

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

СЕМІКОВ ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 681.511.4

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ
З СУПЕРКОНДЕНСАТОРНОЮ БАТАРЕЄЮ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Клепиков Володимир Борисович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизованих
електромеханічних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Борис Іванович,
Інститут технічних проблем магнетизму
Національної академії наук України,
м. Харків, завідувач відділом проблем
управління магнітним полем;

кандидат технічних наук, доцент
Маслій Артем Сергійович,
Український державний університет
залізничного транспорту, м. Харків,
доцент кафедри електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки.

Захист відбудеться «6» травня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресом: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресом: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «2» квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.04
ІВАХНО



Володимир

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За свідченням світових експертів відбувається перехід до електромобільного транспорту від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) з наростаючим темпами. Це обумовлено обмеженістю органічних енергоресурсів та екологічними факторами, особливо у великих містах. Також уряди ряду провідних промислово розвинених країн затвердили програми з переходу від автомобілів до електромобілів і навіть прийняли закони про заборону випуску автомобілів з ДВЗ вже в найближчій перспективі. Багато провідних закордонних автомобільних фірм вже серійно випускають електромобілі. Для України, яка імпортує більш половини необхідних нафтопродуктів і газу і в той же час має значні ресурси виробництва електроенергії від атомної енергетики у нічний час, перехід від автомобілів до електромобілів має особливе значення. Вже у 2018 році країна посіла перше місце в Європі за темпами зростання кількості електромобілів. Щоб бути готовим до масового переходу до електромобільного транспорту необхідно забезпечити підготовку відповідних фахівців. Найбільший наукотехнічний вклад у розробку та створення в Україні електротранспортних засобів різного призначення до 2010 року було внесено науковцями інституту електродинаміки НАН України під керівництвом А. К. Шидловського та В. Б. Павлова. Зараз електромобільною тематикою розпочали займатися кафедри ряду провідних ВУЗів, що традиційно готували фахівців з електроприводу. Це викликано з одного боку зменшенням виробництва промислових підприємств традиційних споживачів випускників з автоматизованого електроприводу (ЕП), з другого — доцільністю використання великого досвіду, що накопичений вченими, науковцями та викладачами закладів вищої освіти у дослідженні, розробці, створенні сучасних енергоефективних промислових електроприводів широкого призначення, а також при підготовці фахівців в галузі автоматизованих електромеханічних систем. На кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» у 2011 році було відкрито спеціалізацію «Комп'ютеризовані системи електромобілів», підготовка по якій після затвердження в Україні нового переліку спеціальностей ведеться в рамках спеціалізації «Мехатроніка та робототехніка» спеціальності «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка». Тому представляється актуальною розробка енергоефективного тягового електропривода електромобіля і дослідження різноманіття режимів його роботи для учбових і дослідницьких цілей, а також вдосконалення методик для розрахунку силових компонентів ЕП з отриманням відповідних розрахункових залежностей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» згідно з планами науково-дослідних держбюджетних тем МОН України: «Розробка енергоресурсозберігаючого електропривода електромобіля з мікропроцесорним керуванням для навчального процесу та наукових досліджень» (ДР №0113U000435); «Розробка експериментального зразка енергоефективного електропривода електромобіля з суперконденсаторною батареєю» (ДР №0115U000529); «Створення експериментального зразка вітчизняного елект-

ропривода для колісних електротранспортних засобів подвійного призначення» (ДР №0117U004884); «Дослідження енергоефективного електропривода електромобіля подвійного призначення з підвищеними тяговими та маскувальними характеристиками» (ДР №0113U000435), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета дисертаційної роботи розробка, дослідження і створення енергоефективного мікропроцесорного електроприводу електромобіля для навчального процесу і наукових досліджень.

Відповідно до вказаної мети у роботі поставлено наступні **задачі**:

- обґрунтувати та сформулювати принципи створення електроприводу електромобіля з урахуванням мети роботи та умов її реалізації, відповідно обґрунтувати функціональну схему електроприводу, основні технічні рішення, розробити принципову схему;

- удосконалити методики вибору силових компонентів тягового електроприводу, зробити вибір для електроприводу, що створюється;

- розробити математичну і комп'ютерну моделі електропривода, виконати комп'ютерне моделювання статичних і динамічних двигунних та рекуперативних гальмівних режимів роботи електропривода;

- оцінити енергозберігаючу здатність електроприводу електромобіля, за рахунок рекуперації енергії в гальмівних режимах стандартних міських циклів руху;

- виконати дослідження аномальних режимів руху, що виникають при буксуванні коліс, з метою винайдення легко вимірювальних координат електроприводу, для використання при створенні датчика буксування системи усунення надлишкового прослизання засобами електроприводу;

- створити електропривід на базі вітчизняного автомобіля і провести експериментальні дослідження для перевірки комп'ютерної моделі та системи керування.

Об'єктом дослідження є електромагнітні та електромеханічні процеси в електроприводі електромобіля в динамічних і статичних режимах руху.

Предметом дослідження є електромеханічна система тягового електроприводу електромобіля з суперконденсаторною та акумуляторною батареями.

Методи дослідження. При виконанні роботи використовувалися методи теоретичних основ електротехніки та теорії електроприводу для отримання залежностей розрахунку параметрів силових компонентів електроприводу, аналізу електромеханічних систем та теорії диференціальних рівнянь для створення математичної моделі, теорії автоматичного керування для розрахунку системи керування, перетворювання Лапласа і комп'ютерного моделювання для побудови комп'ютерної моделі і перевірки на неї теоретичних положень, методи експериментального дослідження для перевірки комп'ютерної моделі, системи керування та силового кола.

Наукова новизна отриманих результатів:

- обґрунтовані принципи створення лабораторного зразка електроприводу електромобіля для використання в учбовому процесі та наукових дослідженнях кафедри у зв'язку з відкриттям в НТУ «ХПІ» підготовки за новою спеціалізаці-

єю з електромобільної тематики, які враховують матеріально-технічні умови створення зразка, необхідність нових схемотехнічних рішень, максимальне використання вітчизняних компонентів, можливість досліджень за актуальною держбюджетною тематикою МОН України;

- удосконалено метод еквівалентування для розрахунку потужності електродвигуна введенням понять питомих по масі сили й потужності та масогабаритного коефіцієнта для аеродинамічної складової сили опору руху, а також за рахунок одержання співвідношень та графічних залежностей для визначення питомої потужності електродвигуна за умов нагріву, що надало можливість універсалізації розрахунку та вибору потужності електродвигуна електромобіля;

- вперше запропоновано використання багатофазного широтно-імпульсного перетворювача з одночасним живленням від суперконденсаторної та акумуляторної батареї для електроприводу електромобіля, що підвищує енергоефективність та зменшує навантаження на акумуляторну батарею;

- вперше при дослідженні режимів буксування коліс електромобіля доведено, що для електропривода з суперконденсаторною батареєю і симетричним механічним диференціалом для визначення факту зриву в надлишкове прослизання коліс можуть бути використані зміни величин прискорення коліс сумісно із зміною сили струму електродвигуна, що дозволяє підвищити швидкодію системи керування максимальної сили зчеплення коліс з дорожнім покриттям.

Практичне значення одержаних результатів:

- створено на базі вітчизняного автомобіля «Ланос» електромобіль з тяговим мікропроцесорним електроприводом з суперконденсаторною батареєю, який використовується у навчальному процесі студентів при проведенні практичних занять і лабораторних робіт, виконанні бакалаврських та магістерських робіт і проектів, досліджень аспірантами, викладачами та науковцями, а також виконанні 4-х держбюджетних наукових робіт за планами МОН України. Результати роботи використані в навчальних курсах: «Спеціальний курс з теорії електропривода» і «Електрообладнання електромобілів».

- розроблені математична і комп'ютерна моделі електропривода з суперконденсаторною батареєю, проведено комп'ютерне моделювання статичних і динамічних режимів роботи електропривода в різних умовах і підтверджено очікуване функціонування компонентів електропривода. Виконано оцінку енергоефективності електропривода електромобіля і показано, що за рахунок рекуперації енергії в гальмівних режимах навіть з урахуванням втрат в елементах силової ланки в різних стандартних режимах міського циклу може бути зекономлено 13...24% енергоресурсів акумуляторної батареї;

- розроблені схема і алгоритм роботи багатофазного широтно-імпульсного перетворювача із зсувом між фазами та живленням електродвигуна одночасно від акумуляторів та суперконденсаторів, що забезпечує зниження пульсацій струму накопичувачів й електродвигуна і зменшує в них втрати енергії.

- на лабораторному стенді і на створеному на кафедрі електромобілі підтверджена працездатність створеного електропривода і відповідність його функ-

ціонування і експериментальних результатів результатам теоретичних досліджень.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: систематизовано дані щодо використовуваних у електромобілях типів електродвигунів, накопичувачів електроенергії, структур силової частини ЕП; вдосконалено методику вибору параметрів тягового електродвигуна електромобіля і суперконденсаторної батареї, отримані залежності розрахунку потужності електродвигуна від заданих параметрів електромобіля у 7-и стандартних циклах руху; синтезовано комп'ютерну модель тягового електроприводу електромобіля та виконано на неї моделювання статичних та динамічних режимів руху, а також окремих випадків прослизання коліс; створення широтно-імпульсного перетворювача та реалізація на ньому експериментальних досліджень, особиста участь в обробці результатів.

