

практика. "Харьков НТУ" XIII, 2003, №13. 2. M. Malinowski, M. Jasinski, M.P. Kazmierkowski: „Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space Vector Modulation”, *IEEE Trans. On Ind. Electronics.* – 2004. – Vol. 51, No. 2. – P. 447–454.

УДК 621.313

В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, В.І. Жук
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ЕМА

ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КОЛІС ТРОЛЕЙБУСА

О Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Жук В.І., 2014

Запропоновано вентильний реактивний двигун з ємнісними накопичувачами енергії для приводу коліс тролейбуса, який за механічною та регульовальними характеристиками може успішно конкурувати з тяговими колекторними двигунами за вищою надійності і меншого об'єму активної частини. В основу проектного розрахунку покладені рекомендації, які ґрунтуються на особливостях конструкції і на теорії електромагнітного перетворення енергії. Результати досліджень свідчать про можливість використання створеного двигуна в електроприводі коліс тролейбуса.

Ключові слова: вентильний двигун, ємнісні накопичувачі енергії, U-подібний статор.

The electric drive on basis of the Switched Reluctance Motor with the parallel accumulator of energy is offered for the wheels drive to the trolleybus. Main characteristic allow an engine successfully to complete with traction collector engines. They have higher reliability and less volume of active part. Recommendations are grounded in relation to designing taking into account the features of construction and on the basis of theory of electromagnetic transformation of energy. These recommendations are taken as a basis of project calculation. The results of the researches of the created SRM testify expedience of the use of the created engine is in the electromechanic of wheels of trolleybus.

Key words: Switched reluctance Motor, parallel accumulator of energy, U-similar stator.

Вступ

Сьогодні Україна посідає друге місце в світі за кількістю тролейбусних систем, яких станом на 2013 р. діяло понад сорок. Особливо важливою ланкою транспортної мережі став тролейбус у великих містах, хоча спочатку розглядався як приміський транспорт. Пізніше тролейбус замінив трамвай на ділянках, де складно прокласти рейки, зокрема, в ділянках міст із вузькими вулицями. Можливість зменшити завантаженість міського автомобільного транспорту та покращити екологічний стан шляхом розширення тролейбусних мереж сприяла відродженню інтересу до тролейбуса, як за кордоном, так і в Україні, де, на думку деяких фахівців, насамперед це було пов'язано з гострою нестачею автобусів, їхньою низькою потужністю і малою місткістю, а також відносною дешевизною електрики. Разом з тим є і низка винятково технічних причин.

Механічна частина тролейбуса простіша порівняно з автобусом, оскільки в ній не має паливної системи, системи охолодження, коробки передач, також вона не вимагає мастила під тиском. Внаслідок цього знижується трудомісткість регламентних робіт, відпадає необхідність в деяких технологічних

рідинах – моторне мастило, антифриз. Цікавими також є комбіновані тролейбуси, які є додатково оснащені системами автономного ходу на акумуляторах (контактні електробуси).

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Аналіз останніх літературних джерел та інтернет-ресурсів свідчить, що в електроприводах коліс сучасних зарубіжних тролейбусів перспективною вважають заміну тягових електродвигунів (ТЕД) постійного струму (ПС) частотно-керованими (ЧК) асинхронними двигунами (АД) [4, 6], а іноді, синхронними [7], які, в окремих випадках, дозволяють зекономити до 40% електроенергії.

Головними перевагами АД перед двигуном ПС є простота конструкції і малі габарити. Через відсутність щітково-колекторного вузла, асинхронний двигун вільний від таких недоліків двигунів ПС, як знос щіток і елементів колектора від взаємного тертя, іскріння і підгоряння у разі поганого контакту. Однак асинхронний ТЕД для своєї роботи вимагає змінного струму (трифазного), який отримується в електронному перетворювачі постійної напруги контактної мережі, вартість якого може перевершувати

ціну всіх інших механічних компонентів тролейбуса, а надійність, у деяких випадках, може виявитися недостатньою внаслідок проблем електромагнітної несумісності.

