

В.І. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф., Національний університет "Львівська політехніка", Львів

І.Є. БІЛЯКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., Національний університет "Львівська політехніка", Львів

ЕЛЕКТРОПРИВОД КОЛІС ВУЗЬКОКОЛІЙНОГО ТРАМВАЮ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

Запропоновано електропривод коліс трамвая з вузькою колією на базі вентильного реактивного двигуна з ємнісними накопичувачами енергії, який за енергетичними показниками не поступається тяговим колекторним двигунам, за вищої надійності і меншого об'єму активної частини

Предложен электропривод колес трамвая с узкой колеей на базе вентильного реактивного двигателя с емкостными накопителями энергии, который по энергетическим показателям не уступает тяговым коллекторным двигателям, при высшей надежности и меньшем объеме активной части

Вступ. Одним із проявів світової тенденції розвитку виробництва високотехнологічної електротехнічної продукції є певні успіхи в галузі створення нового покоління регульованих електроприводів із використанням вентильних електродвигунів (ВД). Такі електроприводи випускають нині практично усі провідні електротехнічні компанії. Пропозиція на ринку ВД характеризується широким діапазоном потужностей – від одиниць ват до сотень кіловат, для усіх галузей промисловості. При цьому фахівці вважають, що ВД нині є найбільш перспективними з посеред інших типів двигунів, які застосовуються у сучасних регульованих електроприводах малої й середньої потужності, що пояснюється низкою відомих конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг порівняно з існуючими типами електричних машин. Найістотніші з них – безконтактність і відсутність вузлів, які вимагають обслуговування, підвищені експлуатаційний ресурс і надійність ВД порівняно з двигунами постійного струму та асинхронними двигунами з фазним ротором. Високі швидкодія та енергетичні показники ВД незначно змінюються за зміни навантаження та під час коливань напруги мережі, у той час як в асинхронних двигунах коефіцієнт віддачі помітно залежить від зміни напруги і навантаження, що особливо приваблює розробників електроприводів широкого кола застосування, зокрема, для транспортних засобів [5].

Стан проблеми. При використанні постійних магнітів для збу-

дження ВД виникають певні проблеми: по-перше, відносно висока вартість якісних магнітів; по-друге, намагніченість обмежує значення максимальної густини магнітного потоку і тому дешевші феритові магніти через низьку намагніченість не дозволяють отримати великий момент; по-третє, з погляду застосування в електроприводі транспортних засобів істотне значення має вигляд механічної характеристики двигуна, яка в цьому випадку є надто "жорсткою".

В той же час електромеханічний перетворювач ВД може бути виконаним із пасивним вторинним елементом [1]. При цьому забезпечуються достатньо рівномірна частота обертання у режимі самокомутації, а механічна характеристика має вигляд "тягової", як в серієсних двигунів постійного струму.

З іншого боку, останнім часом у світі помітно відродження інтересу до трамваю, зумовлене можливістю за допомогою сучасних технічних рішень максимально збільшити пропускну здатність трамвайних маршрутів. Однак, в окремих містах України, в тому числі й у Львові, ширина трамвайної колії – 1000 мм, і проходить вона вузькими вулицями з поворотами малого радіусу та підйомами і спусками. Згадані обставини, поряд із сучасними тенденціями розвитку техніки, сприяли появі проекту трамваю, який окрім вузької колісної бази мав би й низьку посадку. Серед ряду переваг – низький рівень підлоги, який дозволяє з мінімальним часом здійснювати посадку–висадку безпосередньо з тротуару та забезпечує реальну можливість повноцінного користування для інвалідів у візках. Очевидно, постає актуальна задача розроблення відповідного електроприводу для такого трамваю.

Задачі досліджень. Проект трамваю передбачає зовнішнє розташування чотирьох двигунів для приводу коліс у блоці з редуктором і гальмівним механізмом, що можливо завдяки вузькій колії. Запропоновані варіанти розташування двигунів наведено на рис.1.

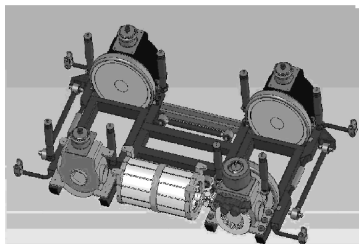


Рис. 1.

Для приводу коліс трамваю запропоновано вентильний реактивний двигун (ВРД) з емнісними накопичувачами енергії (ЄНЕ), що, як відомо [1], складається з електромеханічного перетворювача (ЕМП), давача положення ротора (ДПР) та електронного комутатора (ЕК). ЕК можуть бути використані для регулювання частоти обертання, моменту тощо, тому до базової структури доцільно ще застосувати систему керування (СК). Електромеханічний перетворювач та давач положення ротора зазвичай об'єднують в один

конструктивний вузол, а комутатор і систему керування в інший.