Апробація результатів. Основні положення і результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (2013, Алушта; 2015 та 2019, Харків); «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (2012, 2013 та 2018, Кременчук); International Scientific and Technological Conference “Modern problems of power engineering and ways of solving them” (2019, Tbilisi, Georgia).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць: 6 статей у фахових виданнях України, з яких 1 відноситься до бази даних Scopus, 1 стаття у науковому періодичному виданні Грузії та 3 статті у збірниках матеріалів Міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура дисертації обумовлена метою і завданнями дослідження. Дисертаційна робота складається зі вступу, анотації двома мовами, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Її повний обсяг складає 190 сторінок, з них: 134 с основний зміст, 152 ілюстрації, 11 таблиць по тексту, 3 додатків на 24 сторінках, 97 найменувань використаних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з Державними програмами і бюджетними темами, сформульовані мета та основні задачі досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, вказана апробація.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел з питань сучасного стану у галузі електромобілебудування, та питань пов'язаних із створенням електромобілів на базі автомобілю заміною ДВЗ на ЕП з мікропроцесорним керуванням. Розглянуто структури гібридних та електричних автомобілів. Виконано огляд джерел електричної енергії, що використовуються в електромобілях, та зроблено співставлення їх характеристик. Обґрунтовано доцільність використання суперконденсаторів (СКБ) для підвищення енергоефективності ЕП

та зменшення навантаження на акумуляторну батарею (АБ) в режимах рекуперативного гальмування, а також створення комбінованих джерел на базі АБ з СКБ та розглянуті різні схеми їх об'єднання. Зроблено також огляд за видами схем перетворювачів електричної енергії, які забезпечують управління електродвигуном, а також різних типів двигунів і проведено їх співставлення. Виходячи з виконаного огляду, зроблено вибір типів основних компонентів тягового електропривода електромобіля та постановку задач дисертації з урахуванням мети роботи та умов її реалізації.

У другому розділі сформульовані принципи створення функціональної та базової принципової схем, виходячи з необхідності використання електромобіля для навчальних і наукових цілей. Принципи, зокрема, передбачають: підвищення енергоефективності та ресурсу АБ за рахунок реалізації рекуперативних режимів з додатковим накопичувачем енергії; використання нових технічних рішень; методичну доцільність; доступність вимірювання необхідних координат для зменшення буксування; мінімальну зміну кінематичної схеми автомобіля.

Запропонована функціональна схема надана на рис. 1. Джерелом енергії є АБ, що забезпечує на виході постійну напругу. Для підвищення енергоефективності та ресурсу АБ є додатковий накопичувач — СКБ. ЕП виконується на базі електродвигуна (ЕД) постійного струму з методичної доцільності. Перетворення постійної напруги джерела в постійне регульоване, необхідне для управління ЕД, здійснюється силовим напівпровідниковим перетворювачем (СНПП) методом широко-імпульсної модуляції (ШІМ). Керування перетворювачем забезпечує мікропроцесорний блок управління (МПСК), який дозволяє також реалізовувати логічні операції необхідні для управління рухом. У кінематичній схемі допуститься збереження коробки переключення передач (КПП) і симетричного диференціалу (Д), який з'єднаний з колесами (К).

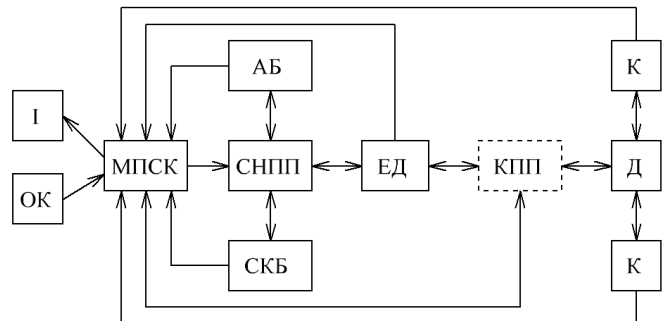


Рисунок 1 — Функціональна схема

Вдосконалено методику вибору

ЕД за потужністю з урахуванням особливості сили опору руху F_c внаслідок нелінійної аеродинамічної складової. Удосконалення забезпечено введенням універсальних співвідношень питомих по масі величин сил і потужності із введенням питомого масогабаритного коефіцієнта

$$k_r = \frac{C_x \cdot S \cdot \rho_v}{2 \cdot m}, \quad (1)$$

де C_x — аеродинамічний коефіцієнт опору автомобіля; S — площа лобового опору автомобіля; ρ_v — щільність повітря; m — маса електромобіля.

З урахуванням цього коефіцієнта приведено вираз питомої по масі електромобіля сили, включаючи статичний опір F_c

$$F^* = \frac{F}{m} = a + \frac{F_c}{m} = a + g \left(\mu_0 (1 + C_\mu V) + \operatorname{tg} \alpha \right) \cos \alpha + k_r V^2, \quad (2)$$

де a — прискорення електромобіля; V — швидкість електромобіля; μ_0 — коефіцієнт опору коченню на малій швидкості; C_μ — коефіцієнт, що враховує залежність опору кочення від швидкості.

Розрахунок потужності за цією статичною силою для швидкостей, що дорівнюють максимальних швидкостей у 7-ми цаклах (NEDC, ECE-15, CADC, Japan 10 та 10-15 Mode Cycle, JC08, US FTP 72) відображено на рис. 2 пунктирними лініями.

У випадку використання ЕД з 2-зонним керуванням швидкості виведено співвідношення для визначення добутку коефіцієнта перевантажувальної здатності по моменту λ_M на необхідний діапазон регулювання швидкості ЕД у 2-й зоні D від заданих характеристик електромобіля і умов руху

$$\lambda_M D = \frac{g(\mu_0 + \operatorname{tg} \alpha_{\max}) \cos \alpha_{\max}}{k_3 \left(g \mu_0 (1 + C_\mu V_{\max}) + k_\Gamma V_{\max}^2 \right)}. \quad (3)$$

Виведено співвідношення з урахуванням динамічних сил питомої по масі електромобіля еквівалентної сили для вибору ЕД за потужністю у випадку урахуванням 2-зоного керування та ККД трансмісії $\eta_{\text{тр}}$ за допомогою функції знаку

$$F^*_{\text{э.ц.}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{V(1 + C_\omega F^*_i)}{V_H} \right)^{1 + \operatorname{sgn}(V(1 + C_\omega F^*_i) - V_H)} \eta_{\text{тр}}^{-2 \operatorname{sgn} F^*_i} \int_{t_i}^{t_i+1} F^*_i{}^2 dt \right)}, \quad (4)$$

де C_ω — коефіцієнт впливу сили на прослизання, n — кількість інтервалів руху, V_H — швидкість електромобілю при номінальній ЕД, $\eta_{\text{тр}}$ — ККД трансмісії.

Отримано вирази питомих еквівалентних сил для 7-ми вищевказаних міжнародних стандартних циклів. Графічні залежності питомої потужності від масо-габаритного коефіцієнту k_Γ для різних стандартних циклів надані на рис. 2 штрих-пунктирними лініями для випадку двозонного керування швидкості з діапазоном $D = 2$ та безперервна лініями для випадку постійних магнітів. Залежності свідчать, про суттєву відмінність питомої потужності від того чи іншого стандартного циклу, а також про її зростання при руху з більшою постійною швидкістю. При 2-зоному регулюванні вибір ЕД за потужністю слід виконувати виходячи з максимальної сталої довгочасної швидкості руху.

Розрахунок ємності СКБ виконано за умов не перебільшення напруги на ній при максимальному значенні рекуперованої енергії. Одержані відповідні співвідношення для постійного гальмування з урахуванням сили (2). При повному гальмуванні від швидкості V_0 на горизонтальній ділянці питома по масі електромобіля енергія, що рекуперується в СКБ, розраховується за виразом

$$\frac{W_{\text{р.к.}}}{m} = \frac{V_0^2}{2} \left(\eta_{\text{тр}} \left(1 - \frac{1}{a} \left(\mu g + \frac{k_\Gamma V_0^2}{2} \right) \right) - \delta_{\text{мех.н.ЕД}} \frac{F_H^*}{a} \right) - \frac{\delta_{\text{ел.н.ЕД}} V_0 V_H}{F_H^*} \left(V_0^2 k_\Gamma \left(\frac{2}{3} - \frac{2\mu g}{3a} + \frac{k_\Gamma V_0^2}{5a} \right) + (a - \mu g)^2 \right), \quad (5)$$

де $\delta_{\text{мех.н.ЕД}}$ та $\delta_{\text{ел.н.ЕД}}$ — відносні механічні та електричні втрати у номінальному режимі ЕД.

А при русі згори з постійною швидкістю енергія складає

$$\frac{W_{p.п.}}{m} = \frac{\Delta h}{\sin \alpha} \eta_{EP} \cdot (g \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \mu) - k_{\Gamma} V_c^2) \quad (6)$$

Графічні залежності розраховані за цими співвідношеннями надані на рис. 3 відносно кінетичної енергії та рис. 4. З кривих видно, що гальмівні режими із збільшеними значеннями прискорень призводить спочатку до збільшення рекуперованої енергії, а при великих швидкостях до зменшення. В той же час гальмування із малим прискоренням $a = -0,5 \text{ м/с}^2$, починаючи із швидкості більше 100 км/ч призводить до зменшення рекуперованої енергії, що пояснюється необхідністю подолання значної аеродинамічної складової. Це пов'язано зі збільшенням впливу електричних втрат, що збільшуються з прискоренням, при малих ЕРС та впливу аеродинамічних втрат при великих швидкостях.

