

и углов управления отдельных приводов, требует более сложных алгоритмов управления фильтрами [8] сети в целом с нечеткой [9] логикой.

### Список литературы

1. IEEE Standard 519-1992 Application in Industrial Power Distribution Networks with a New Monitoring Approach **João Pedro Trovão, Paulo Pereirinha, Humberto Jorge**, Proceeding of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, September 22-24, 2006 244-249 pp.
2. **W. Mack Grady**, The University of Texas at Austin Robert J. Gilleskie, San Diego Gas & Electric Harmonics and how they relate to power factor. Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93), San Diego, CA, November 1993.
3. **Dugan R., Mcgranaghan M., Wayne H.**, 1999, Electrical Power Systems Quality, 265 pp., McGraw-Hill, NewYork, USA.
4. **Trovão J.P.**, Harmonic Distortion Monitoring and Analysis Integrated System a Systematic Approach for the Industrial Sector M.Sc Thesis, Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra, Portugal, 2004.
5. Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств. **Под ред. З.М.Бененсона**. – М. Радио и связь, 1981, 272с.
6. **Ягуп В.Г.** Построение и использование макромоделей автономных тиристорных преобразователей. – Изв. АНСССР. Энергетика и транспорт 1983, №4, с.78-83.
7. **Сокол Е.И., Бутова О.А., Шишкин М.А.**, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, Matlab-модель 12-ти пульсного параллельного КУВ с разделенным управлением. Системы управления и контроля преобразователями электроэнергии № 9 (128) сентябрь 2014, спец. выпуск, Том 2, Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит.
8. Расчет параметров универсального фильтра высших гармоник для систем с многупульсными выпрямителями. **И.В.Волков, Д.П.Каршенов, С.В.Подольный**, Техн. электродинамика. 2014. № 2, С.17-21
9. **Усков А.А.** Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2004. № 6. С. 7-13.

Рукопись поступила в редакцию 17.04.16

УДК 681.3

Ю.Г. ОСАДЧУК, канд. техн. наук, доц., І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач,  
Р.А. ІЛЬЧЕНКО, студент, Криворізький національний університет

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АСИНХРОННИХ, СИНХРОННИХ МАШИН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Внаслідок підвищеної енергетичної ефективності та низького значення показника вартість/шлях, електричні та гібридні транспортні засоби привертають до себе все більшу увагу. Для задоволення вимог щодо електроприводу двигуни цих механізмів повинні задовольняти специфічні вимоги щодо продуктивності та ефективності. Це призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. У роботі виконано розробку критеріїв порівняння, що можуть бути використані при аналізі синхронних двигунів з постійними магнітами з розподіленими обмотками та зосередженими обмотками, асинхронних двигунів та вентильних реактивних двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів. Для проектування конструкції асинхронного двигуна використовувався метод кінцевих елементів. Для урахування нелінійних параметрів машини та досягнення високого рівня ефективності двигунів, оптимальні траєкторії струму отримані для розширеної моделі синхронних двигунів з постійними магнітами та асинхронних. Додаткові критерії порівняння з урахуванням показників шуму та вібрацій також враховано при узагальненому аналізі.

**Ключові слова:** гібридні транспортні засоби, електромеханічна система, вентильний реактивний двигун, асинхронний двигун, синхронний двигун з постійними магнітами, коефіцієнт корисної дії, струм статора

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Інтенсивне впровадження електромеханічних тягових систем призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. В даний час, окрім широко використовуваних у гібридних транспортних засобах синхронних двигунів з постійними магнітами, все більше поширення отримують нові типи електричних машин, серед яких найбільш популярними є вентильні реактивні двигуни. Тому розробка та дослідження нових електромеханічних систем з асинхронними, синхронними та вентильними двигунами є актуальною й важливою науково-технічною задачею.

