

РОЗРОБКА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З АВТОНОМНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ

А.К. Шидловський¹, акад. НАН України, **В.Б. Павлов²**, докт. техн. наук, **О.В. Попов³**, канд. техн. наук, **В.Є. Павленко⁴**, мол. наук. співроб., **М.В. Третяк⁵**, мол. наук. співроб.
1–5 – Ін-т електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Представлено результати експериментальних досліджень силових напівпровідникових перетворювачів систем керування та іншого електроустаткування (що були створені на основі попередніх теоретичних досліджень) для систем електроживлення транспортних засобів з автономними джерелами живлення, а також результати ходових випробувань електромобіля ЗАЗ-1109 в умовах руху по міському циклу SAE 227 j (A, B, C, D).

Бібл. 9, рис. 19, табл. 7.

Ключові слова: напівпровідникові перетворювачі, системи керування, електроживлення, транспортні засоби, електромобіль.

Один з основних наукових напрямків діяльності Інституту електродинаміки НАН України – дослідження, спрямовані на підвищення ефективності використання електричної енергії в транспортних системах з автономними електрохімічними джерелами живлення (в електромобілях, електроциклах, електровізках і т.п.) [1].

Враховуючи той факт, що енергія електрохімічних джерел досить дорога і на транспортному засобі досить обмежена, питання її ощадливої витрати, при забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик, є актуальним. Позитивний результат досягається декількома способами, основними з яких є застосування електроустаткування (електродвигунів і напівпровідникових перетворювачів) з високим ККД і організація керування цими пристроями на основі оптимальної електромагнітної сумісності та оптимального ККД системи електроживлення в цілому при різних навантажувальних режимах транспортного засобу [2, 3].

Раніше за цим напрямком проводилися теоретичні розробки методів аналізу ефективності різних систем енергоживлення, методів визначення комплексного ККД системи в цілому, способів ефективного управління напівпровідниковими перетворювачами і транспортними засобами.

На основі результатів теоретичних досліджень, проведених на попередніх етапах роботи, було розроблено структурні та принципіві схеми як компонентів електроустаткування, так і системи електроживлення електромобіля (ЕМ) у цілому. Структурна схема всього електроустаткування, що включає як основні, так і допоміжні компоненти, представлена на рис. 1. Вона складається з таких частин [4]: тягової акумуляторної батареї (ТАБ); силового напівпровідникового перетворювача (СНП); тягового двигуна постійного струму з незалежним збудженням (ТЕД); системи управління перетворювачем (СУ); бортового зарядного пристрою для ТАБ (БЗП); реверсивного лічильника ампер-годин (ЛАГ); вторинного джерела живлення для бортових потреб ЕМ (ВДЖ); бортової акумуляторної батареї (АБ).

Силовий напівпровідниковий перетворювач разом із системою управління служить для плавного збільшення швидкості обертання тягового електродвигуна від нуля до максимального її значення відповідно до необхідного алгоритму руху

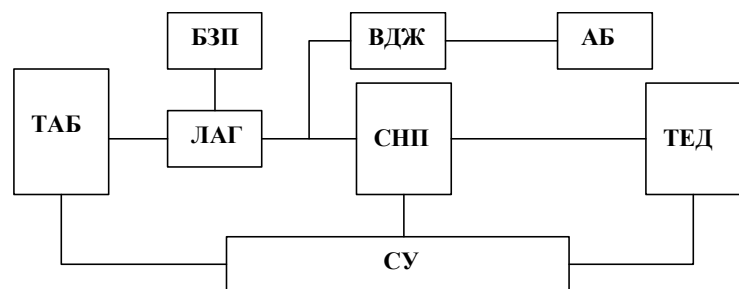


Рис. 1

в режимі тяги, а також для зниження цієї швидкості, аж до «повзучої» швидкості руху ЕМ, у режимі рекуперативного гальмування. Крім того, при рекуперації двигун переводиться в генераторний режим і відбувається повернення енергії в тягову акумуляторну батарею [5, 6].

У різних режимах руху система управління забезпечує всі необхідні функції захисних блокувань, контролю та індикації.

Бортовий зарядний пристрій дає змогу проводити заряд ТАБ під час стоянки від стандартної побутової мережі 220 В, 50 Гц.