Спрощена (базова) схема силової частини ЕП, що відповідає вищевказаній функціональній, надана на рис. 5. У даній схемі АБ — акумуляторна батарея, СКБ — суперконденсаторна батарея, Т1 і Т2 — силові транзистори СНПП, Д1 і Д2 — силові діоди СНПП, Д3 — силовий діод, що запобігає заряду АБ в рекуперативному режимі, М — тяговий електродвигун, РТ — регулятор струму. З метою підвищення енергоефективності за рахунок зменшення втрат в ключових елементах, зменшення пульсацій струму і напруги ЕД та накопичувачів, а також можливості часткового підзаряду

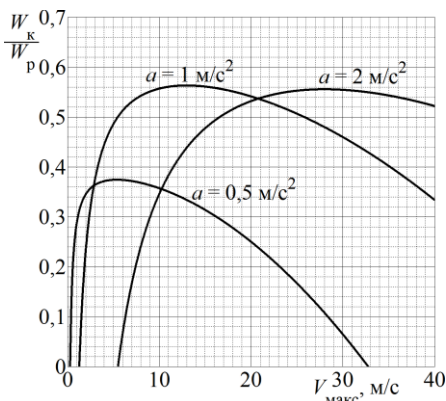


Рисунок 3 — Відносна енергія, що рекуперується при гальмуванні

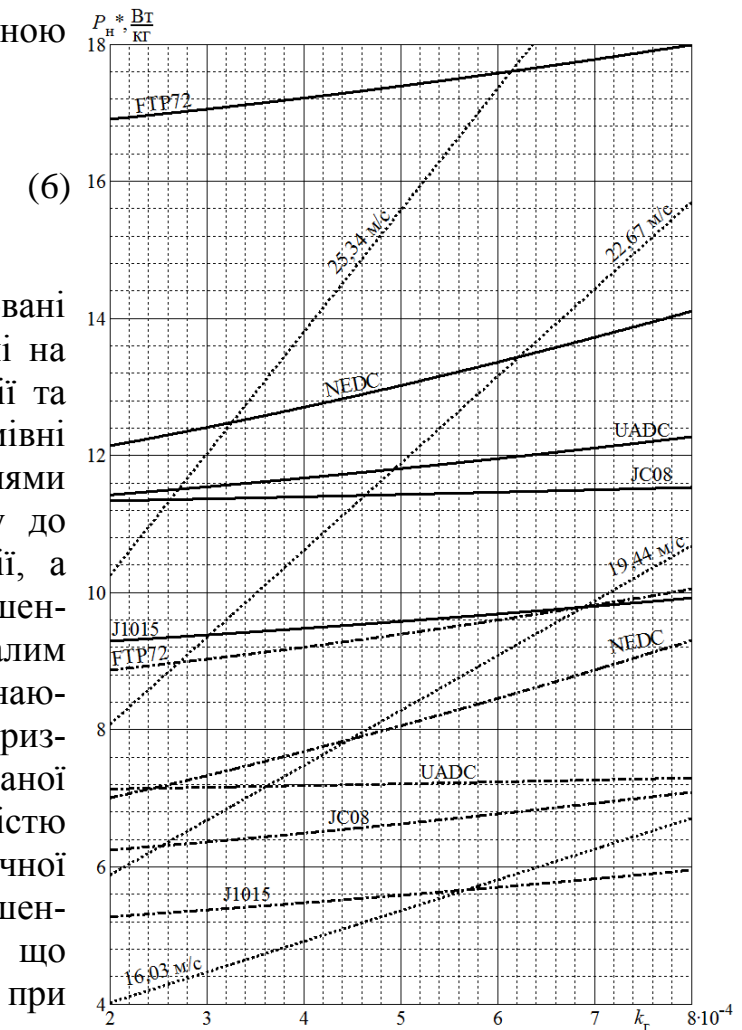


Рисунок 2 — Залежність питомої потужності від масогабаритного коефіцієнту

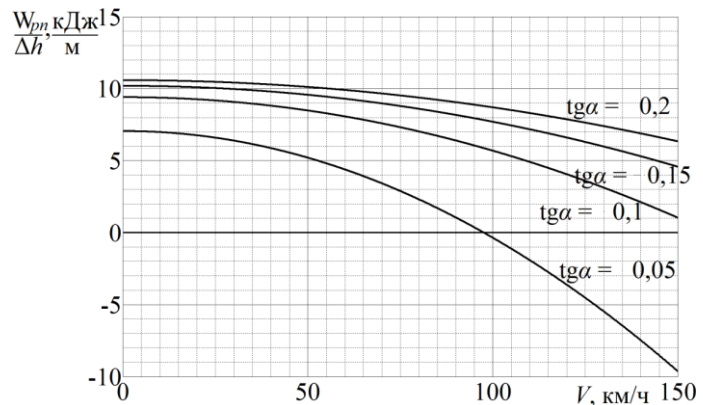


Рисунок 4 — Питому енергія, що рекуперується при спуску

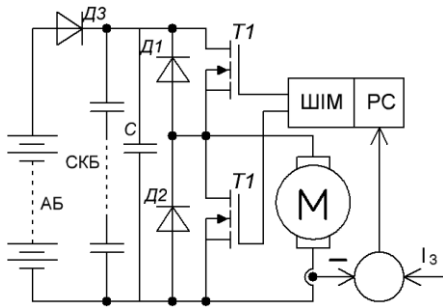


Рисунок 5 — Силова частина с діодом

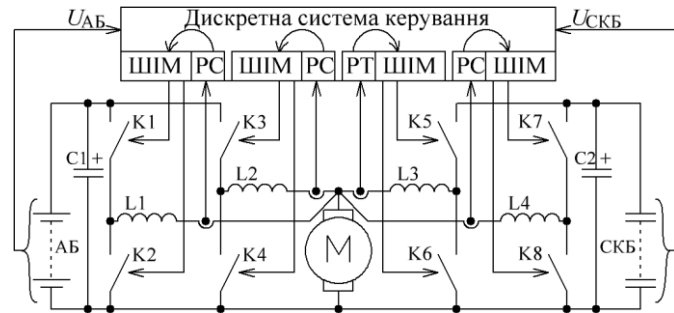


Рисунок 6 — Силова частина 4-фазного ШП

да АБ одночасно із зарядом СКБ в роботі обґрунтовано використання багатозначного ШП постійного струму (наприклад 4-фазного на рис. 6). Така схема дозволяє одночасну роботу обох накопичувачів електроенергії (АБ і СКБ), як в двигунному, так и рекуперативному режимах, із зменшенням їх струмів.

У **третьому розділі** побудовано математичні моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь, що включають в себе рівняння механіки, електромагнітних процесів в силовому колі ЕП, електромеханічного перетворення енергії, рівняння управління і регулювання. Модель враховує дискретності мікропроцесорної системи керування, ШИМ в силових колах, нелінійність характеристики зчеплення ведучих коліс з дорогою та кривої намагнічування, наявність в кінематичній схемі приводних коліс симетричного механічного диференціала, нелінійність залежності сили опору руху від аеродинамічної складової. Математична модель механічної частини у структурній формі надана на рис. 7, за якою синтезована механічна частина комп'ютерної моделі і входить до всієї моделі (рис.10) у вигляді блоку Electromechanical.

Силовое електричне коло однієї фази N -фазного ШП та якоря надано на рис. 8 (точки підключення інших фаз вказані крапками). Для підвищення швидкодії і точності моделювання за рахунок усунення в моделі операції диференціювання виведена залежність напруги якоря від параметрів схеми

$$U_{\text{я}} = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{\phi,i} - R_{\phi} I_{\phi,i}) + \frac{L_{\phi}}{L_{\text{я}}} (E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}})}{\frac{L_{\phi}}{L_{\text{я}}} + N}. \quad (7)$$

Уточнено вираз для розрахунку коефіцієнта ПІ регулятора струму з урахуванням фільтрів з постійною часу T_{ϕ} у зворотних зв'язках (33) та налаштування на аперіодичний процес для збільшення запасу стійкості порівняно з модульним оптимумом

$$K_{\text{РТ}} = \frac{4L_{\text{я}}}{27T_{\phi} K_{\text{ОС}}}. \quad (8)$$

Комп'ютерна модель цифрового регулятора струму із колом фази, надана на рис. 9 та входить до загальної моделі у вигляді блоків СС_РВС, кількість яких може змінюватись. Вхідними величинами є напруги якоря ($U_{\text{а}}$) та живлення фази

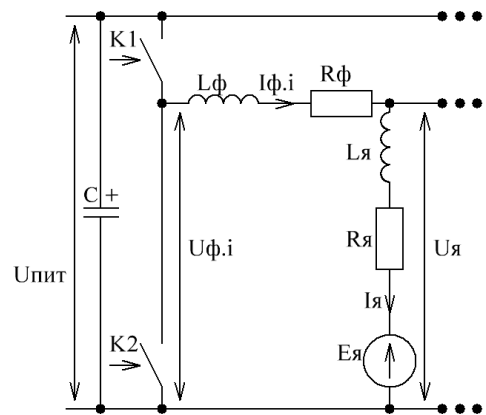


Рисунок 8 — Силовое електричне коло однієї фази

(U_{source_ph}), заданого струму (I_{set}), а вихідними є напруга (U_{ph}) та струм фази (I_{ph}), струм живлення фаз (I_{source_ph}). На рис. 10 надана схема з'єднання складових блоків в модель єдиної електромеханічної системи електромобілю із можливістю зміни кількості фаз, яка використана при дослідженні електромагнітних і електромеханічних процесів при різних умовах і режимах руху електромобіля. На схемах позначено N_{ph} — к-ть фаз, L_a та R_a — індуктивність та опір якоря, L_{ph} та R_{ph} — індуктивність та опір фази, Phase PWM Delay — зсув часу між фазами, I_a та E_a — струм та ЕРС якоря.

