окружності сходами тривалістю періоду модуляції $T_M = 1/f_M$.

На кожному періоді T_M включається трійка IGBT на час τ_S (тривалість імпульсу напруги):

$$\tau_S = T_M \frac{U_i}{U_S},$$

де U_i – усереднений модуль (радіус) інтеграла від синусоїди $U_{1m} \sin \omega_S t$ на даному періоді модуляції.

Для симетрії напруги, що формується, на періоді модуляції останній розбитий на два дзеркальні півперіоди. Таким чином, на періоді T_M відбувається шість комутацій (включень + відключень) IGBT.

Однофазний міст дозволяє більш простим чином формувати обвідну синусоїду фазної напруги, а саме: за методом прямої ШІМ.

Тривалість модулюючого імпульсу τ_N на будь-якому інтервалі $[(N-1)T_M \dots NT_M] = T_M$ модуляції, виходячи з рівності площ імпульсу та під синусоїдою:

$$U_a \tau_N = U_i T_M = \int_{(N-1)T_M}^{NT_M} U_{1m} \sin \omega_S t = \frac{U_{1m}}{\omega_S} \cdot 2 \sin \frac{2N-1}{2} \omega_S T_M \cdot \sin \frac{1}{2} \omega_S T_M.$$

Враховуючи $\sin \frac{1}{2} \omega_S T_M = \sin \frac{\pi f_S}{f_M} = \sin \frac{\pi 50}{5000} = \sin 0,031416 = 0,031411$

при частоті напруги двигуна $f_s=50$ Гц і частоті модуляції $f_m=5$ кГц, ухвалюємо $\sin \frac{1}{2} \omega_S T_M = \frac{\omega_S T_M}{2}$.

Тоді $U_d \tau_N = U_{1m} T_M \sin \frac{2N-1}{2} \omega_S T_M$, звідки $\tau_N = \frac{U_m}{U_d} T_M \sin \frac{2N-1}{2} \omega_S T_M$,

де U_{1m} – амплітуда заданої синусоїди напруги.

Таким чином, формування синусоїди в однофазному мосту за методом прямої ШІМ можна робити простим обчисленням τ_N .

Альтернативною способом керування інвертором за синусоїдним законом є спосіб керування за законом трапеції (рис. 6).