Реверсивний лічильник ампер-годин дає змогу провести облік зміни ємності ТАБ у всіх режимах її роботи: розряду в режимі тяги, підзаряду в режимі рекуперативного гальмування та заряду за допомогою бортового зарядного пристрою.

Вторинне джерело живлення служить для підзаряду допоміжної акумуляторної батареї, що забезпечує бортові потреби ЕМ, такі як робота освітлювальних приладів, звукового сигналу, різних виконавчих електромеханічних пристроїв і т.п.

Проведення експериментальних досліджень силових і допоміжних компонентів бортового електроустаткування електромобіля. Для проведення експериментальних досліджень було зроблено макетування всіх компонентів системи електроживлення електромобіля, а також зарядного пристрою й реверсивного лічильника ампер-годин. Експерименти проводилися на лабораторному стенді (рис. 2). На всіх макетах компонентів електроустаткування були виведені контрольні точки для вимірювань і осцилографування. При цьому використовувався аналогово-цифровий осцилограф НМ – 1507.

Мета експериментальних досліджень – перевірка функціонування всіх елементів системи електроживлення ЕМ і визначення зон безпечної роботи силових ключів тяги, рекуперації й обмотки збудження [7, 8].

На рис. 3 показана зміна вихідного сигналу вузла задання інтенсивності тяги (для гальмування аналогічно) при натисканні на педаль акселератора (гальма). Після проведення вимірювань було проведено коректування величини опорів змінних резисторів на каналах

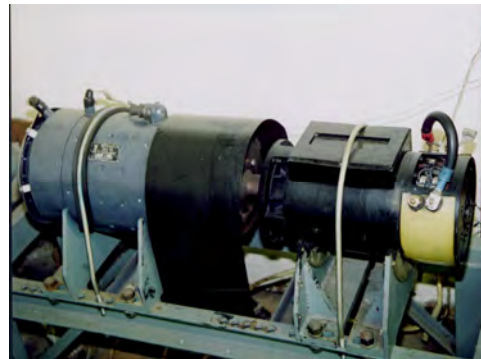


Рис. 2

CH1:5V/DIV, CH2:5V/DIV, ТВ:

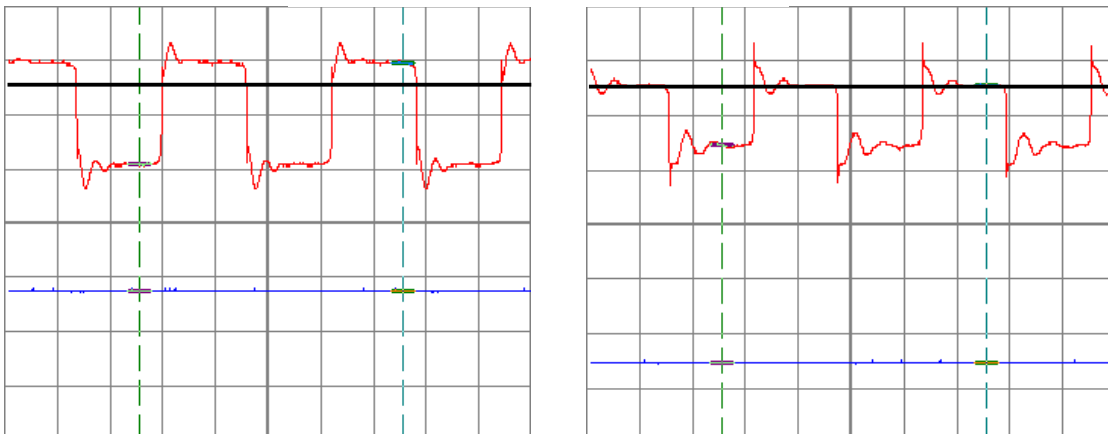


Рис. 3

тяги і рекуперативного гальмування для збільшення діапазонів зміни вихідних сигналів вузлів задання. Це було необхідно для забезпечення можливості зміни коефіцієнта заповнення широтно-імпульсного сигналу від нуля до одиниці. На рис. 4 наведено осцилограми, що ілюструють зміну вихідного сигналу ШІМ при зміні сигналу вузла задання інтенсивності.