У четвертому розділі виконано дослідження статичних та динамічних електромагнітних і електромеханічних режимів роботи ЕП при різних умовах руху електромобіля шляхом комп'ютерного моделювання. Моделювання здійснювалось за параметрами створеного на кафедрі АЕМС електромобіля з СКБ на базі електромобіля Ланос: максимальна маса 1598 кг, добуток площі лобового опору на аеродинамічний коефіцієнт 0,698. Двигун ME1002 потужністю 26 кВт з номінальними напругою 144 В і струмом 205 А, опором якірного кола 0,03 Ом, індуктивністю 0,00009 Гн. АБ — літій-іонна ємністю 22 кВт·ч з номінальною напругою 172 В і внутрішнім опором 0,09 Ом розрахована на дальність проїзду до 150 км на одній підзарядці. СКБ: ємність 12 Ф, максимальна напруга 270 В і внутрішній опір 0,02 Ом розрахована на прийом всієї енергії при гальмуванні з 90 км/год на горизонтальній ділянці дороги. ШПІ заданий 4-фазним з 2-ма фазами підключеними до АБ і 2-ма - до СКБ, як показано на рис. 6. Задана частота комутації ключів в кожній фазі дорівнює 20 кГц із зсувом фаз 12,5 мкс.

За створеною комп'ютерною моделлю елемеханічної системи ЕП електромобілю проведені моделювання наступних режимів і умов роботи:

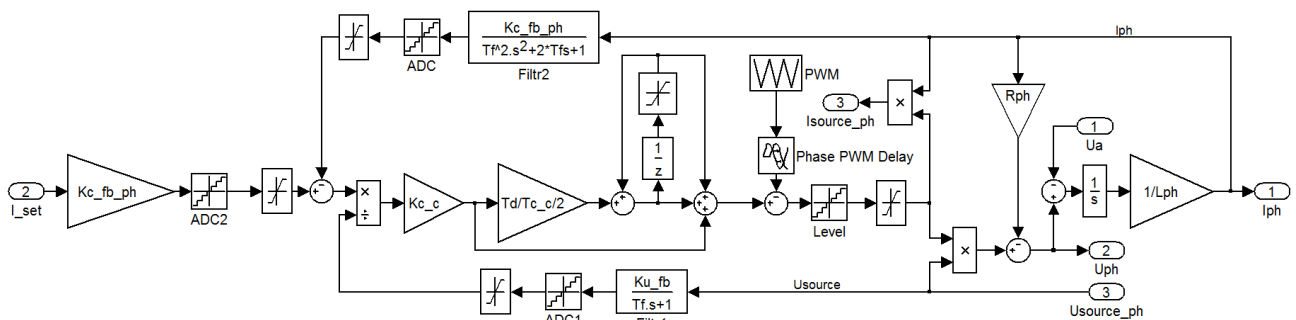


Рисунок 9 — Комп'ютерна модель системи керування та силового кола фази

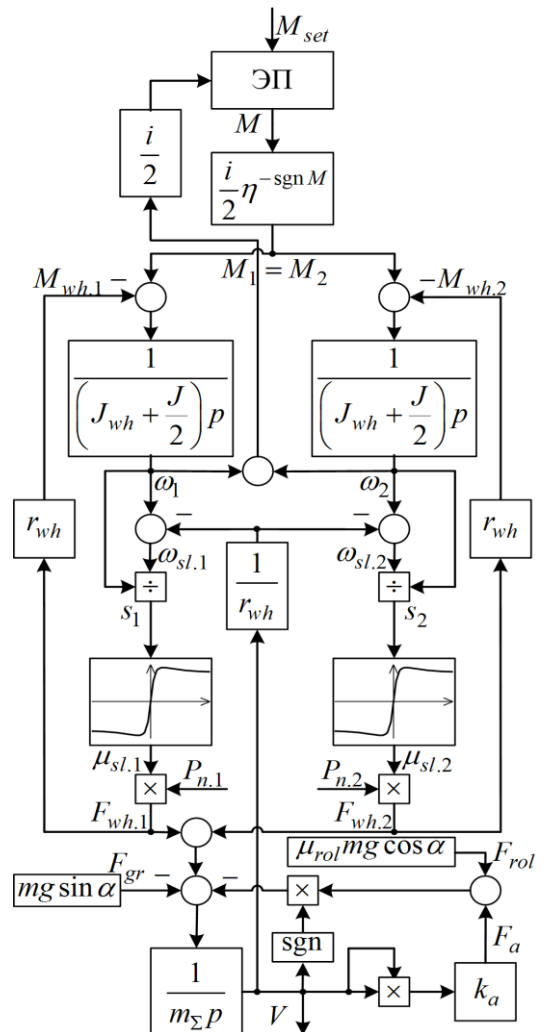


Рисунок 7 — Модель механічної частини у структурній формі

- пуск ЕП електромобіля при ступеневій зміні сигналу завдання.
- гальмування від різних початкових швидкостей із врахуванням втрат в активному опорі кола якоря і СКБ
- перехідні процеси для стандартних режимів міського руху за циклами (NEDC, ECE-15, CADC, Japan 10 та 10-15 Mode Cycle, JC08, US FTP 72),
- режими буксування коліс електромобіля при наїзді одним колесом та обома на початку руху, а також при русі по горизонтальній ділянці і вгору.

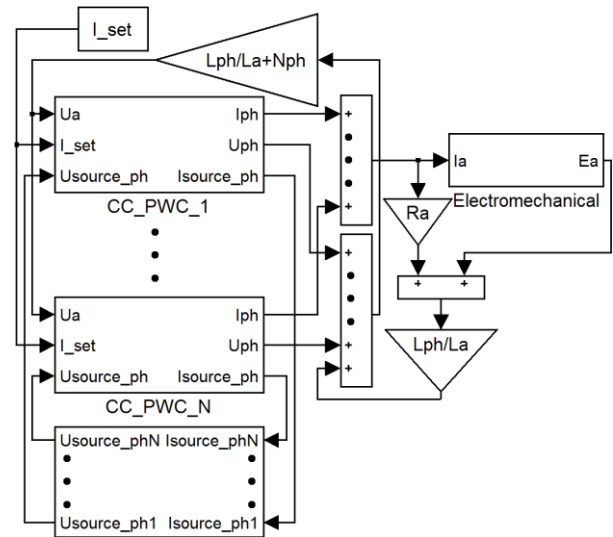


Рисунок 10 — Комп'ютерна модель з'єднання блоків

Перевірки вірності функціонування регулятора струму здійснювалось шляхом подання при пуску на вхід регулятора сигналу завдання номінального струму та відображено на рис. 11, де $U_{я.г.л.с.}$ — усереднена за період комутації напруга, $I_{я.р.}$ — розрахований струм, $I_{я.1}$ та $I_{я.2}$ — промодельований струм. Часові діаграми струму при різних значеннях коефіцієнтів РС за співвідношенням (8) підтверджують відповідність значень коефіцієнтів характеру зміни струму. Моделювання процесів розогу та гальмування показали відповідність енергії, що повертається у СКБ, до виразів (5) та (6).

Оцінка моделювання ефективності різних способів керування впродовж різних стандартних циклів руху показала, що забезпечення одночасного протікання струмів СКБ і АБ в режимах рекуперативного гальмування та прискорення забезпечує менші втрати енергії на 1...3%. Зменшення при цьому середньоквадратичного струму АБ на 4...27%, підвищує термін роботи АБ, з яких 4...18% має перевагу багатозафазна схема. Показники трьох схем за результатами моделювання 7-и циклів надані в таблиці 1.