З іншого боку, на думку більшості фахівців, найперспективнішими серед багатьох типів двигунів у сучасних регульованих електроприводах середньої потужності є вентильні двигуни (ВД) (рис. 1, 2). ВД – це, фактично, електромехано-

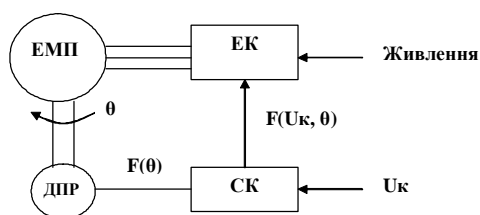


Рис. 1. Структурна схема ВРД

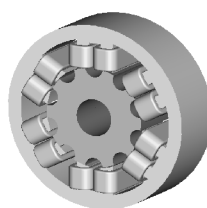


Рис. 2. ЕМП ВРД

тронна система, до складу якої входить електромеханічний перетворювач (ЕМП), який виконує функцію приведення в рух виконавчого механізму, давач положення ротора (ДПР) та електронний комутатор (ЕК). Здебільшого ЕК використовують і для регулювання швидкості обертання, що здійснюється за допомогою системи керування (СК), завдяки наявності повністю керованих силових елементів.

Загальновідомо, що, порівняно з ТЕД ПС, ВД мають низку конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг, найважливішими з яких потрібно вважати безконтактність та надійність. Швидкодія та енергетичні показники ВД незначно змінюються під час коливань напруги мережі та за зміни навантаження, на відміну від АД, а природна механічна характеристика вентильних реактивних двигунів (ВРД) практично така ж як і в тягових електродвигунах ПС, що уможливило застосування ВРД в електроприводах транспортних засобів, зокрема, в електроприводі коліс тролейбуса.

Однак, невисокі енергетичні показники вентильних реактивних двигунів донедавна слугували стримувальним фактором їхнього широкого застосування. Значення енергетичних показників ВРД обумовлюються необхідністю розсіювання запасеної в електромагнітному полі енергії під час комутації струму в секціях транзисторними ключами з метою їхнього захисту від перенапруг. У [1] запропоновано схемні вирішення транзисторних інверторів ВРД, які дозволяють повторно використовувати цю енергію для форсованого вмикання струму в секціях, захищаючи при цьому силові транзистори від перенапруг.

Мета роботи

Метою роботи є обґрунтування можливості застосування вентильних реактивних двигунів з ємнісними накопичувачами енергії для електроприводу коліс тролейбуса.

Матеріали і результати дослідження

Для покращення використання ВРД збільшують електромагнітні навантаження та активну зону сигнального сектора давача положення ротора (ДПР). При цьому в різні моменти часу до джерела живлення під'єднується різна кількість секцій, що зумовлює значні пульсації струму живлення вентильного двигуна, а це є небажаним в регульованих електроприводах.

Поліпшити енергетичні показники й зменшити пульсації струму джерела живлення вентиляного реактивного двигуна з пасивним ротором дозволяє однопівперіодний комутатор із паралельним під'єднанням нагромаджувального конденсатора [1]. На рис. 3 наведено принципову електричну схему ВРД з паралельним ємнісним накопичувачем (буфером) енергії (ЄНЕ). Аналогічно можна підвищити надійність і вентиляного реактивного двигуна з паралельним ЄНЕ, замінивши окремі транзисторні ключі і діоди підживлення секцій спільним ключем і діодом. Схема перетворюється до вигляду, який наведений на рис. 4. У цьому комутаторі керування підживлювальним транзисторним ключем VT4 здійснюється, як і в попередньому випадку, сигналом схеми виявлення збігу сигналів суміжних каналів давача положення ротора.