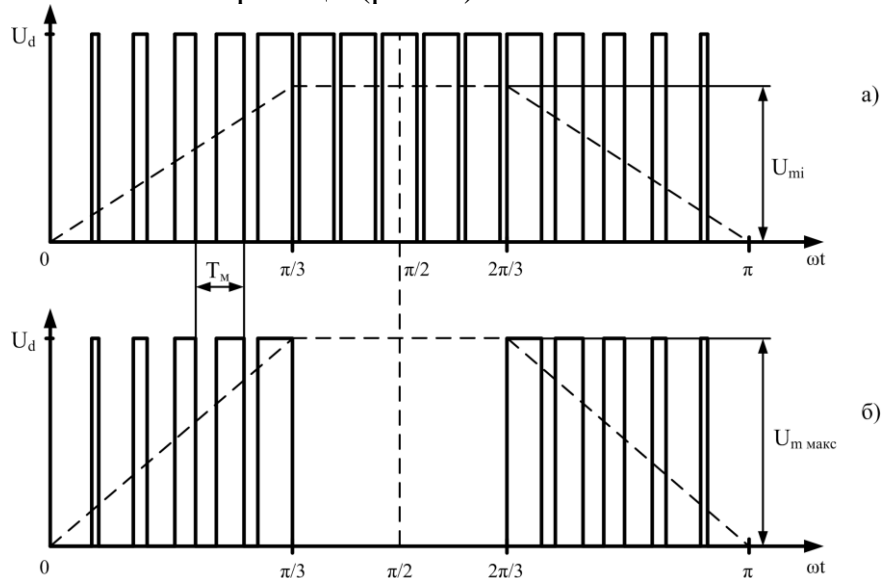


Рис. 6. Діаграми напруги за формою трапеції

- Із розкладання в ряд Фур'є кривої за формою трапеції випливає:
- амплітуда першої гармоніки напруги $U_{1m} = 1,053 U_d$;
 - діюче значення першої гармоніки напруги $\tilde{U}_1 = 0,745 U_d$;
 - діюче значення кривої за формою трапеції $\tilde{U}_\Sigma = 0,7456 U_d$;
 - коефіцієнт спотворення $K_C = \tilde{U}_1 / \tilde{U}_\Sigma = 1,0$;
 - коефіцієнт використання напруги живлення $K_d = U_{1m} / U_d = 1,053$;
 - третя гармоніка відсутня;
 - діюче значення п'ятої (найбільшої з вищих) гармоніки $\tilde{U}_5 = 0,03 U_d$;
 - коефіцієнт вищої гармоніки $K_B = \tilde{U}_5 / \tilde{U}_1 = 0,04$, що менш 0,6 припустимих за стандартом.

Наведені показники перевершують показники синусоїдної кривої у традиційній схемі:

- коефіцієнт використання напруги живлення на 10% вище;
- коефіцієнт спотворення дорівнює одиниці проти 0,955 синусоїди.

Перевагою кривої напруги за формою трапеції є також те, що при максимальній нарузі не потрібно ШІМ на інтервалі $[\pi/3 \dots 2\pi/3]$, у результаті чого динамічні втрати в IGBT знижуються на третину. Формування трапеції прямим методом ШІМ суттєво спрощує алгоритм керування.

Отже, ступінчасті форми напруги при АР містять низькочастотні складові, які впливають на механічні характеристики двигуна, що робить АР не конкурентоспроможним.

При ШІМ високочастотна складова (частота модуляції порядку 5кГц) не впливає на механічні характеристики двигуна.

Метод прямої ШІМ напруги використовує три комутації IGBT проти шести за методом векторної ШІМ у трифазній системі та дві комутації у двофазній системі, що відповідно вдвічі і втричі знижує динамічні втрати в IGBT.

Формування кривої напруги за формою трапеції забезпечує електроприводу додаткові переваги в порівнянні з синусоїдою.

У четвертому розділі наведені розроблені та реалізовані принципи порівняльного аналізу можливих структур систем ТАП за енергетичним показником, обсягом, надійністю і вартістю комплектуючих, а також показниками якості електроенергії. Розроблені методики розрахунків параметрів і елементів ТАП, здійснений синтез схем ТАП.

Досліджені були наступні варіанти систем ТАП:

- традиційний, із трифазним ТАД (ТАП-3 Δ);
- альтернативний, із трифазним ТАД, обмотки якого утворюють розімкнутий трикутник та живляться кожна від свого однофазного IGBT інверторного моста (ТАП-3 Δ);
- альтернативний, із двофазним ТАД, обмотки якого живляться кожна від свого однофазного IGBT інверторного моста (ТАП-2), рис. 7;
- альтернативний, складений із двофазного ТАД, обмотки якого живляться від своїх комбінованих перетворювачів (ТАП-комбі).

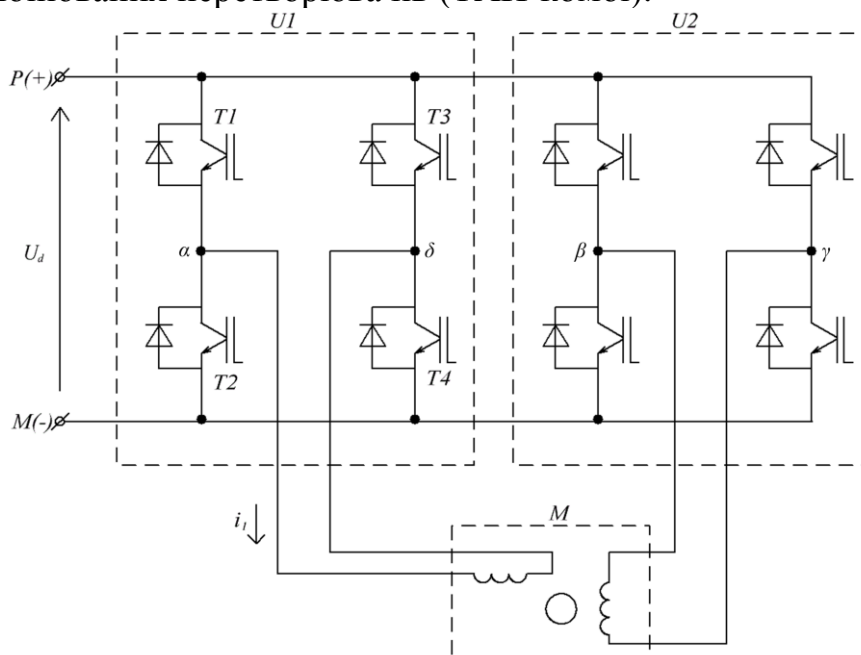


Рис. 7. Спрощена принципова схема ТАП-2

Результати розрахунків показників варіантів ТАП зведено в таблицю 1. Показники дані у відносних одиницях, як базовий прийнятий ТАП-3λ.