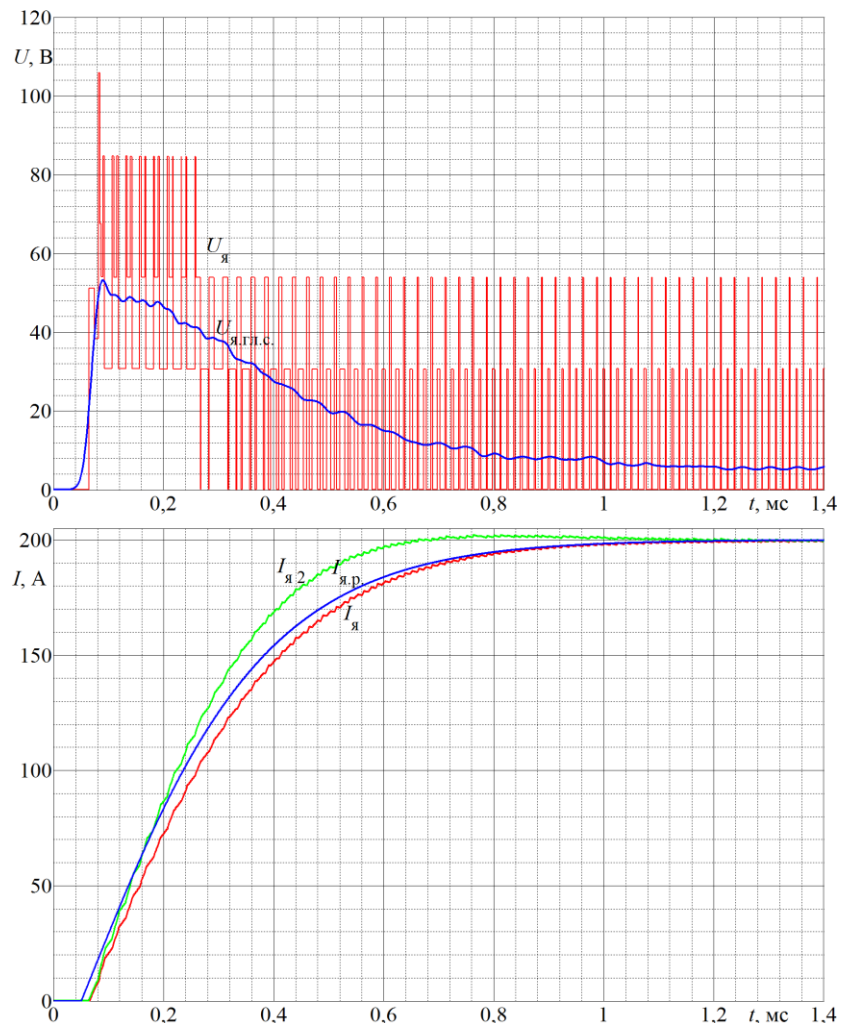


Рисунок 11 — перехідний процес у контурі струму

В якості прикладу на рис. 12 та 13 наведені часові діаграми струмів та напруг за результатами моделювання руху у циклі ЕСЕ-15. Співставлення характеру зміни струму, напруг АБ і СКБ для кожного із характерних ділянок тахограми: прискорення, рух за постійною швидкістю, гальмування повністю узгоджуються із теоретичними результатами.

Одним з режимів руху електромобілю, при яких значно знижуються безпека руху є буксування електромобілю. В роботі були промодельовані ці режими з метою встановлення легко вимірювальних координат ЕП, які свідчать про факт розвитку надлишкового прослизання, що актуально для створення простого і надійного датчика його встановлення. На базі такого датчика у подальшому можлива розробка покращення тягових характеристик електромобіля засобами ЕП. Пропозиції використовувати підвищення швидкості для розпізнавання початку буксування слід вважати недоцільними. Значне підвищення швидкості свідчить, що надлишкове прослизання вже здійснилось, тому цей показник не дозволяє розпізнати початок буксування. Часові діаграми моделювання розвитку буксування при наїзді колеса на ділянку із зниженим коефіцієнтом зчеплення і з імпульсним датчиком швидкості надані на рис. 14. Одержано часові діаграми для руху при розгоні, збільшенні та зниженні швидкості на горизонтальній дорозі та русі вгору і під уклін; для режимів буксування коліс на початку руху, під час наїзду на ділянку із зниженим коефіцієнтом зчеплення одним та обома колесами. Діаграми свідчать, що зменшення коефіцієнту зчеплення супроводжується значним прискоренням та його позитивної похідної, і це може

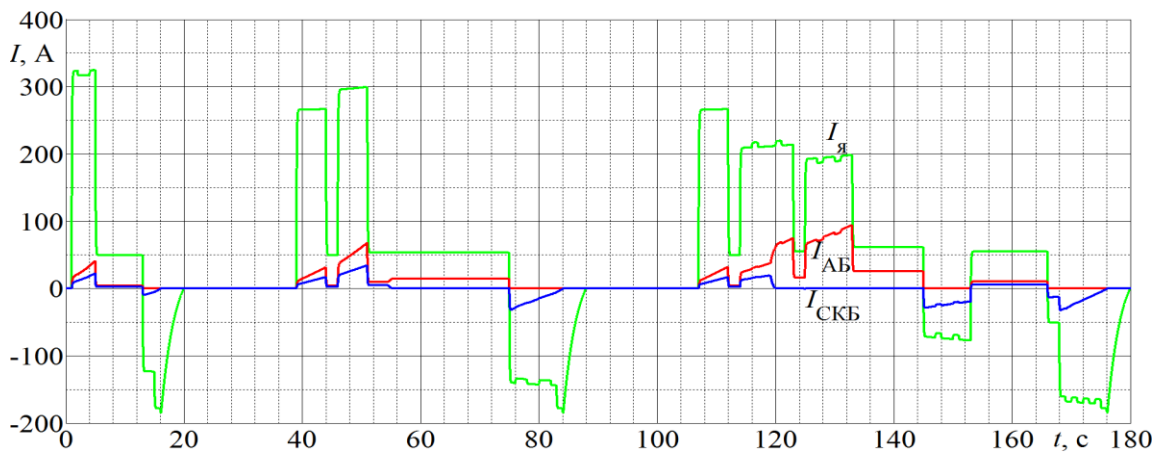


Рисунок 12 — струми якоря, АБ та СКБ при моделюванні руху у циклі J10t

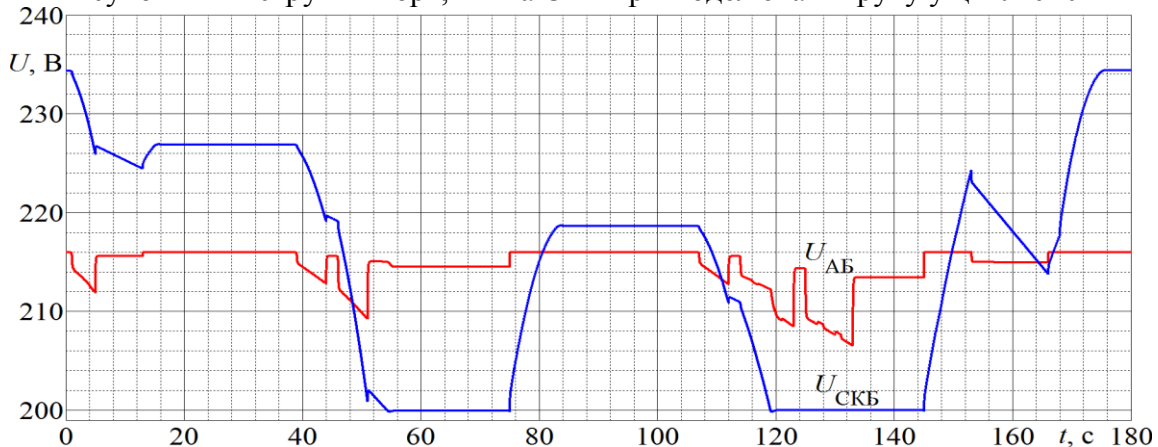


Рисунок 13 — напруги АБ та СКБ при моделюванні руху у циклі J10t

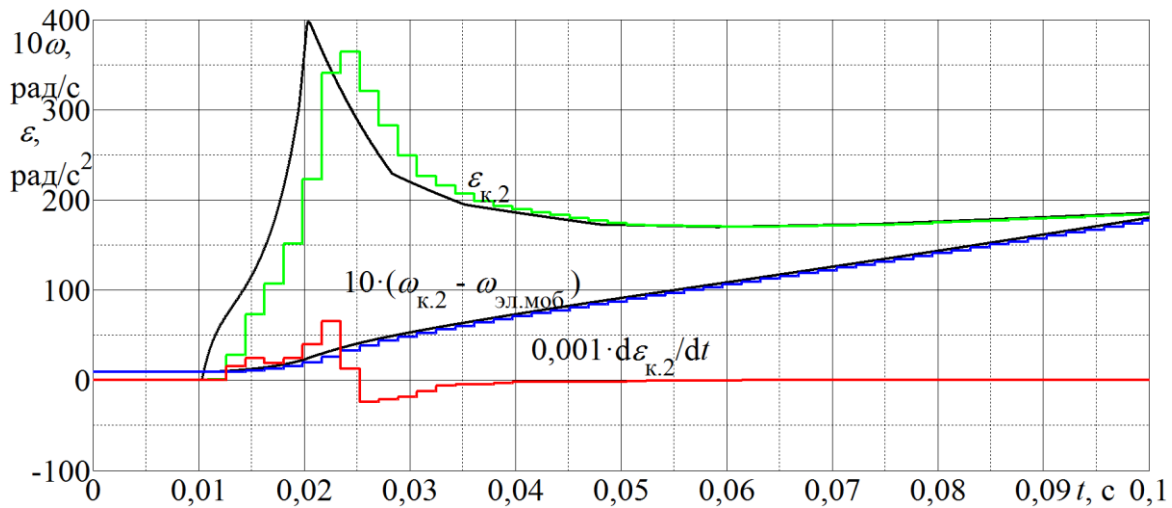


Рисунок 14 — початок буксування з імпульсним датчиком швидкості коліс

бути використано при побудові датчика буксування.