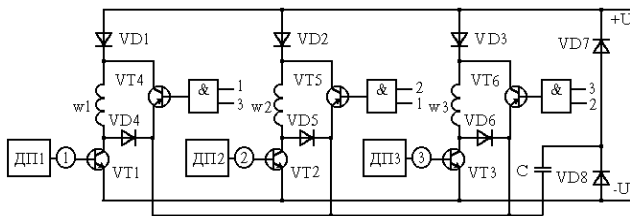


Рис. 3. Транзисторний комутатор з паралельним ЄНЕ

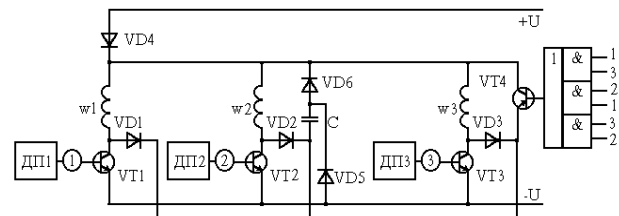


Рис. 4. ВРД з паралельним ЄНЕ й спільним колом форсування

Заряд конденсатора тут відбувається так, як і у ВД з послідовним ЄНЕ: через діоди VD1 – VD3 і діод VD4. Відбувається форсоване спадання струму в секції. Конденсатор заряджається до напруги, більшої від напруги джерела живлення (рис. 5).

У ВРД застосована псевдо-U-подібна конструкція статора (рис. 2) з майже відсутніми електромагнітними зв'язками між секціями, що підвищує стійкість роботи електронних компонентів та енергетичні показники завдяки меншій, порівняно з класичною конструкцією, довжині магнітних силових ліній, а отже, і втратам в сталі. Такі ВРД з ЄНЕ мають практично однакові енергетичні показники з ТЕД ПС.

Обґрунтуємо можливість застосування ВРД з ЄНЕ в електроприводі коліс троллейбуса.

У вираз для середнього значення електромагнітного моменту ВРД [1]

$$M_{CEP} = Z_r \frac{I_c^2}{4} \mu_0 \frac{D \cdot l}{\delta} \alpha_s \frac{K_L}{K_\mu} w_z (1 - \cos \gamma),$$

входять геометричні розміри $(D, l, \delta, \alpha_s, z_r)$, обмоткові дані (w_z) , та коефіцієнти (K_L, K_μ) , що

дає можливість аналізувати його значення за конструкційними параметрами, та порівняти ВРД з іншими видами електричних машин за створюваним на одиницю об'єму електромагнітним моментом. Таке порівняння [5] свідчить про те, що за однакових діаметрів та довжин якорів вентиляний двигун з пасивним ротором та ЄНЕ створює приблизно такий самий електромагнітний момент, як і ТЕД ПС, тобто в сенсі створення електромагнітного моменту може конкурувати з ним, а природні механічні характеристики обох двигунів практично однакові.

Важливою вимогою до електроприводу троллейбуса є, також, можливість електродинамічного гальмування. Серед різних способів гальмування електричних машин для ВРД найприйнят-

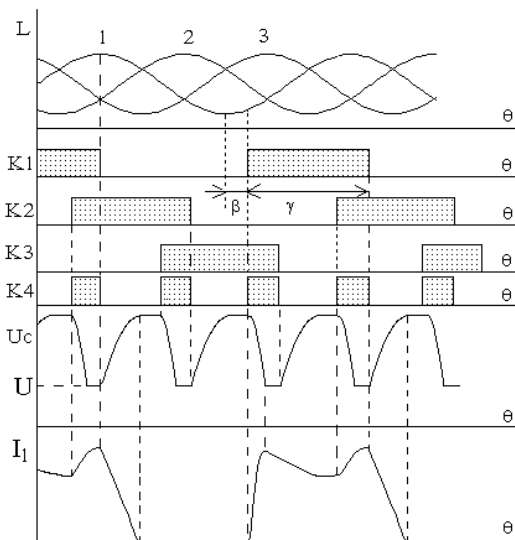


Рис. 5. Індуктивності секцій, діаграма роботи ключів, напруга на конденсаторі та струм секції ВРД з паралельним ЄНЕ

нішими є гальмування збудженням однієї або кількох секцій статорної обмотки і противмиканням (реверсуванням).