CH1:5V/DIV, CH2:5V/DIV, TB:

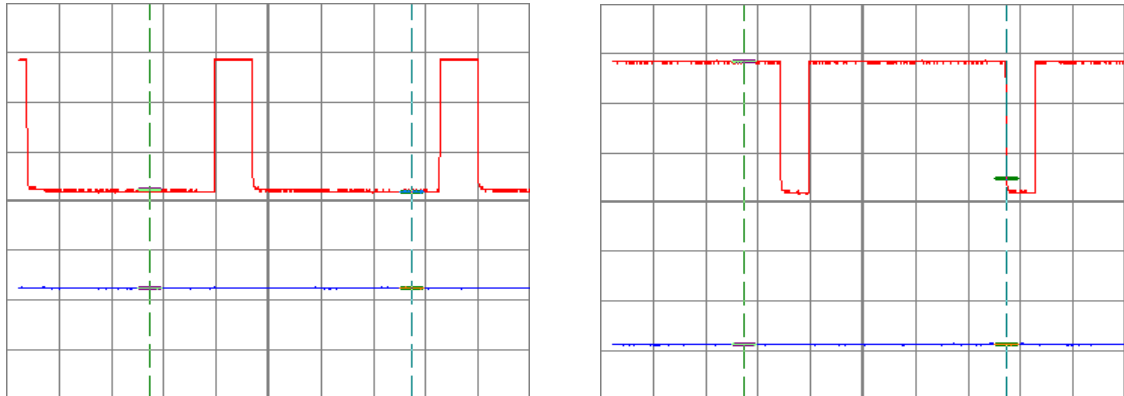


Рис. 4

Особлива увага була приділена схемі перетворення синусоїдального сигналу тахогенератора тягового електродвигуна в плавномінливу за величиною постійну напругу. На рис. 5 показана зміна рівня вихідного сигналу цієї схеми при збільшенні частоти обертання вала двигуна. Таке перетворення сигналу тахогенератора спричинено необхідністю реалізації способу регулювання з позитивним зворотним зв'язком за швидкістю.

Для перевірки працеспроможності силових ключів кіл якоря й обмотки збудження вони були підключені до активного навантаження й на їх затвори були подані тестові сигнали від генератора прямокутних імпульсів. Після цього до керуючих переходів силових ключів був підключений блок формування вихідних імпульсів. На рис. 6 показано осцилограми, що підтверджують відповідність сигналів на виході керуючих драйверів і струмів, а також напруг силових ключів. На цьому рисунку показано сигнали на затворі транзистора кола обмотки збудження і струм стоку й напруга «стік – витік» цього транзистора. На рис. 7 зображено сигнали на затворі силового ключа якоря для режиму тяги і його напруга «стік – витік» для різних значень коефіцієнта заповнення імпульсного циклу.

На даному етапі роботи проведені дослідження, що підтверджують результати теоретичних розрахунків про необхідність введення додаткової індуктивності в коло якоря тягово-

CH1:5V/DIV, CH2:2V/DIV, TB: 1 ms

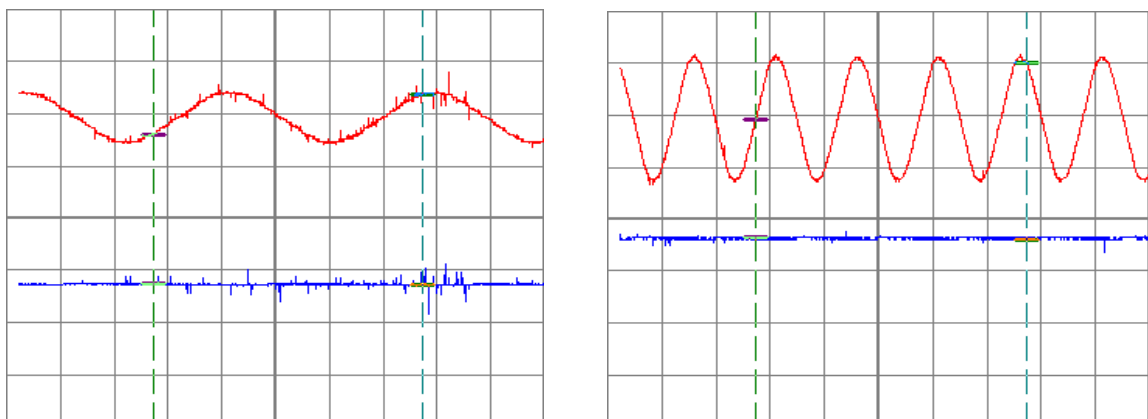


Рис. 5

го електродвигуна. З рис. 8 і 9 видно, що пульсації струму якоря без додаткової індуктивності (рис. 8) значно вищі, ніж у випадку підключення дроселя (рис. 9). У першому випадку