Повний обсяг результатів моделювання надано у додатках до дисертації. Аналіз результатів моделювання дозволив зробити наступні висновки:

- комп'ютерна модель адекватно відбиває фізичні процеси, що мають місце при тих, чи інших умовах руху;
- використання рекуперативних режимів в гальмівних режимах при зниженні швидкості в стандартних міських циклах руху забезпечує повернення джерелу енергії з урахуванням втрат у компонентах електроприводу 13...24%;
- для визначення початку буксування можуть бути використані легко вимірюванні координати: прискорення та його похідні. Це надає можливість створити датчик визначення буксування на сучасних дискретних засобах вимірювання швидкості.

Таблиця 1 — результати моделювання 7-и циклів

Цикл руху		ECE15	NEDC	CADC	J10m	J10-15m	JC08	FTP72
Економія енергії при використанні рекуперативної	з діодом	17,8%	12,9%	21,7%	21,3%	20,5%	20,9%	15,8%
	з переключенням	17,8%	12,9%	21,0%	21,1%	20,3%	20,7%	15,4%
	багатофазний	18,4%	13,3%	24,4%	23,3%	22,3%	22,3%	17,1%
Зменшення середньоквадратичного струму АБ	з діодом	7,9%	4,4%	17,5%	12,2%	9,9%	17,7%	12,8%
	с переключенням	5,5%	3,2%	8,2%	7,5%	6,8%	13,7%	7,5%
	багатофазний	11,9%	8,3%	26,6%	17,8%	18,0%	25,0%	17,9%

П'ятий розділ. Експериментальна перевірка теоретичних положень роботи та вірності функціонування запропонованої системи ЕП перевірялось на лабораторному стенді та при іспитах електромобіля.

ЕП електромобіля було створено на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» на базі автомобіля «Ланос». Перший варіант АБ було виконано на свинцево-кислотних акумуляторах харківського заводу «Владар» на напругу 72 В 120 А*ч. Другий на літій-залізо-фосфатних акумуляторах типу на напругу 76,8 В 104 А*ч. СКБ була набрана з послідовно з'єднаних 48 елементах фірми WIMA загальною ємністю 25 Ф напругою 129,6 В. В якості тягового використано ЕД типу ME1003 з постійними магнітами призначений для електротранспортних засобів з номінальними параметрами: струм 200 А і

напруга 72 В. В напівпровідниковому широтноімпульсному перетворювачі (ШІП) в якості ключів використані польові транзистори з ізольованим затвором типу IRFP4568. Для забезпечення необхідних значень струму та підвищення надійності перетворювач було виконано багатозафазним. При цьому послідовно з кожним ключем було встановлено дросель з індуктивністю 300 мкГн. При цьому система керування забезпечила зсув кожної фази на $1/6$ періоду. Частота комутації 19,2 кГц. Напівпровідникові діоди типу 80CPQ150. Система керування виконана на базі МК типу Cortex-M4 із зовнішнім зворотним зв'язком за струмом та напругою живлення. В якості датчика струма використана датчик Хола. З кінематичної схеми було вилючена муфта зчеплення, але збережена коробка передач. Автомобіль «Ланос» вітчизняного виробництва. Зовнішній вигляд та розміщення елементів надано на рис. 15. Розміщення компонентів електричної схеми виконано методом 3D-моделювання.

Для перевірки функціонування СКБ було створено лабораторний стенд, в якому інерційність електромобілю була заміщена маховиком з моментом інерції $5 \text{ Гк} \cdot \text{м}^2$ з'єднаним безпосередньо з валом ЕД.

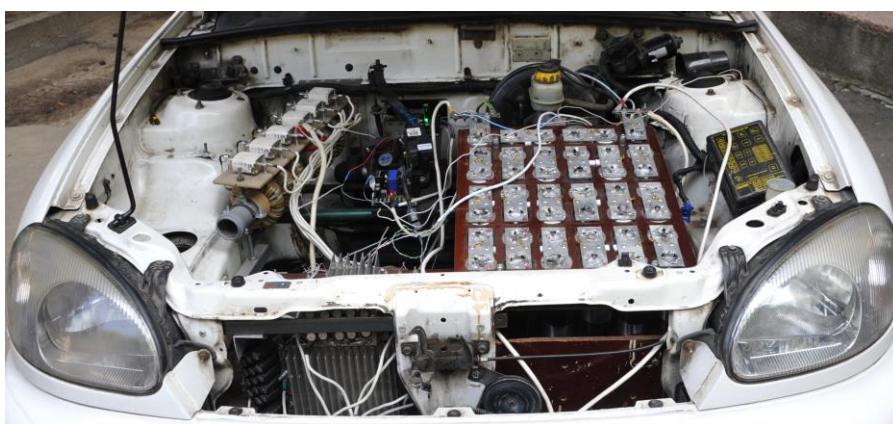


Рисунок 15 — загальний вигляд ЕП в електромобілі

Експериментальна оцінка характеристик СКБ модуля проводилася розрядом і зарядом його через транзистор на електролітичний конденсатор ємністю 0,02 Ф. Тимчасові діаграми струму СКБ модуля (I), зміни напруги на ньому (ΔU) і відносини миттєвих значень зміни напруги до струму ($\Delta U/I$) надані на рис. 16 при короткочасному заряді. На перших мікросекундах помітно вплив індуктивної складової ланцюга БК, що викликає просідання напруги на ньому більше 1 В. Далі, після 100 мкс, $\Delta U / I$ знижується до 0,7 мВ / А при розряді і до про 0,8 мВ / А при заряді, і залишається на цьому рівні протягом всього часу перехідного процесу, що вказує на низький внутрішній опір суперконденсаторна модуля, менше 1 мОм, на малих інтервалах часу перехідних процесів. Час перехідного процесу в суперконденсаторна модулі вказує на його незначний вплив на швидкодію СК.

Перевірка на лабораторному стенді з 6-фазним ШІП (рис. 17) системи керування струму з ПІ регулятором (рис. 18) показала необхідність зменшення в 1,4 рази роз-

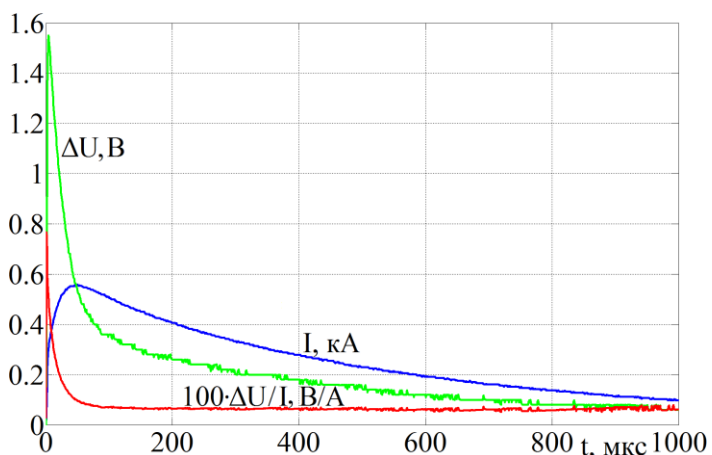


Рисунок 16 — Імпульс заряду СКБ

рахованого коефіцієнта регулятора, що пов'язано з помилкою вимірювання індуктивності дроселів, а також неврахуванням затримок в АЦП та особливостей установки шпаруватості ШІМ у МК.

Створений електромобіль було випробувано 15 липня 2015 року у НТУ «ХП», а також у подальшому на випробувальній ділянці міста Харкова. Випробування у різних режимах підтвердили функціонування компонентів ЕП у відповідності до їх призначення. Испити проводилися у режимах прискорення, руху з постійною швидкістю, зниженням швидкості та зупинкою, тобто у характерних режимах руху типових стандартних тахограм.

Контроль напруги для СКБ фіксував перетворення механічної кінетичної енергії у електромагнітну та електричну і повернення її до СКБ, що підтверджувало відповідне збільшення на ній напруги. Подальший рух після зупинки здійснювався за рахунок рекуперованої в СКБ енергії до моменту порівняння напруги на ній з напругою АБ, після чого починалось живлення ЕД починалось від АБ. Проведені випробування надали корисний досвід щодо вдосконалення деяких елементів механічної частини, пов'язаної з кріпленням тягового ЕД. Випробування підтвердили також суттєве зменшення навантаження акумуляторної батареї струмом, що свідчить про покращення теплового режиму. Це сприяє підвищенню її ресурсу і вказує на доцільність досліджень сумісного використання з СКБ літій-іонних та інших батарей, що встановлюються у серійних зарубіжних електромобілях

У **додатках** наведено матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес, результати моделювання тривалих режимів руху у 6 стандартних циклах для 3 різних структур об'єднання накопичувачів, а також динамічних режимів буксування в різних умовах.