Тролейбуси, як відомо, виконуються з одним, двома, а в деяких випадках чотирма тяговими електродвигунами, що доцільно для троллейбусів з двома ведучими осями [4]. У такій схемі тягове зусилля від електродвигунів через карданні передачі і редуктори передаються кожному із ведучих коліс. До позитивних ознак цієї схеми належить відсутність механічного диференціального зв'язку між ведучими колесами, що дозволяє повніше застосування тягових зусиль двигунів та істотно знижує рівень підлоги в троллейбусі завдяки меншим габаритам двигунів і редукторів.

Зазвичай в технічних характеристиках троллейбусів вказується максимальна конструкційна швидкість 60–75 км/год [4]. У нових троллейбусах можна бачити встановлені в контролері обмеження, що не дозволяють рухатися з більшою швидкістю. Теоретично можливе створення троллейбусних ліній, що працюють на більшій усталеній швидкості, але основним обмеженням є контактна мережа і струмоприймачі. Проблема полягає в тому, що штанговий струмоприймач дуже чутливий до дефектів контактної мережі і дорожнього покриття, а на великих швидкостях на штанговий струмоприймач значну дію спричинює опір повітря. Також ймовірність сходження струмоприймача збільшується при відхиленні троллейбуса від контактної мережі, що істотно обмежує маневреність троллейбуса на великій швидкості. Для досягнення більшої швидкості потрібно застосовувати складнішу підвіску контактної мережі і збільшувати притиску силу струмоприймача (що призводить до прискореного зносу контактних вставок і контактної мережі). Тому троллейбуси доволі рідко використовуються на міжміських лініях – її застосовують переважно в містах, де дозволено рух з максимальною швидкістю 60 км/год, і де кориснішою є їхня властивість долати круті підйоми до 8–12 %. Тому, зазвичай встановлена потужність ТЕД троллейбуса є в межах 100 – 180 кВт.

Проектування ВРД для електроприводу коліс троллейбуса проведено за використання розробленої на кафедрі електричних машин та апаратів автоматизованої системи проектування (АСП) вентильних реактивних двигунів із накопичувачами енергії [2]. Система складається з головної програми, 16-ти підпрограм та файлів даних, має відкриту структуру та дає змогу здійснювати розширення та модернізацію під час розвитку завдань проектування та дослідження ВРД із ЄНЕ. Підсистема готує необхідні вхідні дані для проведення досліджень електроприводу на базі ВРД із ЄНЕ у підсистемі автоматизованого дослідження таких двигунів [3]. Для забезпечення можливості синтезу двигунів вищих потужностей та напруг в АСП заздалегідь було внесено відповідні зміни.

Типові методики проектування традиційних типів електричних машин ґрунтуються на виборі величин електромагнітних навантажень, досвід вибору яких для ВРД з ЄНЕ є обмежений. Вказані величини потребують відповідних уточнень. Тому в основу розрахунку двигуна для електроприводу коліс троллейбуса покладено теорію електромеханічного перетворення енергії у ВРД з ємнісними накопичувачами енергії, а також порівняльний аналіз моменту і електромагнітних навантажень ВРД з ЄНЕ з ТЕД ПС. В [1] наведено вирази для розрахунку геометричних розмірів магнітопроводу ВРД із ЄНЕ класичної та псевдо-U-подібної конструкції. Однак, внаслідок відсутності досвіду проектування ВРД з ЄНЕ, не можна також скористатись прийнятим у практиці проектування традиційних типів електричних машин методом, коли за даними спроектованих машин аналогічної або близької конструкції та потужності попередньо задаються рекомендованими значеннями незалежних змінних. Тому, вибір значень незалежних параметрів під час проектування двигунів такого типу здійснюється, опираючись на результати досліджень, проведених на кафедрі електричних машин та апаратів. Враховано, що для конструкції з псевдо-U-подібним статором,

$$Z_r = Z_s \cdot \frac{2 \cdot m \pm 1}{2 \cdot m}; \quad Z_s = m \cdot q; \quad q = 4, 6, 8, \dots,$$

де m – кількість секцій ВД.