Таблиця 1

Показники варіантів ТАП

Системи	Показники, в.о.				
	ΔP^*	η^*	V^*	H^*	S^*
ТАП-3λ	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ТАП-3Δ	0,39	1,016	0,59	2,0	1,34
ТАП-2	0,48	1,014	0,65	1,33	0,89
ТАП-комбі	1,46	0,987	1,31	0,77	0,48

де ΔP^* – відносні втрати потужності в перетворювачах; η^* – відносний ККД перетворювача; V^* – відносний обсяг перетворювача; H^* – відносний показник надійності перетворювача; S^* – відносна вартість комплектуючих перетворювача.

За даними таблиці відповідно до мінімуму приведених затрат перевагу має двофазний тяговий електропривод ТАП-2, який у порівнянні з традиційним ТАП-3λ володіє на 35% меншим об'ємом перетворювача, на 52% меншими втратами потужності в перетворювачі, на 33% вищою надійністю перетворювача, на 10% меншою вартістю комплектуючих перетворювача.

П'ятий розділ присвячено питанню розробки імітаційних моделей трифазної та двофазної систем ТАП рудникових електровозів.

Для моделювання графіків електромагнітних процесів використовувалася одна з сучасних систем моделювання Matlab-Simulink, що забезпечує високу якість вирішення завдань при застосуванні до електромеханічних систем. Результати представлені на рис. 8, 9.

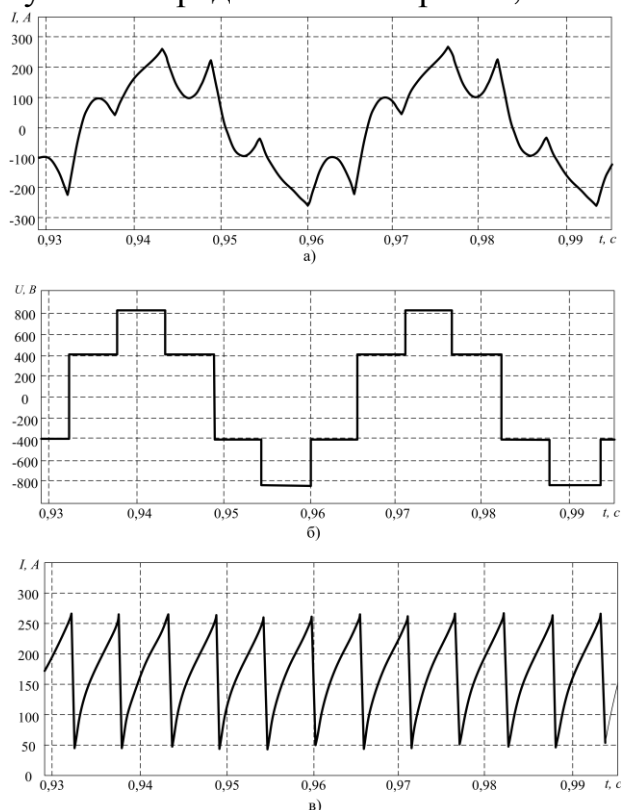


Рис. 8. Машинограми електромагнітних процесів у трифазній системі тягового асинхронного приводу: а) фазний струм, б) вихідна напруга, в) вхідний струм