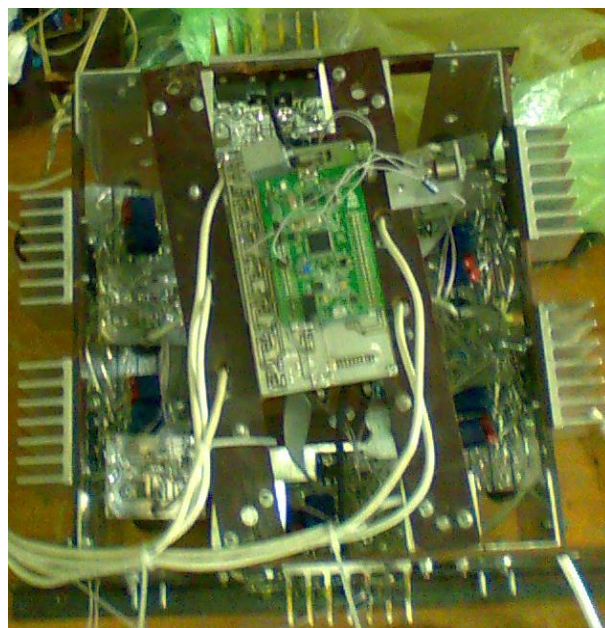


Рисунок 17 — 6-фазний ШІП

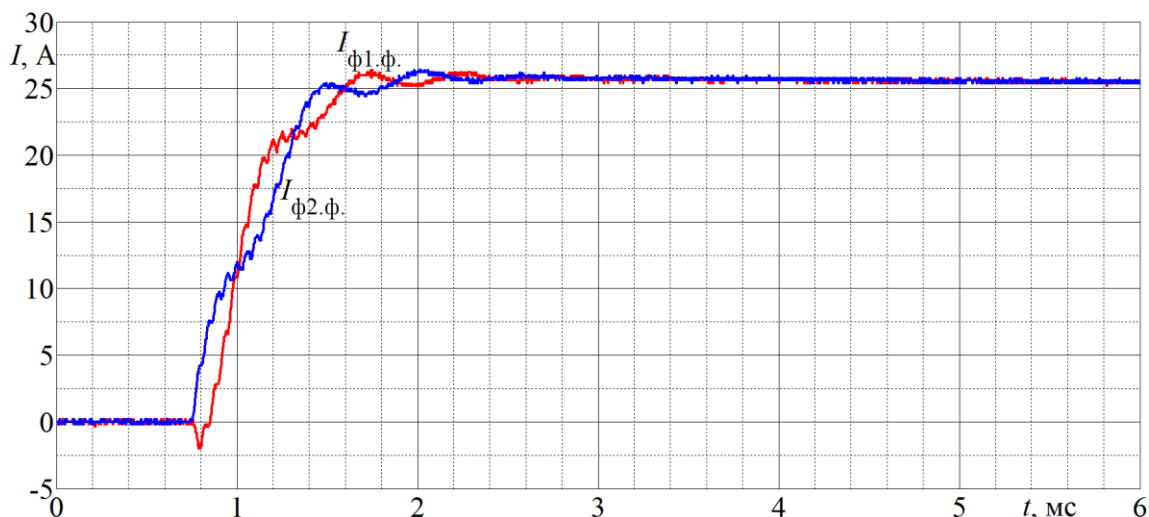


Рисунок 18 — перехідний процес у контурі струму у створеному ЕП

ВИСНОВКИ

Робота пов'язана із створенням лабораторного зразка електроприводу електромобіля з СКБ, що збільшує енергоефективність ЕП та ресурс АБ, та дискретною системою керування на базі мікроконтролера, яка дозволяє високу швидкодію, що необхідно для запобігання прослизання коліс, у зв'язку з відкриттям в НТУ «ХП» підготовки за новою спеціалізацією з електромобільної тематики для використання в учбовому процесі та наукових дослідженнях кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи».

Обґрунтовані принципи створення лабораторного зразка електроприводу електромобіля для використання в учбовому процесі та наукових дослідженнях кафедри, які враховують методичну доцільність, підвищення енергоефективності ЕП та ресурсу АБ, використання сучасних засобів керування ЕП, матеріально-технічні умови створення зразка. Розроблено функціональну та модифікації принципів схем тягового електроприводу електромобіля, які забезпечують підвищену енергоефективність за рахунок здійснення рекуперації енергії в гальмівних режимах з використання СКБ та багатофазного ШП.

Удосконалено методику розрахунку та вибору тягового ЕД та СКБ ЕП електромобіля з використанням запропонованого масогабаритного коефіцієнту. Це надало можливість універсалізації розрахунку потужності ЕД для статичних та динамічних режимів за методом еквівалентування та ємності СКБ з різними технічними параметрами та умовами руху.

Розроблено математичну модель електромеханічної системи електромобіля, а також комп'ютерну модель з використанням пакету Simulink програми Matlab. Модель враховує широтно-імпульсну модуляцію напруги у силовому колі, дискретність системи керування, нелінійність коефіцієнту зчеплення колеса з дорогою та характеристики намагнічування ДПС, наявність механічного симетричного диференціалу. Виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних, електромеханічних і механічних процесів руху електромобіля в динамічних і статичних режимах при різних умовах руху. Воно свідчить про вірність отриманих залежностей для розрахунку ЕД, СКБ та системи керування. Співставленні результати для трьох запропонованих модифікацій схем, які забезпечують зменшення пульсацій напруги та втрат енергії.

Зроблено оцінку енергоефективності для трьох запропонованих модифікацій схем ЕП для 7-ми міжнародних стандартних циклів руху з урахуванням втрат енергії в компонентах електроприводу. Показано, що економія енергії за рахунок рекуперації може досягати 13...24%, а зменшення середньоквадратичного струму АБ на 4...27%, при цьому розподіл електроенергії між АБ та СКБ за допомогою багатофазного ШП забезпечує на 1...3% менші затрати енергії та на 4..18% менший середньоквадратичний струм АБ.

Досліджено аномальні режими роботи електроприводу електромобіля в умовах буксування коліс і встановлено, що можливими легко вимірювальними координатами визначення факту буксування можуть бути прискорення колеса разом із його похідної при наявності імпульсного датчика швидкості на колесах.

Створено лабораторний стенд та тяговий електропривід з СКБ та багатофазним ШПІ для електромобіля на базі автомобіля «Ланос». Експерименти підтвердили відповідність роботи розробленої принципової схеми та системи керування електроприводу до розрахованим параметрів та моделюванню. Випробування підтвердили, що СКБ дозволяє без впливу на перехідні процеси повертати до неї значну частину енергії, що рекуперується при гальмуванні, що суттєво зменшує навантаження акумуляторної батареї струмом, що покращує тепловий режим та підвищує її ресурс. Це також вказує на доцільність досліджень сумісного використання з СКБ літій-іонних та інших типів батарей, що встановлюються у серійних зарубіжних електромобілях.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в начальному процесі кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ» при викладанні навчальних дисциплін «Електрообладнання електромобілів» та «Спецкурс з теорії і практики електропривода», а також при виконанні дипломних робіт бакалаврів та магістрів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Семиков А. В. Лабораторные исследования электропривода электромобиля с суперконденсаторной батареей / Клепиков В. Б., Гончар А. С., Моисеев А. Н., Семиков А. В., Малетин Ю. А., Жихарев А. Н. // Зб. наук. пр. Вісник НТУ «ХПІ» серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – (спец. випуск) № 36 (1009). – С. 441–443.

Здобувачем створено широтно-імпульсний перетворювач для експериментального стенду та виконано на ньому експерименти.

2. Семиков А. В. Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в электроприводе электромобиля с суперконденсаторной батареей // Зб. наук. пр. Вісник НТУ «ХПІ» серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – С. 93–95.

3. Семиков А. В. Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии / Клепиков В. Б., Семиков А. В. и др. // Зб. наук. пр. Вісник НТУ «ХПІ» серія: «Проблеми автоматизованого електроприводу теорія і практика». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – С. 195–198.

Здобувачем розраховані параметри компонентів, створено широтно-імпульсний перетворювач для експериментального стенду та виконано на ньому експерименти, прийнято участь у монтажі електроприводу електромобіля

4. Семиков А. В. Энергоэффективность рекуперативных режимов электромобиля / Клепиков В. Б., Семиков А. В. // Київ: Технічна електродинаміка. – 2017. – № 6. – С. 36–42. (входить до бази даних Scopus)

Здобувачем отримані залежності розрахунку енергії суперконденсаторної батареї та побудовані за ними діаграми.

5. Семиков А. В. К выбору параметров тягового электродвигателя электромобиля / Семиков А. В., Воинов В. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 9 (1334). – С. 88–93.

Здобувачем отримані залежності розрахунку параметрів електродвигуна та побудовані за ними діаграми.

6. Семиков А. В. Применение многофазного широтноимпульсного преобразователя с двумя накопителми электроэнергии в тяговом электроприводе электромобиля // Вісник НТУ «ХП». Сер.:Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика: зб. наук. пр. – Харків:НТУ «ХП», 2020. – № 4(1358). – С.47–51.

7. Семиков А. В. Моделирование динамических процессов электромеханической системы электромобиля при буксовании колес / Клепиков В. Б., Семиков А. В. // Tbilisi: Energia. Modern problems of power engineering and ways of solving them. – 2019. – № 3(91). – С. 34–41.

Здобувачем синтезовано комп'ютерну модель та проведено на ній моделювання.