CH1:0.5V/DIV. CH2:10V/DIV. TB: 50 μ s

CH1:50V/DIV. CH2:10V/DIV. TB: 50 μ s

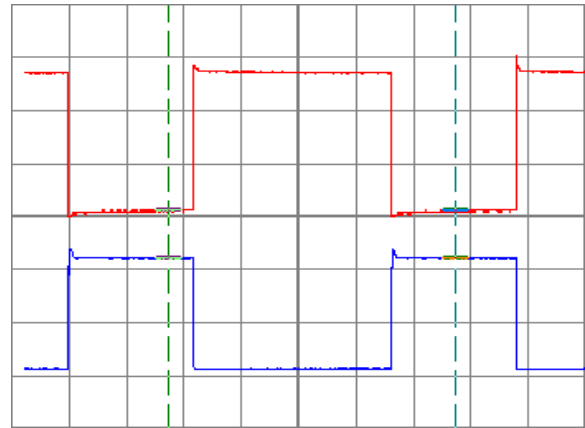
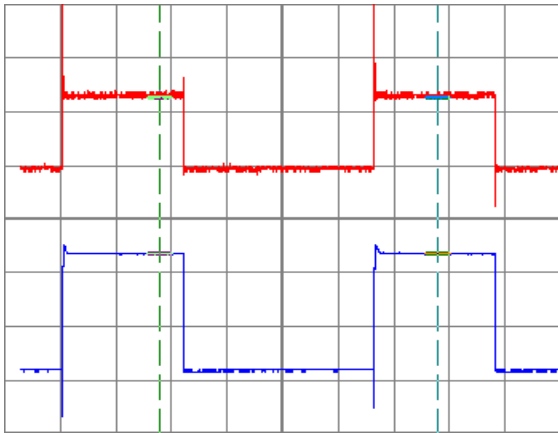


Рис. 6

CH1:50V/DIV, CH2:10V/DIV, TB: 20 μ s

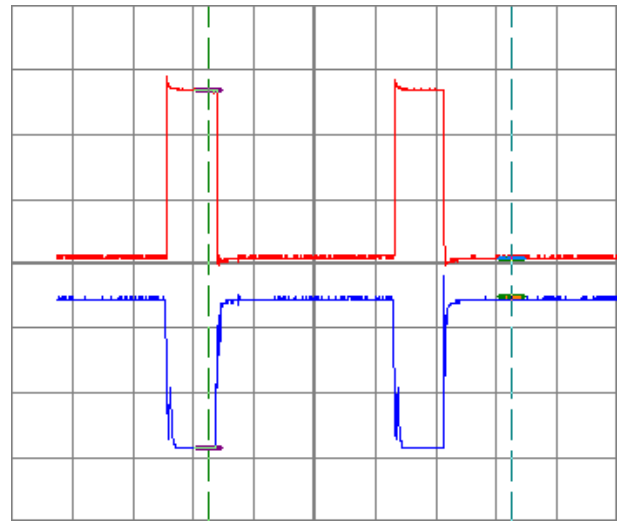
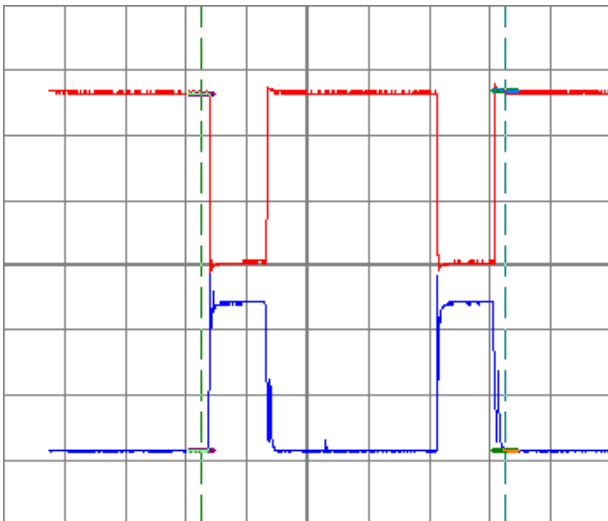