Вираз для обчислення діаметра розточки псевдо-U – подібного статора

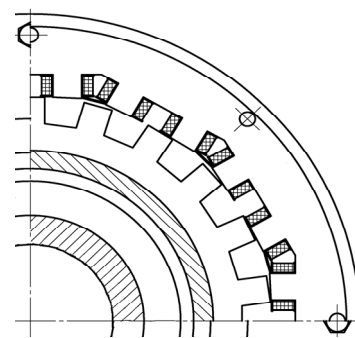


Рис. 6 Фрагмент перетину двигуна

$$D = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot M \cdot (\gamma^* + \theta_A^*)}{(2 \cdot m - 1) \cdot B_\delta \cdot A \cdot \pi \cdot \alpha_s \cdot K_L \cdot (1 - \cos \gamma) \cdot \lambda}}, \quad (2)$$

де $B_\delta = \frac{I_c \cdot w_z}{K_\mu \cdot \delta} \cdot \mu_0$ – магнітна індукція в повітряному проміжку для положення, коли зубці ротора і

статора збігаються; $A = \frac{2 \cdot I_c \cdot w_z \cdot q}{\pi \cdot D} \cdot (\gamma^* + \theta_A^*)$ – лінійне навантаження; $\lambda = l / D$ – відносна довжина

статора; $\gamma^* = \frac{\gamma \cdot m}{2 \cdot \pi}$; $\theta_A^* = t_o \cdot \frac{m \cdot z_r}{4 \cdot \pi} \cdot \omega$

Критерієм оптимальності вибраного варіанта слугувала механічна характеристика та максимальний момент, який зможе розвинути двигун. У результаті проектування отримано двигун, фрагмент поперечного перетину якого наведено на рис.6, з такими даними: номінальна напруга живлення 550 В; корисна потужність 36 кВт; частота обертання 1600 об/хв; ККД 76,1%.

Двигун досліджувався з використанням розробленої на кафедрі ЕМА Львівської політехніки автоматизованої підсистеми дослідження ВРД з ємнісними накопичувачами енергії [3], вхідними даними для якої є файл вихідних даних, розрахований за допомогою програми проектування. Було проведено кілька варіантів симуляції його роботи у пускових та квазіусталених режимах роботи за різних навантажень. На рис. 7 наведено механічну характеристику одного двигуна. В електроприводі тролейбуса передбачено 4 ВРД, сумарною потужністю 144 кВт, на заміну ТЕД ПС типу КР4389, потужністю 132 кВт, частотою обертання 1500 об/хв.

Результати розрахунків за відомими методиками, які використовують для отримання динамічних характеристик тролейбусів з ТЕД ПС і які ґрунтуються на заданій механічній характеристиці привідного двигуна, показують, що електропривод на базі спроектованого ВРД забезпечує на горизонтальній ділянці необхідну швидкість тролейбуса 90 км/год (85 км/год для тролейбуса з ТЕД ПС типу КР4389).

Потужність, яку розвивають ВРД на одиницю ваги (тонну), становить близько 7 кВт/т, а кут, під яким тролейбус зможе рухатись догори без прискорення з швидкістю 25 км/год, становить 11,2°, що приблизно відповідає сучасним зарубіжним та вітчизняним тролейбусам.

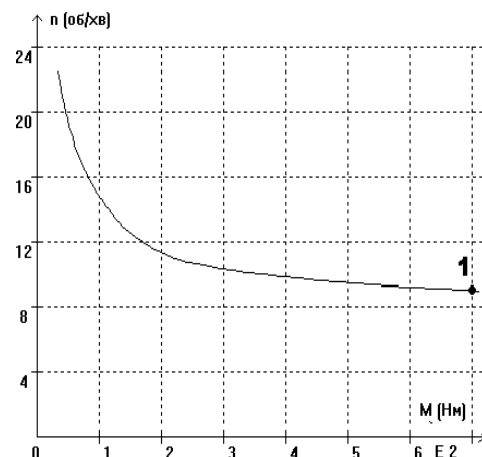


Рис. 7. Механічна характеристика двигуна

Висновки

Розроблено вентильний реактивний двигун з ємнісними накопичувачами енергії для приводу коліс тролейбуса, характеристики якого дозволяють йому успішно конкурувати з тяговими колекторними двигунами, за вищої надійності і меншого об'єму активної частини.