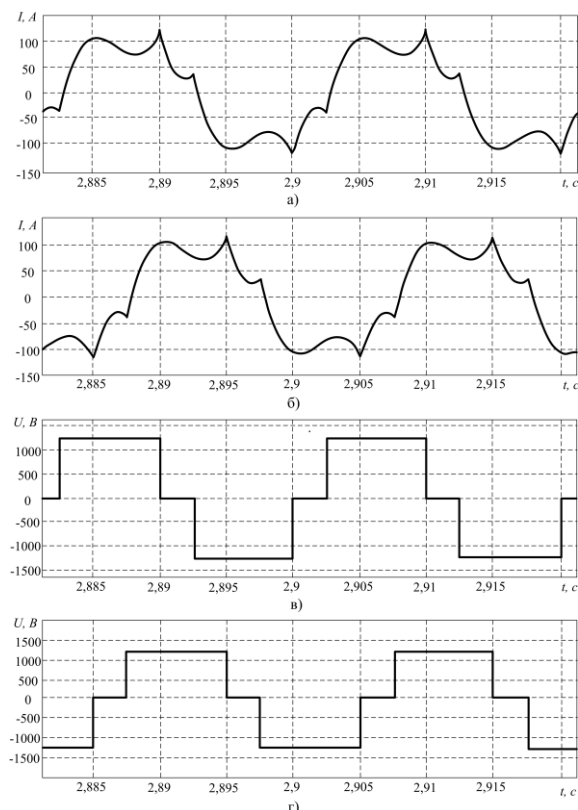


Рис. 9. Машинограми електромагнітних процесів у двофазній системі тягового асинхронного приводу: а) струм фази А, б) струм фази В, в) напруга фази А, г) напруга фази В

Моделювання перехідних процесів розроблялося в середовищі PSIM.

На рис. 10, 11 представлено гармонійний склад струму статора двофазного асинхронного двигуна при ШІМ напруги живлення за законами керування: синусоїдний та за формою трапеції. Аналіз наведених рисунків показує, що при законі формування кривої струму за формою трапеції 1 гармоніка збільшена на 1,7% у порівнянні із синусоїдним законом, а 5 і 7 гармоніки зменшені на 34,96% і 79,16% відповідно, що підтверджує ефективність керування за запропонованим законом.

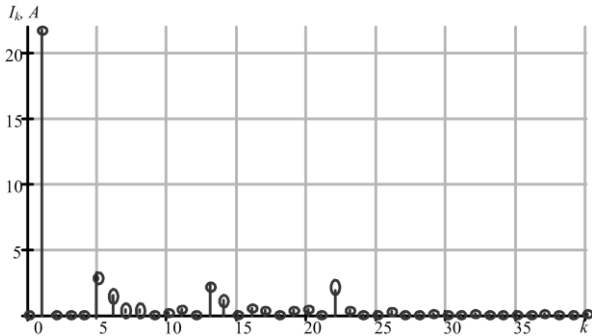


Рис. 10. Гармонійний склад струму двофазного двигуна при ШІМ напруги живлення за синусоїдним закон керування

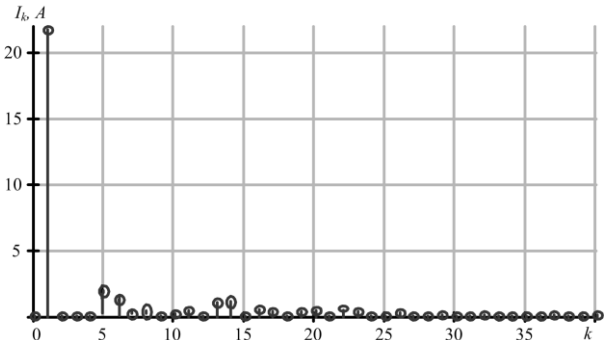


Рис. 11. Гармонійний склад струму двофазного двигуна при ШІМ напруги живлення за законом керування у вигляді трапеції

Отримані в результаті моделювання машинограми струмів і напруг для трифазних і двофазних систем ТАП підтверджують отримані в попередніх розділах залежності. Розбіжність між кривими, отриманими аналітичним шляхом, і кривими, отриманими в результаті математичного моделювання, не перевищують 1-3%.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна наукова задача підвищення енергетичної ефективності тягових приводів змінного струму рудникових електровозів шляхом удосконалення системи керування із застосуванням двофазних асинхронних двигунів.

Дослідження, виконані в дисертаційній роботі, дозволяють сформулювати наступні узагальнені висновки:

1. З аналізу науково-технічної літератури встановлено, що існуючі контактно-резисторні системи тягових електроприводів постійного струму рудникових електровозів не є енергоефективними, оскільки в ході регулювання частоти обертання тягових двигунів у регулювальних резисторах втрачається до 50% електричної енергії.