Рис. 7

CH1:0,5V/DIV, TB: 20 μ s

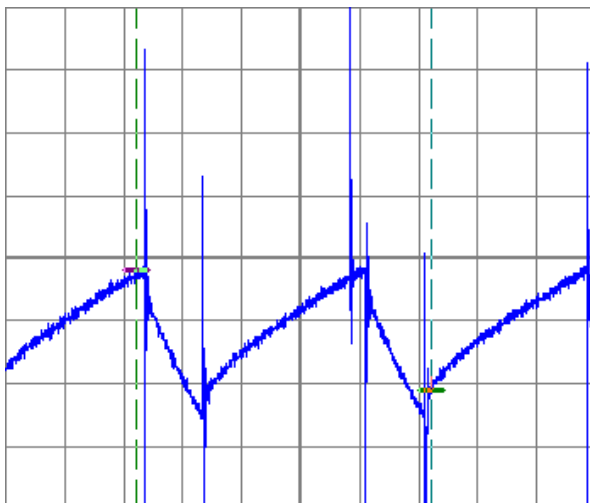


Рис. 8

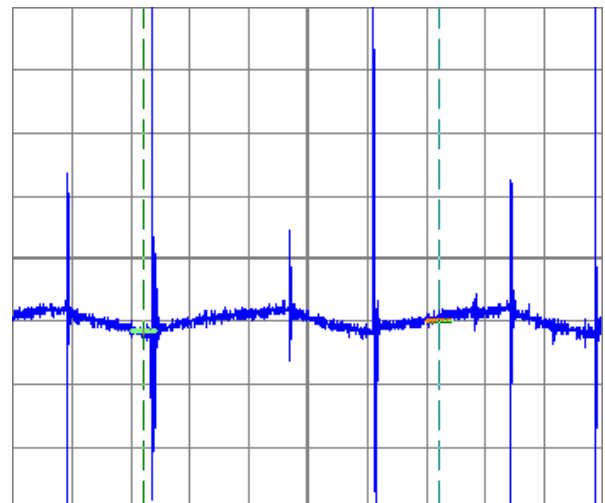


Рис. 9

навіть можливе виникнення режиму переривчастих струмів якоря, який призводить до погіршення енергетичних показників силового перетворювача.

Для підтвердження відсутності аварійних перенапруг і викидів струму силових ключів проведено осцилографування відповідних сигналів. Приклади форм струму стоку й напруги «стік – витік» ключів якірного кола та кола обмотки збудження наведені на рис. 10 і 11 відповідно.

Крім перерахованих вище дій проведені необхідні регулювання й настроювання всіх елементів вузла блокувань, контролю й індикації.

Метою експериментальних досліджень макетного зразка зарядного пристрою була перевірка його компонентів на відповідність технічним вимогам. Експериментальні дослідження реверсивного лічильника ампер-годин були спрямовані на перевірку виконання пристроєм усіх необхідних функцій, закладених при розробці. Перевірка функціонування підтвердила, що лічильник одночасно робить вимірювання трьох фізичних величин: напруги на ТАБ; струму заряду або розряду; поточного часу за умови наявності інформації про струм заряду або розряду.

Індикація величини вимірюваного параметра відбувається тільки при виборі відповідного режиму й відображається на панелі індикації в такий спосіб: вимірювана напруга – "НАП"; час заряду/розряду – "ГОДИНА"; ємність АБ у режимі "ЗАРЯД" – "АЧЗ"; ємність у режимі "ЕКСПЛУАТАЦІЯ" – "АЧР"; струм у режимі "ЗАРЯД" – "АЗ"; струм у режимі "ЕКСПЛУАТАЦІЯ" – "АРЕ".

При досягненні нижнього критичного рівня або верхнього граничного значення напруги на клеммах АБ, незалежно від режиму роботи, на індикаторі може з'явитися напис "SOS".

Попередження докритичного рівня напруги АБ здійснюється світлодіодними індикаторами (червоний, зелений). Індикація вимірюваного струму (ємності) у режимі "ЗАРЯД" відбувається шляхом прямого розрахунку.