Електропривод на базі розробленого ВРД забезпечує вищі динамічні характеристики тролейбуса порівняно з електроприводом на базі ТЕД ПС.

Конструктивно вентильний реактивний двигун з ємнісними накопичувачами енергії є простіший і надійніший за ЧК АД, природна механічна характеристика ВРД з ЄНЕ не потребує додаткового формування, а електронні компоненти для обох електроприводів практично однакові, отже, ВРД з ЄНЕ можна рекомендувати до застосування в електроприводі коліс тролейбуса.

1. Ткачук В.І. Керований вентильний реактивний двигун з паралельним буфером енергії / В.І. Ткачук, Л.В. Кашиа, О.В. Грещук // *Технічна електродинаміка. Науковий журнал.* – 2004. – Ч.3. – С. 37–40.
2. Ткачук В.І. Підсистема комп'ютерного діалогового проектування вентильних реактивних двигунів / В.І. Ткачук // *Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка".* – 1997. № 340. – С. 112–120.
3. Ткачук В.І. Підсистема автоматизованого дослідження

вентильних реактивних двигунів / В.І. Ткачук // Технічна електродинаміка. Науковий журнал. – 1998. – С. 180 – 187. 4. Комплект тягового електропривода ПТ для електротранспорту [Електронний ресурс]: (совместное производство с ООО НПФ «АРС ТЕРМ»). – Режим доступа : www.npfarstern.ru. – Название с домашней страницы Интернета. 5. Ткачук В.І. Вентильний реактивний двигун з високою видатністю / В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, В.Г. Гайдук // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Зб. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту. – 2007. – С. 187–188. 6. http://www.privod-news.ru/june_03/26-1.htm. 7. <http://www.orionmotor.narod.ru/trans.htm>.

УДК 519.248

С.В. Щербовських

Національний університет “Львівська політехніка”,
Науково-дослідна група ДБ / ТРИКАФ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИЧИН НЕПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ СКЛАДНИМ ЗАГАЛЬНИМ ЗАМІЩУВАЛЬНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ

© Щербовських С.В., 2014

Запропоновано математичну модель надійності електротехнічної системи із складним загальним заміщувальним резервуванням. Така модель адекватно враховує вплив зміни навантаження на ймовірнісні показники мінімальної множини перетинів. Для моделювання застосовані динамічне дерево відмов та марковський аналіз.

Ключові слова: мінімальна множина перетинів, заміщувальне резервування, модель надійності, динамічне дерево відмов, марковська модель.

In the paper mathematical reliability model for electrical system with complex whole standby redundancy is proposed. Such model adequately takes into account load-sharing impact on minimal cut set probability indexes. For modeling dynamic fault tree and Markov analysis is used.

Key words: minimal cut set, standby redundancy, reliability model, dynamical fault tree, Markov model.

Постановка проблеми

Розробляють рекомендації щодо підвищення надійності електротехнічних систем на основі пошуку та аналізу причин їх непрацездатності. Кожній причині непрацездатності відповідає унікальний набір непрацездатних елементів, який називають перетином. Усій сукупності незалежних причин непрацездатності відповідає мінімальна множина перетинів. Мета аналізу надійності полягає у визначенні ймовірнісних характеристик усіх перетинів із мінімальної множини. Для системи із складним загальним заміщувальним резервуванням необхідно відобразити вплив непрацездатності окремих елементів та підсистем на навантаження решти працездатних елементів. У результаті такого впливу зазнають змін ймовірнісні показники перетинів, для визначення яких необхідно розробити адекватну математичну модель надійності. Ця проблема виникає під час забезпечення заданого рівня надійності електротехнічних та електроенергетичних систем, які застосовують в об'єктах підвищеної небезпеки.