8. Семиков А. В. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе электромобиля с ионисторами / Гончар А. С., Семиков А. В. // Зб. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2012. – С. 342–343.

Здобувачем синтезовано комп'ютерну модель та проведено на ній моделювання.

9. Семиков А. В. Расчет энергоэффективности электропривода электромобиля с применением ионисторов / Семиков А. В., Гончар А.С. // Зб. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2013. – С. 25–26.

Здобувачем синтезовано комп'ютерну модель та проведено на ній моделювання.

10. Семиков А. В. Сравнение структур тягового электропривода электромобиля / Семиков А. В., Никифорова В. О. // Зб. наук. праць. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2019. – С.84–88.

Здобувачем синтезовано комп'ютерну модель.

АНОТАЦІЇ

Семиков О. В. Енергоефективний електропривід електромобіля з суперконденсаторною батареєю. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Робота пов'язана із створенням лабораторного зразка електромобіля для учбових і наукових цілей на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» в НТУ «ХП» для підготовки кваліфікованих кадрів здатних вирішувати задачі діагностування, програмування, експлуатації і ремонту ЕП електромобілів, перехід до яких зменшує витрати вуглеводневих ресурсів і покращує екологічну обстановку в великих містах, та кількість яких значними темпами збіль-

шується в Україні. Проведено огляд по електромобілям ведучих зарубіжних фірм. Сформульовані принципи розробки ЕП електромобіля, розроблено функціональну та принципові схеми ЕП. Запропоновано використання в складі джерела енергії суперконденсаторної батареї. Запропоновані методики розрахунків компонентів ЕП. Розвинуто метод еквівалентування навантаження при виборі електродвигуна введенням питомих по масі сил та потужностей та масогабаритного коефіцієнту. Розроблені математична та комп'ютерна моделі тягової електромеханічної системи, що враховують: нелінійність сил опору внаслідок аеродинамічної складової, нелінійність сил зчеплення коліс з дорожнім покриттям, нелінійність характеристики намагнічування, широтно-імпульсну модуляцію, дискретність системи керування. Здійснено комп'ютерне моделювання електромеханічних, електромагнітних процесів в динамічних і статичних режимах для різних умов руху і встановлено відповідність характеру часових діаграм фізичній сутності процесів. Створено лабораторний стенд для експериментального дослідження роботи СКБ в рекуперативних режимах і обґрунтована доцільність її використання. Проведене комп'ютерне моделювання, аналіз результатів якого дозволив запропонувати нові принципи побудови багатофазного широтноімпульсного перетворювача, який забезпечує раціональний розподіл струмів між АБ та СКБ. Виконана оцінка енергоефективності запропонованих схем у різних стандартних циклах руху із урахуванням втрат в компонентах ЕП. Показано, що економія електроенергії в залежності від умов руху складає 13...24%. Досліджені аномальні режими роботи ЕП електромобіля при буксуванні коліс і показано, що легко вимірюваними величинами встановлення факта виникнення буксування при наявності імпульсного датчика швидкості на колесах можуть бути похідна тока якоря, прискорення колеса та його похідна. Розроблено і створено на базі автомобіля «Ланос» першій в Україні електромобіль з СКБ. Підтверджено роботоздатність розробленого ЕП.

Ключові слова: електропривід електромобіля, електромеханічна система, широтно-імпульсний перетворювач, рекуперація енергії, буксування, методи еквівалентування, суперконденсаторна батарея, коефіцієнт зчеплення.

Семиков А. В. Энергоэффективный электропривод электромобиля с суперконденсаторной батареей. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2021.

Работа связана с созданием энергоэффективного тягового электропривода электромобиля для перехода к ним от автомобилей с ДВС, что сокращает потребление углеводородных топливных энергоресурсов и улучшает экологию в городах. В связи со значительными темпами увеличения количества электромобилей в Украине возникает необходимость подготовки квалифицированных кадров по диагностике, программированию, эксплуатации и ремонту электромобилей. В НТУ «ХПИ» с 2011 года была начата такая подготовка и принято решение о создании на кафедре «Автоматизированные электромеханические

системы» лабораторного образца электромобиля для учебных и научных целей. Проведен обзор технических решений, типов электродвигателей и структур трансмиссий, применяемых в электромобилях ведущих зарубежных производителей, а также существующих типов накопителей электроэнергии, предполагаемых для применения в транспорте. Сформулированы принципы разработки ЭП электромобиля и технические решения с учетом целей и условий его создания. Предложено использование СКБ в дополнение к основному источнику — АБ. Обоснован выбор ЭП с ДПТ и компонентов принципиальной схемы. Предложены методики с введением массогабаритных коэффициентов расчетов мощности и произведения перегрузочной способности ЭД на его диапазон регулирования скорости во 2-й зоне, а также расчёта параметров СКБ из условия обеспечения приёма её возможной рекуперированной энергии. Усовершенствован метод эквивалентирования нагрузки при выборе ЭД на базе удельных по массе сил и мощностей, получены соответствующие расчётные зависимости для 7-и стандартных циклов движения. Разработаны математическая и компьютерная модели тяговой электромеханической системы, учитывающие: нелинейность сил сопротивления вследствие аэродинамической составляющей, нелинейность сил сцепления колес с дорожным покрытием, нелинейность характеристики намагничивания, широтно-импульсную модуляцию в силовых цепях, дискретность по времени и уровню системы управления. Осуществлено компьютерное моделирование электромеханических, электромагнитных процессов в динамических и статических режимах для различных условий движения. Подтверждены полученные расчётные зависимости и установлено соответствие характера временных диаграмм физической сущности процессов, свидетельствует об адекватности моделей. Создан лабораторный стенд для экспериментального исследования работы СКБ в рекуперативных режимах и сделан вывод о целесообразности её использования в источнике питания ЭП электромобиля. Проведено компьютерное моделирование, анализ результатов которого позволил предложить новые принципы построения многофазного широтноимпульсного преобразователя, который обеспечивает одновременный заряд-разряд с рациональным распределением токов. Выполнена оценка энергоэффективности предложенной схемы в различных стандартных циклах движения с учетом потерь в компонентах ЭП. Показано, что экономия электроэнергии в зависимости от условий движения составляет 13...24%. Исследованы аномальные режимы работы ЭП электромобиля при буксовании колес и показано, что легко измеряемыми величинами установления факта возникновения буксования могут быть производная тока якоря, ускорение колеса и его производная при наличии импульсного датчика скорости на колесах. Разработан и создан первой в Украине на базе автомобиля «Ланос» электромобиля с СКБ. Подтверждено работоспособность разработке принципиальной схемы ЭП и экономия электроэнергии в рекуперативных режимах с СКБ.

Ключевые слова: электропривод электромобиля, электромеханическая система, широтно-импульсный преобразователь, рекуперация энергии, буксование, методы эквивалентирования, суперконденсаторная батарея, коэффициент сцепления.

Semikov O. V. Energy efficient electric vehicle electric drive with supercapacitor battery. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences at the specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems” – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The work is related to the creation of a laboratory model of an electric vehicle for educational and scientific purposes at the Department “Automated Electromechanical Systems” at NTU “KhPI”. This is necessary for the training of qualified personnel capable for solving problems of diagnosing, programming, operation and repair of electric vehicles. The transition to them reduces the cost of hydrocarbon resources and improves the environmental situation in large cities. Also, their number is growing rapidly in Ukraine. A survey of electric vehicles of leading foreign companies was conducted. The principles of electric vehicles electric drive development are formulated; the functional and basic schemes of electric drive are designed. The use of a supercapacitor battery as a power source is proposed. Methods of electric drive components calculation are offered. The method of load equivalence at the choice of the electric motor by introduction of specific on weight of forces and capacities and mass-dimensional factor is developed. Mathematical and computer models of traction electromechanical system are developed, taking into account: nonlinearity of resistance forces due to aerodynamic component, nonlinearity of wheels coupling forces with a road surface, nonlinearity of magnetization characteristics, pulse width modulation, discreteness of control system. Computer modeling of electromechanical and electromagnetic processes in dynamic and static modes for different conditions of movement is carried out and correspondence of time diagrams character to physical essence of processes is established. The laboratory stand for experimental research of supercapacitors in regenerative modes is designed and expediency of its use is proved. Computer simulation was carried out, the analysis of the results allowed to propose new principles of multiphase pulse-width converter design, which provides a rational distribution of currents between the accumulator battery and supercapacitors. The estimation of energy efficiency of the proposed schemes in various standard cycles of movement taking into account losses in electric drive components is executed. It is shown that the electricity saving is 13...24 % depending on traffic conditions. The anomalous modes of the electric vehicle electric drive operation during wheel slipping are investigated and it is shown that easily measured values of slipping occurrence establishing at the presence of a pulse speed sensor on wheels can be derived armature current, wheel acceleration and its derivative. The first in Ukraine electric vehicle with supercapacitors was developed and created on the basis of “Lanos” car. The operability of the developed electric drive is confirmed.

Keywords: electric vehicle electric drive, electromechanical system, pulse-width converter, energy recuperation, slipping, equivalent methods, supercapacitor battery, adhesion coefficient.



Відповідальний за випуск
д.т.н., проф. вчений секретар НТУ «ХП»
Заковоротний О. Ю.

Підписано до друку 25 березня 2021 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 21040201
Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М. В., свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354