**Аналіз досліджень та публікацій.** У [1], [2] представлено карти ефективності асинхронного двигуна, вентильного реактивного двигуна та синхронного двигуна з постійними магнітами для електроприводів загальнопромислового призначення. У [3] автори проаналізували синхронний двигун з постійними магнітами другого покоління Prius-IPMSM у порівнянні з альтернативними типами асинхронних та синхронних машин з постійними магнітами. Проте, аналіз проводився за умови фіксованого кута фазного керування на усьому діапазоні зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту, що може призводити до неоптимального оперативного керування. У [4] представлено порівняння синхронних двигунів з постійними магнітами та асинхронних двигунів з позиції вихідної потужності та ефективності в розрізі нового європейського приводного циклу (NEDC). Подібна робота пророблена авторами у [5]. У [6] автори після порівняння синхронних двигунів з постійними магнітами, асинхронних двигунів та вентильних реактивних двигунів стверджують, що вплив розподілу ефективності на енергоефективність системи є малим. Тим не менш в літературі дуже мало уваги приділяється поетапному всебічному порівнянню різних типів електродвигунів для електричних та гібридних транспортних засобів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка критеріїв порівняння електричних машин, що використовуються у гібридних транспортних засобах, та проведення відповідного аналізу по відношенню до синхронних двигунів з постійними магнітами, асинхронних двигунів та вентильних реактивних.

**Викладення матеріалу та результати.** До недавнього часу синхронні двигуни з постійними магнітами домінували в якості тягових двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів завдяки здатності працювати у широкому діапазоні зміни кутової швидкості та моменту з надзвичайно високою щільністю крутного моменту та потужності. Обмеженнями даного типу двигунів є вартість та доступність рідкоземельних матеріалів, що використовуються для виготовлення постійних магнітів. До інших типів часто використовуваних електричних двигунів відносяться асинхронні та вентильні реактивні двигуни. Асинхронні двигуни не містять постійних магнітів і характеризуються як надійні. Обмеженнями для даного типу двигунів може бути розробка системи охолодження, оскільки тепло виділяється як у статорі, так і у роторі. Вентильні реактивні двигуни не містять постійних магнітів і є надзвичайно надійними, що створює можливості для його використання в сурових умовах транспортних засобів. Тим не менш, високі акустичні шуми і низький коефіцієнт потужності відносять до основних проблем при його використанні. Крім того, приводи з вентильними реактивними двигунами вимагають наявності специфічного інвертора та підвищеної кількості силових кабелів для підключення кожної незалежної обмотки на статорі.

Для вирішення зазначених проблем є необхідною розробка та детальне порівняння різних типів двигунів. Тим не менш, є недоцільним побудова прототипів усіх типів машин та виконання порівняння експериментальним шляхом, тому для проведення аналізу використано пакет програм ANSYS для моделювання методом кінцевих елементів. Проектування тягових двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів виконується виходячи з таких критеріїв, як профіль зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту, вимог щодо пульсацій електромагнітного моменту, вихідної потужності інвертора, змін напруги ланки постійного струму, загальної ваги та вартості. Необхідні пікові та довготривалі показники електромагнітного моменту та кутової швидкості повинні бути визначені у відповідності до різних циклів керування транспортним засобом, таких як UDDS, US06 і т.д., механічних обмежень транспортного засобу, включаючи масу, момент інерції коліс, передаточний коефіцієнт та ККД. Для порівняння обрано чотири типові топології тягових двигунів, включаючи 8-полюсний 48-пазний синхронний двигун з інкорпорованими постійними магнітами, синхронний двигун з 8 полюсами та 12 пазами, асинхронний двигун з 48 пазами та 36 стержнями ротора та 12/8 вентильний реактивний двигун. У даній роботі 48/8 синхронний двигун з інкорпорованими постійними магнітами, що використовується у другому поколінні Toyota Prius обрано в якості базового двигуна де механічна тягова характеристика представлена на рис.1.

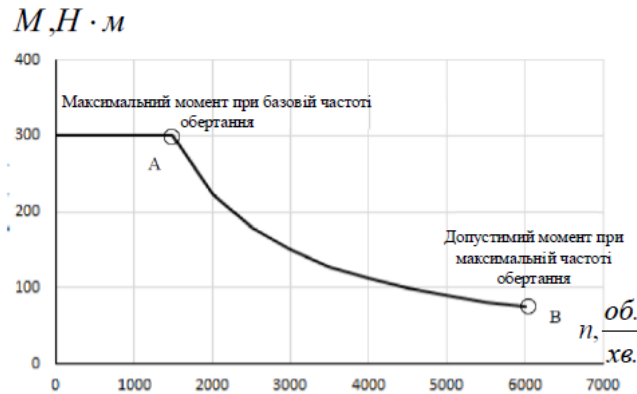


Рис.1. Цільова тягова механічна характеристика для порівняльного аналізу

Максимальний електромагнітний момент 300 Н·м на базовій швидкості 1500 об./хв. (точка А) визначає продуктивність транспортного засобу при запуску або при русі на пагорб, а допустимий електромагнітний момент, який складає 60 Н·м, на максимальній швидкості 6000 об./хв. (точка В) обмежує швидкість транспортного засобу на шосе. Інші три двигуна, що приймають участь у порівнянні, розраховані виходячи з вимог, що створюють розумні та справедливі умови щодо порівняння цих типів двигунів.