При вимірюванні струму (ємності) у режимі "ЕКСПЛУАТАЦІЯ" можливі три режими: режим заряду ТАБ, режим споживання й режим рекуперативного гальмування. Повністю зарядженій ТАБ на панелі індикації відповідають три нулі. При переході в режим споживання (розряду) починається підрахунок ємності, що відбирається, в ампер-годинах. Для цього тричі за секунду вимірюється поточне значення струму розряду і раз за секунду на панель індикації виводиться загальне значення ємності, відібраної від ТАБ з початку розряду. У режимі рекуперативного гальмування відбувається обчислення значення ємності, що повертається, із загальної ємності ТАБ, тобто лічильник постійно показує поточне значення неском-

CH1:50V/DIV, CH2:0,5 V/DIV, TB: 20 μ S

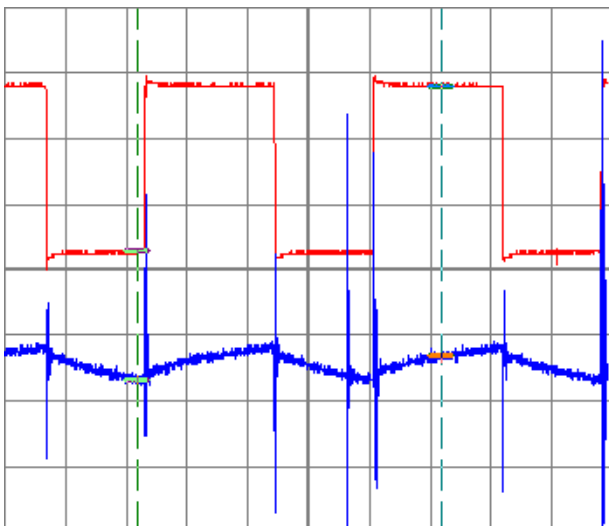


Рис. 10

CH1:50V/DIV, CH2:0,5V/DIV, TB: 50 μ S

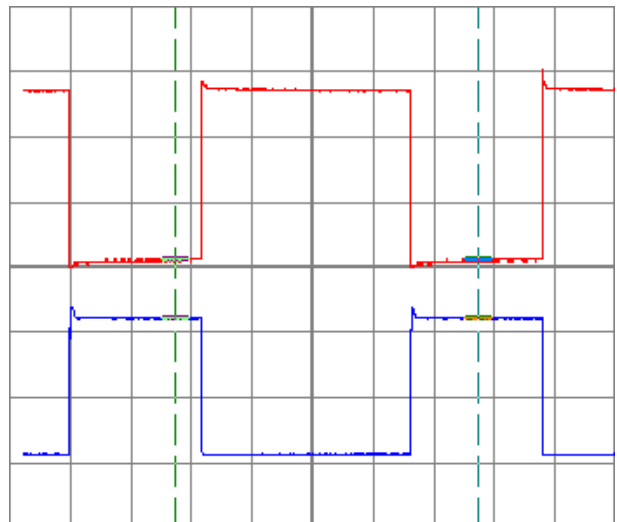


Рис. 11

пенсованої (відібраної) ємності АБ.

У режимі "ЗАРЯД" відбувається обчислення значення, що повертається, ємності із загального значення ємності, відібраної від ТАБ у процесі експлуатації.

При досягненні величини, що повертається, ємності до показань 000 на панелі індикації, яка відповідає стану повністю зарядженої ТАБ, з'являється напис "OFF" [9].

У подальшому було проведено роботи з виготовлення всіх компонентів електроустаткування електромобіля: силового напівпровідникового перетворювача (рис. 12); системи управління перетворювачем (рис. 13); бортового зарядного пристрою для АБ (рис. 14); реверсивного лічильника ампер-годин (рис. 15).

Таким чином, було виготовлено два екземпляри силових і допоміжних компонентів електроустаткування ЕМ і проведено їх налагодження для виконання стендових випробувань згідно з планом робіт наступного етапу. Конструкційні елементи були використані при монтажі устаткування на електромобіль.

Хід випробувань. Випробування електромобіля проводилися в умовах міського циклу руху на дорогах загального користування й на спеціальних ділянках (2...3 км прямої дороги й підйоми до 18 % довжиною 0,5...0,8 км).