2. Експериментально встановлені й досліджені характерні режими функціонування тягових електроприводів рудникових електровозів в умовах залізничних шахт. Визначено, що перехідні процеси складають близько 75% часу технологічного циклу руху електрорухомого складу у гірничих виробках.

3. Для вибору сучасного і перспективного виду енергоефективного тягового електроприводу:

- обґрунтовано підхід і розроблено критерії оцінки ефективності тягових приводів рудникових електровозів для умов залізородних шахт;

- проведено аналіз та розроблено методи розрахунків фазних струмів двофазного перетворювача напруги, пульсацій магнітного потоку і частоти обертання ротора двофазного тягового асинхронного двигуна при різних формах живлячої напруги;

- виконано теоретичні та комп'ютерні дослідження електромагнітних процесів і характеристик силових кіл тягового електроприводу з двофазним асинхронним двигуном;

- удосконалено методи розрахунку параметрів елементів тягового електроприводу, зокрема, двофазних перетворювачів;

- виконано аналітичне порівняння традиційного й альтернативних варіантів тягових електроприводів, обґрунтована і рекомендована для практичної реалізації нова архітектура тягового приводу двоосних рудникових електровозів: двофазний асинхронний двигун – IGBT-перетворювач. Вона дозволяє, порівняно з традиційним тяговим електроприводом із трифазним асинхронним двигуном, обмотки якого з'єднані в зірку і живляться від трифазного IGBT інверторного моста, зменшити об'єм перетворювача на 35%, зменшити втрати потужності в перетворювачі на 52%, збільшити надійність перетворювача на 33%, зменшити вартість комплектуючих перетворювача на 10%;

- запропоновано і досліджено спосіб формування вихідної напруги перетворювача за законом трапеції, що дозволяє додатково підвищити ефективність перспективної системи тягового електроприводу;

- проведені комп'ютерні дослідження електромеханічних процесів у структурі двофазні тягові асинхронні двигуни – IGBT-інвертор, які підтверджують їх достатню збіжність з аналітичними дослідженнями.

4. Результати досліджень, проведених у рамках цієї дисертаційної роботи, отримали відповідне впровадження на спеціалізованих промислових підприємствах і організаціях та передані їм як конструктивні рішення для подальшого використання при розробці нових типів рудникових електровозів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. К вопросу оценки первичных критериев электробезопасности при эксплуатации тяговых контактных сетей железорудных шахт / О. Н. Синчук, С. Т. Толмачов, А. А. Харитонов, А. В. Омельченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Науковий журнал. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 5/2013 (82). – С. 48-53. (наукометрична база даних Index Copernicus).

2. Идентификация электрических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов / И. О. Синчук, Л. В. Сменова, А. В. Омельченко, И. А. Луценко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Ми-

хайла Остроградського. Науковий журнал. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 6/2013 (83). – С. 34-38. (наукометрична база даних Index Copernicus).

3. Тытюк В. К. Исследование режимов энергопотребления электропривода рудничных электровозов с широтно-импульсным преобразователем постоянного тока / В. К. Тытюк, И. А. Луценко, А. В. Омельченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 5/4 (29). – С. 67-70.

4. Омельченко А. В. Анализ эффективности использования электропривода рудничных электровозов с широтно-импульсным преобразователем постоянного тока / А. В. Омельченко, В. К. Тытюк, И. А. Луценко // Вісник КТУ. – 2008. – №22. – С. 166-169.

5. Гузов Э. С. Двухфазный асинхронный тяговый электропривод рудничных электровозов / Э. С. Гузов, А. В. Омельченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 4/2011 (16). – С. 90-95.

6. Гузов Э. С. Анализ электромагнитных процессов в двухфазной асинхронной машине тягового электропривода рудничного электровоза / Э. С. Гузов, О. Е. Мельник, А. В. Омельченко // Вісник ДВНЗ КНУ. – 2012. – Вип. 30. – С. 151-155.

7. К вопросу стратегии создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза для рудных шахт / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук [и др.] // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 95(1). – С. 139-143.