Для досягнення високої енергоефективності, використовуємо векторне керування для різних типів двигунів. Оскільки тягові двигуни для електричних транспортних засобів працюють в дуже нелінійних умовах, таких як насичення, наявність перехресних зв'язків, використання пошукових таблиць може бути оптимальним рішенням. Побудова пошукової таблиці для знаходження оптимальної траєкторії струму включає в себе декілька кроків: Подача струму в обмотки з метою визначення параметрів двигуна, особливо потокозчеплення. Базуючись на інформації щодо потокозчеплення, складається оптимальна робоча площина, як показано на рис. 2а. Ця площина обмежена колом, що відображає обмеження струму, кривою максимального співвідношення момент - струм та кривою максимального співвідношення момент - напруга. На графіку також показані ізокриви за моментом (чорні лінії) та напругою (сині криві). 3) Для кожної точки момент-кутова швидкість, оптимальні значення струмів  $i_d$  та  $i_q$  можуть бути визначені за допомогою методів екстраполяції та інтерполяції.

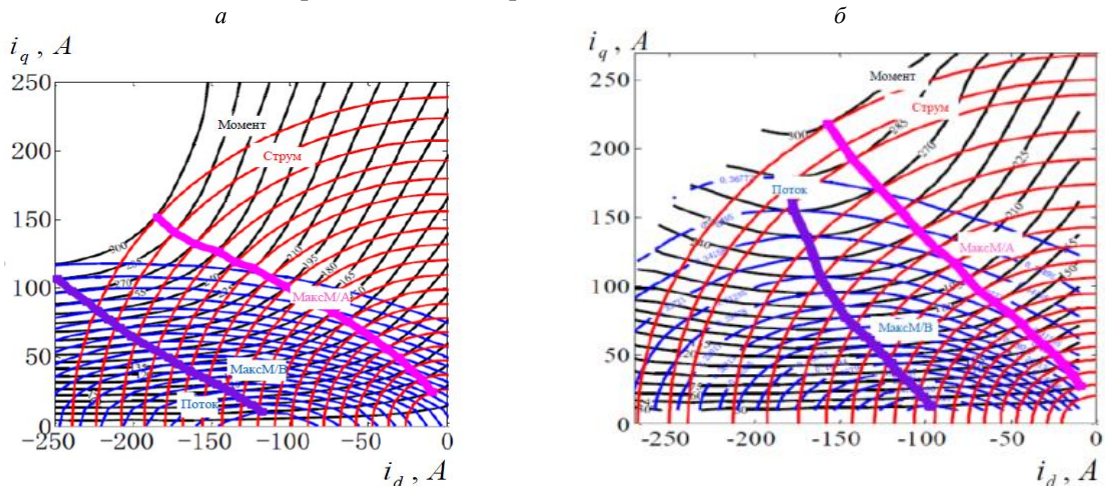


Рис.2. Криві вибору оптимального значення струму для синхронного двигуна 48/8 та 12/8

48/8 Prius синхронний двигун з постійними магнітами має декілька унікальних конструктивних особливостей: Статорні зубці є глибокими та широкими для усунення насичення та підвищення анізотропності. Постійні магніти розташовані в V-подібній формі для отримання максимального використання електромагнітного моменту та зменшення втрат холостого ходу. Двигун Prius має домінуючий порядок гармоніки вібрацій (яка є найбільшим спільним дільником між числом пазів та числом полюсів), що є досить високим, тому резонанс із низькочастотними статорними коливанням є усуненим.