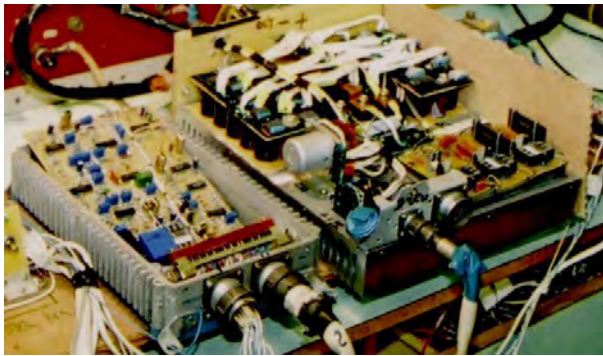


Рис. 12



Рис. 13

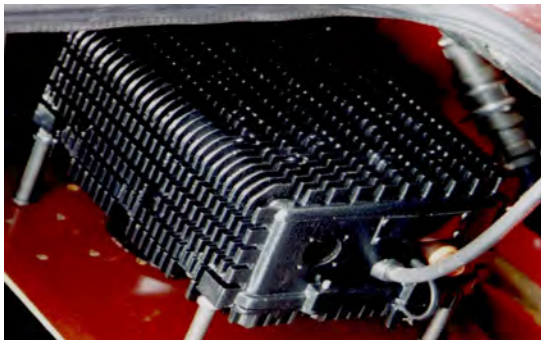


Рис. 14



Рис. 15

Кількість випробувань по кожному пункту – не менше трьох. Потім визначалося середнє значення й заносилося до таблиці.

При значній розбіжності показників кількість випробувань збільшувалася до десяти.

Аналіз результатів лабораторно-дорожніх випробувань представлено у вигляді табл. 1–7.

- Розгін з нульової початкової швидкості

Таблиця 1

№ передачі	V , км/год	t , с	I_{AB} , А	U_{AB} , В
1	30	3,8	150	115
2	60	24	150	115
3	90	51	150	115

- Форсований розгін з перемиканням передач

Таблиця 2

V_{\max} , км/год	t , с	I , А	U , В
30	3,8	150	115
60	18	150	115
90	30	150	115

- Зняття тягових характеристик при подоланні підйому 18 %
Підйом з фіксованої швидкості зі зворотним перемиканням передач

Таблиця 3

$V_{\text{поч}}$, км/год	$V_{\text{кінц}}$, км/год	t , с	I_{AB} , А	U_{AB} , В
30	30	60	150	115
50	38	40	150	115
70	60	27	150	115
90	84	20	150	115

Визначення гальмових характеристик електромобіля

Таблиця 4

$V_{\text{поч}}$, км/год	$L_{\text{гальм}}$, м	$I_{\text{рекуп}}$, А	$U_{AB\text{кінц}}$, В
30	15	70 - 0	120 - 128
60	21	70 - 0	120 - 133
90	35	70 - 0	120 - 135

Оцінка витрати енергії

- При рівномірному прямолінійному русі

Таблиця 5

V , км/год	I_{AB} , А	U_{AB} , В	Q , кВт-год/км
20	15	120	0,045
40	35	120	0,1
60	80	115	0,153
90	150	110	0,2

- При русі за міськими циклами SAE j 227

Таблиця 6

№ циклу	V_{\max} , км/год	$U_{\text{ср}}$, В	Q , кВт-год/км
A	16	120	0,096
B	32	120	0,14
C	48	117	0,176
D	72	114	0,25

Вимірювання температури елементів електроустаткування проходили разом з тяговими й швидкісними випробуваннями.

Таблиця 7

Найменування точки вимірювання	C	D	Підйом	$T_{\text{окр}}$
	$T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}\text{C}$
Щітки тягового електродвигуна	115	130	135	20
Корпус тягового електродвигуна	52	61	65	20
Силовий модуль GBT	80	83	87	20
Відсік AB (передній)	27	27	29	20
Відсік AB (задній)	30	32	33	20

Тепловий режим роботи зарядного пристрою в складі електроустаткування електромобіля відповідає режимам стендових випробувань.

Висновки та рекомендації. На підставі проведених випробувань електромобіля ЗАЗ-1109 відповідно до розробленої в рамках проекту «Методики лабораторно-дорожніх випробувань електромобіля ЗАЗ-1109» слід зазначити, що ЕМ в основному відповідає технічним вимогам, пропонуваним для транспортних засобів такого класу.

Під час перевірки функціонування системи тягового електроприводу, бортового зарядного пристрою й реверсивного лічильника ампер-годин збоїв у роботі та відмов не спостерігалось.

Швидкісні властивості електромобіля відповідають вимогам технічного завдання.

Час розгону до швидкості 30 км/год становить 3,8 с, до швидкості 60 км/год – 18 с. Максимальна швидкість ЕМ – 90 км/год.