Схема електронного комутатора. На відміну від ВРД із відомими електронними перетворювачами, які мають невисокі енергетичні показники та, відповідно, обмежене застосування, для ВРД із СНЕ кафедрою електричних машин та апаратів Львівської політехніки запропоновано схеми ЕК, (наприклад, рис. 2), застосування яких дозволяє

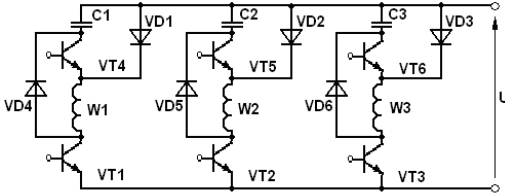


Рис. 2.

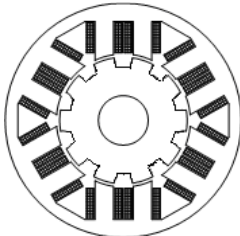


Рис. 3.

одночасно використати енергію, запасену в електромагнітному полі якоря ЕМП, обмежити наростання зворотної напруги транзисторного ключа комутатора до допустимого рівня та значно зменшити динамічні втрати на перемикання транзистора перетворювача внаслідок перехоплення струму вимикання транзистора колом заряду конденсатора [1].

У ВРД застосована псевдо U -подібна конструкція статора (рис. 3) з практично відсутніми електромагнітними зв'язками між секціями, що підвищує стійкість роботи електронних компонентів та енергетичні показники завдяки меншій, порівняно з класичною констру-

кцією, довжині магнітних силових ліній, а отже, і втратам в сталі.

В індукторних машинах електромеханічне перетворення енергії здійснюється за рахунок модуляції параметрів машини. У машинах із ненасиченим магнітним колом енергія, яка запасастється у магнітному полі дорівнює енергії, яка перетворюється у механічну, а тому й коефіцієнт віддачі ВД із ЕМП індукторного типу та однопівперіодним комутатором традиційного виконання навіть нехтуючи тепловими втратами у машині не може перевищувати 50%.

Тому для покращення енергетичних показників ВД з пасивним ротором необхідно використовувати енергію, яка запасена у магнітному полі обмотки якоря, для форсування струму секції. Задача створення ВД на базі простої, технологічної індукторної машини зводиться до створення таких схемних рішень, які б дозволили використовувати накопичену у магнітному полі секції якорної обмотки енергію для виконання корисної роботи. На рис.2. показано одну зі схем транзисторних комутаторів із послідовними ємнісними накопичувачами, а принцип роботи даної схеми наведений в [1].

Розрахунки та експериментальні дослідження показують, що застосування схем з ємнісними накопичувачами енергії у ВД з пасивним ротором покращують його коефіцієнт віддачі у 1.7-1.8 рази порівняно з схемою зі стабілітронним захистом від перенапруг на силових ключах комутатора.

Згідно з проектом, електропривод повинен забезпечити наступні технічні параметри трамваю: прискорення та максимальна швидкість руху на горизонтальній дільниці – $1,4 \text{ м/с}^2$ та 70 км/год відповідно; максимальний кут підйому – 8° [4]. Розміри двигуна не повинні виходити за межі 500 мм за довжиною та 600 мм – за шириною.

Проектування двигуна 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 з СНЕ. Підсистема готує необхідні вхідні дані для проведення досліджень електроприводу на базі ВД із СНЕ в підсистемі автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів [3]. Для забезпечення можливості синтезу двигунів вищих потужностей та напруг в АСП заздалегідь було внесено відповідні зміни.

Оскільки методики проектування традиційних типів електричних машин (асинхронних, синхронних, постійного струму) базуються на виборі величин електромагнітних навантажень (індукції у повітряному проміжку і окремих частинах магнітопроводу, лінійного навантаження, густини струму тощо), досвід вибору яких обмежений, вказані величини потребують відповідних уточнень. Тому, використовуючи теорію електромеханічного перетворення енергії у ВРД з ємнісними накопичувачами енергії, а також порівняльний аналіз моменту і електромагнітних навантажень ВРД з буферами енергії з колекторними двигунами постійного струму, в [1] наведено вирази для розрахунку геометричних розмірів магнітопроводу ВРД з пасивним ротором класичної та псевдо- U -подібної конструкції. Однак, внаслідок відсутності досвіду проектування вентильних двигунів з пасивним ротором, не можна також скористатись прийнятим в практиці проектування традиційних типів електричних машин методом, коли за даними спроектованих машин аналогічної або близької конструкції та потужності попередньо задаються рекомендованими значеннями електромагнітних навантажень та інших незалежних змінних. Тому, вибір значень незалежних параметрів під час проектування двигунів такого типу здійснюється, опираючись на результати досліджень, проведених на кафедрі "Електричні машини та апарати".

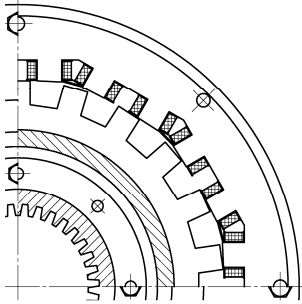


Рис. 4.

За критерій оптимальності вибрано-го варіанту двигуна слугувала механічна характеристика та максимальний момент, який зможе розвинути двигун. В результаті проектування отримано двигун, фрагмент поперечної перетину якого наведено на рис. 4, з наступними даними:

Мінімальна напруга живлення – 550 В; корисна потужність – 34 кВт; частота обертання, 1500 об/хв; коефіцієнт віддачі – 75,4%; момент навантаження – 250 Нм; ємність конденсатора – 2,5 мкФ.