Синхронний двигун 12/8 з постійними магнітами, що розглядається, має такий же зовнішній діаметр статора, як і двигун приводу Prius. Він має наступні особливості, що враховувалися при його виборі: Номінальною робочою точкою обрана (120 Н·м; 2500 об./хв.). Щільність потоку у зубцях статора та його ярмі розраховані так, щоб знаходитися нижче коліна кривої намагнічення В-Н. Це дозволяє уникнути насичення при роботі зі значними навантаженнями за моментом. Щільність струму зберігається на рівні 6 А/мм<sup>2</sup> для номінальної робочої точки. Додаткові постійні магніти використовуються для підвищення електромагнітного моменту, при цьому постійні магніти ограничені у V-подібні форми для оптимальної мінімізації пульсацій електромагнітного моменту. Геометрія пазів статора оптимізована для зниження сумарних втрат шляхом балансування втрат у міді та сталі. Число витків котушки оптимізоване для забезпечення пікових значень електромагнітного моменту та кутової швидкості.

На рис. 2б представлено оптимальну робочу площину для синхронного двигуна 12/8 з постійними магнітами. Його характеристичний струм є вищим за 100 А та близьким до показника двигуна Prius, що складає 105 А. Для синхронного двигуна 12/8 лінія максимального співвідношення момент–струм зсувається в область  $i_q > i_d$ , як показано на рис. 2б, що означає домінування електромагнітного моменту. Рівняння електромагнітного моменту для синхронного двигуна з постійними магнітами може бути записано так

$$M = \frac{m}{2} p (\psi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \quad (1)$$

де  $m$  - число фаз двигуна;  $p$  - число пар полюсів;  $\psi_d$  - потокозчеплення по вісі  $d$ , створюване постійними магнітами.

Перша частина даного рівняння представляє собою електромагнітний момент, а друга - реактивний момент або момент явнополюсності. У випадку синхронних двигунів з дробною зосередженою обмоткою, як у випадку синхронного двигуна 12/8 з постійними магнітами, що має низьку явнополюсність, це означає низьке значення співвідношення  $L_d/L_q$ , що означає можливість швидкого насичення при роботі з високими струмами. Отже, реактивний момент є досить низьким, а домінуючою складовою є електромагнітний момент.

Для асинхронного двигуна аналіз виконувався з використанням методу кінцевих елементів Проте, розрахунок процесів у двигуні з використанням даного методу є досить тривалим. Тому у роботі використано введення замість напруги до статорних обмоток величин статорних та роторних струмів до обмоток статора та мідних стержнів ротора окремо. У системі відліку, що пов'язана з роторним потокозчепленням, при використанні векторного керування існує тільки складова потокозчеплення по вісі  $d$ , в той час як складова по вісі  $q$  дорівнює нулю.

Швидке моделювання з використанням методу кінцевих елементів при введенні струмів складається з двох частин: 1) Вирішення магнітостатичної задачі з використанням методу кінцевих елементів. Струм до статорних обмоток та мідних роторних стержнів вводиться окремо. Струм по вісі  $q$  ітеративно коригується до тих пір, поки не буде задовольнятися умова векторного керування. Параметри машини, включаючи індуктивність статора  $L_s$ , індуктивність ротора  $L_r$ , взаємну індуктивність  $L_m$  можуть бути знайдені з використанням величин струму та потокозчеплення. Частота ковзання з урахуванням співвідношення складових статорних струмів ( $i_{sq}/i_{sd}$ ) та постійної часу ротора ( $L_r/R_r$ ) також може бути розрахована. Очевидно, що цінністю такого моделювання є урахування властивості насичення. 2) Моделювання перехідного процесу. Статор та ротор залишаються нерухомими. До статорних обмоток вводиться статорний струм з частотою  $f_e$ , а роторні струми з частотою  $f_e$  вводяться до мідних роторних стержнів. Зміна статорних, роторних та взаємних індуктивностей зі струмом може бути розрахована при вирішенні магнітостатичної задачі методом кінцевих елементів. Вимагається обчислення декількох ітерацій для вилучення параметрів асинхронного двигуна з використанням задачі магнітостатики. Тим не менш, цей метод швидкого моделювання з використанням методу кінцевих елементів дозволяє істотно заощадити час обчислень при знаходженні ККД асинхронного двигуна у всьому діапазоні зміни кутової швидкості та потокозчеплення. При максимальній кутовій частоті, що складає 6000 об./хв., індуктивний опір намагнічення  $X_m \gg R_s$ , а індуктивний опір статорної обмотки  $X_\infty \gg R_s$ , отже величиною статорного опору  $R_s$  можна знехтувати, тоді критичний момент асинхронного двигуна може бути визначено так

$$M_{кр} = \frac{3}{2} p \frac{U^2}{\omega(R + \sqrt{R^2 + (X + X_{\sigma r})^2})} \approx \frac{3}{2} p \frac{U^2}{\omega^2(L_{\sigma s} + L_{\sigma r})}, \quad (2)$$