8. Вероятностно-статический метод расчета электрических нагрузок тяговых двигателей рудных электровозов / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, А. В. Омельченко [и др.] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – К. : Техніка. Одеський національний політехнічний університет, 2012. – № 07/(83). – С. 34-41.

9. Определение мощности тяговых двигателей рудничных электровозов в неустановившихся режимах работы / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук, А. В. Омельченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (18). – С. 91-95.

10. Синчук И. О. Моделирование динамических режимов работы двухфазного тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза / И. О. Синчук, А. В. Омельченко, Д. А. Шокарев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 232-235.

11. Омельченко А. В. Двухфазный тяговый асинхронный электропривод рудничных контактных электровозов / А. В. Омельченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 24-36.

12. К сравнительной оценке структуры и параметров тягового электро-технического комплекса: IGBT-преобразователь – двухфазный асинхронный

двигатель двухосного электровоза / Э. С. Гузов, И. О. Синчук, О. Е. Мельник, А. В. Омельченко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-виробничого журналу.* – Кременчук : КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 236-238.

13. Омельченко А. В. Модельные исследования двухфазного тягового электропривода рудничного электровоза / А. В. Омельченко // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи, методи моделювання та оптимізації* : зб. наук. пр. X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук : КрНУ, 2012. – С. 257-258.

14. Синчук И. О. Моделирование законов ШИМ напряжения и режимов функционирования тяговых комплексов: IGBT-преобразователь – двухфазный асинхронный двигатель / И. О. Синчук, А. В. Омельченко, Д. А. Шокарев // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енерго-ефективність».* Науково-прикладний журнал : у 4-х ч. — Харків : НТУ «ХП», 2012. – Ч.3. – С. 151-154.

15. Электромагнитные процессы в тяговом электроприводе рудничного электровоза с двухфазными тяговыми асинхронными двигателями / А. В. Омельченко, Э. С. Гузов, О. Е. Мельник, С. В. Рыбинский // *Проблеми розвитку рейкового транспорту* : зб. наук. пр. XXII міжнародної науково-технічної конференції / *Вісник СНУ ім. В. Даля.* – 2012. – №5 (176). – Ч.1. – С. 186-191.

16. Омельченко А. В. О создании энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза / А. В. Омельченко, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа // *Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов: сборник научных трудов XXXVI научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства.* – Харьков : ХНАГХ, 2012. – Ч.2 – С. 60-61.

17. Омельченко А. В. Анализ форм токов и напряжений двухфазного тягового асинхронного двигателя формируемых методами ШИМ напряжения / А. В. Омельченко // *Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Проблеми енергоефективності та енергозбереження».* – Кіровоград : КНТУ, 2012. – С. 24-26.

18. Омельченко А. В. К вопросу применения асинхронных типов тяговых двигателей для приводов рудничных двухосных электровозов / А. В. Омельченко // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи, методи моделювання та оптимізації* : зб. наук. пр. XI міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. – Кременчук : КрНУ, 2013. – С. 17-18.

19. Омельченко А. В. Оценка и сравнение форм токов и напряжений двух и трехфазных преобразователей при шим напряжения питания двухфазных тяговых двигателей / А. В. Омельченко, О. Е. Мельник // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Специальный выпуск. Силовая электроніка та енерго-ефективність* : зб. наук. пр. XIX міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : НТУ «ХП», 2013. - Т. 2. – С. 26-29.

20. Синчук И. О. К вопросу выбора типа двигателей для рудничных контактных электровозов / И. О. Синчук, А. В. Омельченко // Проблемы автоматизованого електропривода. Теорія й практика. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск : зб. наук. пр. XX міжнародної науково-технічної конференції – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 36(1009). – С. 310-312.

21. Синчук И. О. Структура энергоэффективного тягового электромеханического комплекса для двухосных электровозов / И. О. Синчук, А. В. Омельченко // Проблемы автоматизованого електропривода. Теорія й практика. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск : зб. наук. пр. XX міжнародної науково-технічної конференції – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 36(1009). – С. 401-402.

22. Синчук О. Н. Выбор оптимального вида тягового электромеханического комплекса двоосных электровозов с асинхронными электрическими двигателями / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, А. В. Омельченко // Проблемы розвитку рейкового транспорту : зб. наук. пр. XXIII міжнародної науково-технічної конференції / Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2013. – №18 (207) – Ч.1. – С. 144-147.