Двигун досліджено з використанням розробленої на кафедрі автоматизованої підсистеми дослідження ВРД з ємнісними буферами енергії [4], вхідними даними для якої є розрахований за допомогою програми проектування файл вихідних даних.

Було проведено кілька варіантів симуляції роботи ВРД у пускових та квазіусталених режимах роботи, при навантажувальних моментах – максимальному 250 Нм (рух трамваю з максимальним прискоренням), та 20 Нм (рух з максимальною швидкістю на горизонтальній дільниці).

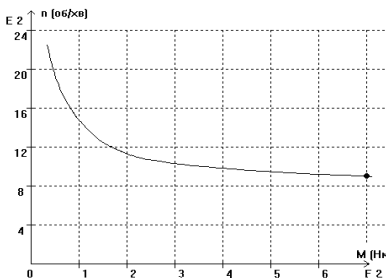


Рис.5.

Отримана механічна характеристика спроектованого двигуна показана на рис.5. За результатами дослідження двигуна уточнено динамічні показники трамваю.

Висновки. Розроблений ВРД з ЄНЕ для приводу коліс вузькоколіїного трамваю, який за найважливішими показниками не поступається тяговим колекторним двигунам. Для проектування двигуна використано модернізовану для таких задач та протестовану систему проектування, яка складається з комплексу програмних модулів, кожний з яких виконує певний етап розрахунку: розрахунок геометрії машини, розрахунок обмоткових даних, розрахунок магнітного кола тощо. Інформаційне забезпечення підсистеми складається з бази даних, у яку входять характеристики намагнічення електротехнічних сталей різних марок, а також довідникова інформація, яку підсистема надає користувачу в інтерактивному діалоговому режимі роботи. Двигун має геометричні розміри, які дозволяють монтувати його зовні колісного

візка разом з редуктором і гальмом та забезпечує необхідні динамічні характеристики під час рушання, розгону та руху трамваю при підйомі на заданий кут.

Результати дослідження з використанням відповідної автоматизованої системи показують, що електропривод на базі спроектованого двигуна забезпечує на горизонтальній ділянці необхідну швидкість трамваю 75 км/год. Потужність, яку розвиває двигун на одиницю ваги трамваю (тону), становить близько 7 кВт/т, що приблизно відповідає сучасним трамваєм, які випускаються зарубіжними та вітчизняними виробниками. Розраховане прискорення при русі трамваю по рівній ділянці та повному завантаженні пасажирями становить: $a=1,7 \text{ м/с}^2$, тоді, як у аналогічних трамваїв прискорення знаходиться у межах 1,1-1,5. Максимальний кут нахилу, під яким трамвай зможе рухатись вгору без прискорення з швидкістю 30 км/год, становить $10,4^\circ$, проти 8° , як вказано у більшості технічних вимог до трамваїв.

Список літератури: 1. *Ткачук В.* Електромеханотроніка: – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 440 с. 2. *Ткачук В.І., Гайдук В.Г., Каша Л.В.* Автоматизована система проектування вентильних реактивних двигунів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Тем. вип. "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика". – 2003. – №471. – С. 50-64. 3. *Ткачук В.І.* Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка. 1998. – С. 180 - 187. 4. *Бондаревский Д.И., Черток М. С., Пономарев А. А.* Трамвайные вагоны РВЗ-6М2 и КТМ-5М3. М.: Изд-во "Транспорт", 1975 – 315 с. 5. <http://www.electroprivod.org.ua/author.html>.



Ткачук Василь Іванович, професор, доктор технічних наук. В 1972 р. закінчив Львівський політехнічний інститут за спеціальністю електропривод і автоматизація промислових установок. В 1987 р. захистив кандидатську дисертацію в Уральському політехнічному інституті за спеціальністю електричні машини. Вчене звання доцента присуджено в 1990 р. В 1999 р. в Державному університеті "Львівська політехніка" захистив докторську дисертацію за спеціальністю електричні машини і апарати. В 2001 р. присвоєно вчене звання професора кафедри електричних машин. Завідувач кафедри "Електричні машини та апарати", віце-директор Інституту енергетики і систем керування Національного університету "Львівська політехніка". Наукові інтереси пов'язані з проблемами створення сучасних високо-ефективних електроприводів на базі вентильних двигунів, систем автоматизованого їх проектування та дослідження.



Біляковський Ігор Євгенович, доцент, кандидат технічних наук. В 1980 р. закінчив Львівський політехнічний інститут за спеціальністю електричні машини. В 1996 р. захистив кандидатську дисертацію в Львівському політехнічному інституті за спеціальністю електричні машини. Вчене звання доцента присуджено в 1999 р. З 1997 р. доцент кафедри електричних машин та апаратів Національного університету "Львівська політехніка".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами дослідження та проектування спеціальних електричних машин та систем керування спеціальними електричними машинами.

Надійшла до редколегії 12.10.2010