де  $U$  - напруга живлення,  $L_{\sigma s}$  - індуктивність розсіяння статора,  $L_{\sigma r}$  - індуктивність розсіяння ротора,  $p$  - число пар полюсів.

У відповідності з (2) при наближенні значення кутової швидкості до максимального, критичний момент буде обернено пропорційним до квадрату швидкості. Таким чином, для підвищення ефективності використання машини за електромагнітним моментом необхідно робити пази ротора більш широкими, але більшої кількості, що призводить до зменшення числа витків обмотки відповідно. Це призводить до зниження індуктивності розсіяння ротора та підвищення величини критичного моменту.

На рис. 3 представлено, криві оптимальних струмових траєкторій, що отримані за тією ж процедурою, що і для синхронного двигуна з постійними магнітами.

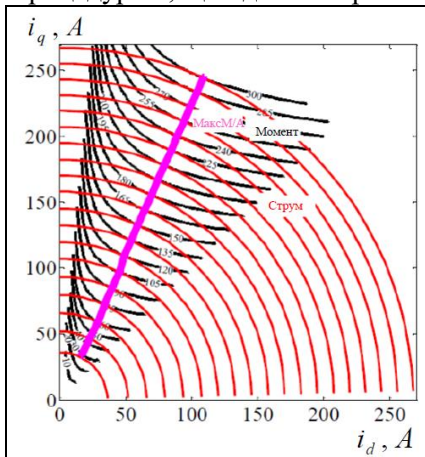


Рис. 3. Оптимальні режими роботи асинхронного двигуна

При розрахунках оптимальної конструкції вентиляного реактивного двигуна необхідно враховувати наступні критерії: Номінальна робоча точка обрана на рівні 100 Н·м; 3000 об./хв.

Величина магнітного потоку статорних зубців та ярма обрана нижче точки згину кривої намагнічення В-Н.

Число витків котушки оптимізоване для задовільнення вимог щодо формування необхідної механічної характеристики, що повинна мати певний максимальний момент на основній швидкості (1500 об./хв.) та високий момент на максимальній швидкості (6000 об./хв.).

Кути відкриття та закриття ключів, а також амплітуда імпульсів струму, що живить двигун, можуть змінюватися для оптимізації енергоефективності двигуна у широкому діапазоні зміни кутової швидкості та електромагнітного моменту.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У роботі виконано поетапне порівняння та оцінку чотирьох популярних типів електроприводів для застосування у тягових електромеханічних системах та гібридних транспортних засобах. Розглянуто топології на базі синхронного двигуна з постійними магнітами, асинхронними двигунами та вентиляними реактивними.

В результаті проведеного дослідження були встановлені наступні суттєві висновки:

Синхронні двигуни з постійними магнітами мають ККД вище за 97%.

Синхронний двигун з 12 пазами та 8 полюсами має трохи більш високий ККД при низькій кутовій швидкості, але на швидкості вищій за 5000 об./хв. ця перевага втрачається, оскільки вихрові струми зростають у 50 разів, а втрати, що провокуються ними перевищують 1000 Вт.

Асинхронний двигун має найвищий ККД (близько 96%) на високій кутовій швидкості, проте він має найширший діапазон низької ефективності на низькій кутовій швидкості через втрати в міді.

Вентильний реактивний двигун має зосереджені обмотки з низьким опором, проте, як правило, необхідно створити більш високе значення струму для створення того ж моменту.

Синхронний двигун з постійними магнітами, що має зосереджену обмотку з низьким опором, проте вимагає більшої кількості матеріалу постійних магнітів для задоволення вимог відносно моменту.

Асинхронний двигун та вентильний реактивний двигун мають найнижчу щільність потужності, тобто 55 кВт/52 кг та 55 кВт/45 кг відповідно у порівнянні з показниками 55 кВт/32 кг для синхронного двигуна з постійними магнітами.