23. К вопросу стратегии создания энергоэффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза для рудных шахт / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, И. О. Синчук [и др.] // Сталий розвиток промисловості та суспільства : зб. наук. пр. міжнародної науково-технічної конференції. – Кривий Ріг : ДВНЗ «КНУ», 2012. – Т1. – С. 310-312.

У роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належать: [3-5, 7, 16, 23] – тактика підходу до аналітичного порівняння структури тягового електроприводу змінного струму з IGBT-інверторами та двофазними асинхронними двигунами для рудникових контактних електровозів; [6, 15] – теоретичні дослідження електромагнітних процесів у колах тягового асинхронного приводу рудникового контактного електровоза; [10, 1, 14] – синтез математичної моделі тягового асинхронного двигуна для дослідження статичних і динамічних режимів функціонування тягового приводу електровоза; [8, 9, 2, 12, 19, 20] – одержання аналітичних розрахункових співвідношень параметрів системи «автономний інвертор напруги – двофазний тяговий асинхронний двигун»; [7, 16, 21] – розробка тактики підходу до створення архітектури побудови вискоефективного тягового електроприводу з двофазними асинхронними двигунами і IGBT-перетворювачем та теоретичні дослідження останніх; [5, 12, 22] – розробка авторського варіанту схемотехнічного рішення тягового асинхронного приводу для рудникового контактного електровозу.

АНОТАЦІЯ

Омельченко О.В. Режимы функционирования и структуры энергоефективных типов тяговых электроприводов рудниковых контактных электровозів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». Державний

вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2014.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача з розробки складових теорії аналізу та синтезу структур тягових електроприводів типу «IGBT-інвертор – асинхронний двигун» як багатомодульних систем, що дозволило підвищити енергоефективність електрифікованих видів транспорту.

Згідно з розробленими критеріями оцінки ефективності тягових електроприводів визначено оптимальний варіант – двофазний тяговий електропривод, що містить асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, кожна з двох обмоток якого живляться від однофазного IGBT інверторного моста. В ході досліджень проаналізовані форми струмів і напруги при амплітудному й ШІМ регулюванні напруги двигуна. Рекомендована до реалізації фазна напруга двигуна за формою трапеції, що організовується за допомогою прямої ШІМ напруги, коефіцієнт використання напруги живлення якої на 10% вищий за синусоїдну криву.

У результаті досліджень визначено, що двофазний тяговий асинхронний привод має переваги перед традиційним трифазним приводом за такими параметрами: менший об'єм перетворювача на 35%, втрати потужності в перетворювачі менші на 52%, надійність перетворювача вища на 33%, вартість комплектуючих перетворювача менша на 10%.

Ключові слова: тяговий асинхронний привод, двофазний асинхронний двигун, енергоефективний тяговий електричний привод.

АННОТАЦИЯ

Омельченко А.В. Режимы функционирования и структуры энергоэффективных типов тяговых электроприводов рудничных контактных электровозов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача по разработке составляющих теории анализа и синтеза структур тяговых электроприводов типа «IGBT-инвертор – асинхронный двигатель» как многомодульных систем, что позволило повысить энергоэффективность электрифицированных видов транспорта. Для этого были проведены исследования по обоснованию и разработке методики расчета электрических нагрузок тяговых двигателей двухосных (рудничных) электровозов.

Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что предложенный вероятностно-статистический метод, в отличие от других известных методов оценки нагрузочных рейсовых диаграмм работы рудничных электровозов, позволяет установить реальные параметры распределения элек-

трических нагрузок тяговых двигателей этих видов электровозов и рекомендуется для определения их мощности.

Полученные уравнения, описывающие характеристики обобщенного асинхронного двигателя, позволили установить прямое соответствие обобщенных параметров трёхфазной и двухфазной асинхронной машины. Проведенный анализ векторных диаграмм, диаграмм напряжения и тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при холостом ходе, под нагрузкой и в генераторном режиме, показал целесообразность применения двухфазных асинхронных двигателей для тяговых приводов.

В ходе исследований проанализированы формы токов и напряжений при амплитудном и ШИМ регулировании напряжения двигателя. Рекомендована к реализации трапецеидальная форма фазного напряжения двигателя, организуемая посредством прямой ШИМ напряжения, коэффициент использования питающего напряжения которой на 10% выше синусоидной кривой.

Анализ структур и параметров тяговых приводов: асинхронные двигатели – IGBT-преобразователь при трёхфазной и двухфазном исполнении позволил произвести сравнительную оценку четырёх вариантов, а именно:

- трёхфазный асинхронный двигатель, обмотки которого соединены звездой и питаются от трёхфазного IGBT инверторного моста;
- трёхфазный асинхронный двигатель, обмотки которого образуют разомкнутый треугольник и питаются каждая от своего однофазного IGBT инверторного моста;
- двухфазный асинхронный двигатель, обмотки которого питаются каждая от своего однофазного IGBT инверторного моста;
- двухфазный асинхронный двигатель, обмотки которого питаются каждая от своего блока преобразователя, состоящего из IGBT ШИМ-формирователя синусоидальной огибающей импульсов напряжения и однофазного тиристорного моста – реверсора полярности напряжения.

Установлено, что при одинаковой мощности потери в двигателях при двухфазном и трёхфазном исполнении одинаковы.

Сравнение вариантов структур преобразователей проведено по пяти показателям:

- относительные потери мощности;
- относительный КПД;
- относительный объем;
- относительный показатель надежности;
- относительная стоимость комплектующих.

В итоге, двухфазный электропривод преобладает перед традиционным трёхфазным в следующем: уменьшение объема преобразователя на 35%, уменьшение потерь мощности в преобразователе на 52%, увеличение надежности преобразователя на 33%, уменьшение стоимости комплектующих преобразователя на 10%.

Исследования на компьютерных моделях двухфазного тягового асинхронного привода рудничного контактного электровоза с ШИМ напряжения

питания от контактной сети в пакетах Matlab-Simulink и PSIM позволили получить следующие результаты:

- проведенные компьютерные исследования электромагнитных процессов подтвердили ожидаемые результаты, полученные при аналитических исследованиях;

- законы управления ШИМ напряжения питания тяговых асинхронных двигателей влияют на гармонический состав первичных значений тока и напряжения. Наиболее оптимальным законом ШИМ следует считать трапецеидальный, поскольку его применение позволяет уменьшить содержание высших гармоник и повысить энергоэффективность.

Ключевые слова: тяговый асинхронный привод, двухфазный асинхронный двигатель, энергоэффективный тяговый электрический привод.

ANNOTATION

Omelchenko O.V. Functioning modes and energy efficient structures of traction electric drives in mining trolley locomotives. – On the right of manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.09.03 «Electrotechnical complexes and systems». State institution of higher education «National Mining University», Dnipropetrovsk, 2014.

The Dissertation is devoted to the development of the components of the theory of analysis and synthesis of structures traction electric drives of type «IGBT inverter – asynchronous engine», as multimodule systems, which allowed to improve the energy efficiency of electrified transport modes.

In accordance with developed criteria for assessing the effectiveness of traction electric drives optimum variant, - two-phase traction electric drive containing electric asynchronous engine with squirrel-cage rotor, each of the two windings of which are powered from a single-phase IGBT inverter bridge . In the course of research forms currents and voltage amplitude and PWM output voltage regulation were analyzed. It is recommended to implement trapezoidal phase voltage output that is organized through direct PWM voltage, which utilization coefficient of supply voltage is 10% higher than the sinusoidal curve.

As a result, two-phase asynchronous traction drive has advantages over the traditional three-phase one in the following: the volume of the converter is 35% less, power losses in the converter are 52% less, reliability is 33% higher, the cost of the converter's component is 10% less.

Keywords: traction asynchronous drive, two-phase asynchronous engine, energy-efficient traction electrical drive.

ОМЕЛЬЧЕНКО Олександр Володимирович

**РЕЖИМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І СТРУКТУРИ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТИПІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ
РУДНИКОВИХ КОНТАКТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ**

(Автореферат)

Підписано до друку 27.08.2014.
Формат 60x90/16. Папір офсетний.
Об'єм 0,9 ум. друк. арк., 0,94 обл.-вид. арк.
Тираж 120 прим. Замовлення № 27-08-14.

Видавець Видавничий центр ДВНЗ «КНУ»
50027, м. Кривий Ріг, вул. XXII Партз'їзду, 11.