Геометрія статора, комбінація пазів та полюсів, а також спосіб керування впливають на показники вібрації та шуму. Вібрація є тим нижчою, чим більшим є час дискретності вхідних впливів.

Наприклад, за однієї й тієї ж топології вентиляний реактивний двигун має набагато сильнішу вібрацію, ніж синхронний двигун з постійними магнітами, що працює в режимі переривчастого струму.

## Список літератури

1. **Зинченко Е.Е.** Сравнение характеристик вентильного реактивного двигателя при его питании от коммутатора по схемам Миллера и асимметричного моста / **Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн** // *Електротехніка і електро-механіка*. – 2012. – № 1. – С. 33-35.
2. **Нестеренко В.И.** Экспериментальное определение динамических параметров тягового привода транспортного средства // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – 2005. – Вип. 8. – С. 86-87.
3. **Дембіцький В.М.** Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / **В.М. Дембіцький** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 29. – С. 28-33.
4. **Сітовський О.П.** Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на зтяжних спусках / **О.П. Сітовський, В.М. Дембіцький** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 30. – С. 10-15.
5. **Тімков О.М.** Поява гібридних силових установок на транспортних засобах / **О.М. Тімков, О.В. Григорашенко** // *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. – 2014. – № 1. – С. 42-47.
6. **Сітовський О.П.** Електродинамічне гальмування гібридного транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення / **О.П. Сітовський, В. М. Дембіцький** // *Автомобільний транспорт*. – 2013. – Вип. 33. – С. 13-18.
7. **Zeraouia M., Benbouzid M., Diallo D.** Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study // *IEEE Transaction on ve-hicle technologies*. – Vol. 55, no. 6. – pp. 1756-1764.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 681.3

І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач, Криворізький національний університет

## СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Вдосконалення електромеханічних систем транспортних засобів в даний момент направлено на підвищення рівня їх енергоефективності. Синтез раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів через те, що дозволяє суттєво зменшити рівень споживаної електроенергії за цикл руху. Безщіткова машина, в основі якої є синхронний двигун, відноситься до найбільш популярних типів двигунів, що використовуються в електроприводах транспортних засобів. Векторний простір системи керування ділиться на шість секторів, кожен з яких відповідає одному з шести станів сигналу датчика Холла. У той же час, безщіткова машина постійного струму при роботі на низькій кутовій частоті не створює достатню величину протиЕРС обмоток для заряду акумулятора, тобто в такому режимі відсутні умови для відновлення його заряду. Через наявність індуктивності обмоток в двигуні існують можливості для створення підвищуючого ланцюга. Для відновлення заряду акумулятора в такому режимі необхідно підняти напругу ланки постійного струму за допомогою індуктивності акумулятора. З цією метою необхідно закрити всі силові ключі, які підключені до позитивної шини ланки постійного струму, а управління ключами, підключеними до негативної шини, здійснювати за допомогою широтно - імпульсної модуляції. У роботі виконано вирішення наукової задачі, що пов'язана з розробкою системи керування рекуперативним гальмуванням електричного транспортного засобу на базі безщіткової машини постійного струму. Розроблена система керування містить блоки розділення гальмівного моменту, що виходить з позицій безпеки руху, енергоефективності та балансування координат електромобіля. За рахунок застосування нечіткого керування та ПД-регулятора система виконує розділення зусилля механічного гальмування та електричного рекуперативного. Використання ПД-регулятора є досить поширеним методом у теорії автоматичного керування, проте воно не враховує такі параметри, як заряд батареї, швидкість, інтенсивність гальмування і т.д. У розробленій системі використовується нечітке керування з трьома входними параметрами: швидкість, заряд батареї та інтенсивність гальмування.

**Ключові слова:** рекуперативне гальмування, безщіткова машина, система керування, генераторний режим, коефіцієнт модуляції, синхронний двигун, пошук екстремуму

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Розвиток електромеханічних систем транспортних засобів багато в чому направлений на підвищення рівня їх енергоефективності. Пошук раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів, оскільки дозволяє суттєво зменшити частку споживаної електроенергії протягом циклу руху. Одним з найбільш популярних типів двигунів, що використовується в електроприводах транспортних засобів, є безщіткова машина постійного струму на базі синхронної машини з постійними магнітами. Отже, розробка