Економічність використання енергії ЕМ перебуває в межах розрахункових значень. Витрата енергії для подолання відстані в 100 км на прямолінійній ділянці дороги й швидкості 40 км/год становить 10 кВт· год.

Запас ходу ЕМ (у якості ТАБ використовувалася свинцево-кислотна акумуляторна батарея TROJAN 20-30H-31XHS-105 А-г (5 г)) склав:

- при швидкості 40 км/год – 95 км;
- при швидкості 60 км/год – 72 км;
- при швидкості 90 км/год – 54 км;
- при русі по циклу SAE j 227 – 65 км.

Слід зазначити, що запас ходу ЕМ відповідає розрахунковим параметрам для цієї ТАБ, проте він може бути значно вищим, ніж при використанні літєвої ТАБ ємністю 300 А·год.

Максимальний кут підйому, подоланий ЕМ, становить 18 %.

Ефективність робочої й стоянкової гальмових систем відповідає нормативним вимогам ОСТ 37.001.016 – 98. Гальмівний шлях зі швидкості 90 км/год становить 35 м.

Ступінь нагрівання елементів електроустаткування ЕМ відповідає припустимим межам.

Таким чином, за результатами лабораторно-дорожніх випробувань можна зробити висновок про те, що технічні характеристики тягового й допоміжного електроустаткування електромобіля ЗАЗ-1109 задовольняють вимогам відповідного технічного завдання. Розроблена система привода може служити базовою при створенні пасажирських і вантажопасажирських електромобілів повною масою від 1,5 до 2,5 т. Для додаткового набору даних доцільно провести експлуатаційні випробування дослідної партії ЕМ у реальних міських умовах.

Розроблені компоненти електрообладнання були встановлені та випробувані на дослідних зразках декількох типів електротранспорту. На рис. 16, 17 показано електромобілі, на рис. 18, 19 – електроцикли (вантажний та пасажирський відповідно).



Рис. 16



Рис. 17



Рис. 18

1. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с.
2. Павлов В.Б., Бойко П.С., Попов А.В., Павленко В.Е. Источники питания собственных потребителей электротранспортных средств передвижения с тяговой аккумуляторной батареей // Техн. электродинамика. Темат. вип. “Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч. 2. – С. 116–118.
3. Павлов В.Б., Бойко П.С., Тугаенко Ю.П., Павленко В.Е., Попов А.В. Универсальное устройство контроля параметров тяговой аккумуляторной батареи автономного транспортного средства // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2006. – № 2(14). – С. 183–186.



Рис. 19

4. Павлов В.Б., Пазеев А.Г., Жаркин А.Ф., Попов А.В., Павленко В.Е. Повышение энергоэффективности и электромагнитной совместимости автономных источников электропитания // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2008. – Вип. 21. – С. 102–104.
5. Шидловський А.К., Павлов В.Б. Энергоэкономия і силовая електроніка в електроенергетиці // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч. 1. – С. 3–8.
6. Шидловський А.К., Павлов В.Б., Кудря С.А., Пенелов А.В. Экологически чистый транспорт для Украины // Відновлювана енергетика ХХІ століття: Мат. VII Міжнар. конф. – 2006. – С. 26–31.
7. Шидловський А.К., Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Е. Суперконденсаторы в системах электропитания электромобилей // Техн. електродинаміка. Темат. вип. “Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2010. – Ч. 1. – С. 48–51.
8. Шидловський А.К., Павлов В.Б., Скиданов В.М. Концептуальный подход к развитию теории и практики электромобилей в Украине // Тр. 1-й Междунар. науч.-техн. конф. по литиевым аккумуляторам “INTERBAT”. – Киев, декабрь 1997. – С. 25.
9. Pavlov V.B., Popov A.V., Gladyshev S.P. Hybrid Power Supplies of Electro-Mobiles // SAE 2007 World Congress. – April 16-19. – Detroit, MI, USA. – S. 456–464.

УДК 621.314

А.К. Шидловский¹, акад. НАН Украины, В.Б. Павлов², докт. техн. наук, А.В. Попов³ канд. техн. наук, В.Е. Павленко⁴, мл. науч. сотр., М.В. Третьяк⁵, мл. науч. сотр.

1–5 – Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Разработка полупроводниковых компонентов электрооборудования систем электропитания транспортных средств с автономными источниками питания

Представлены результаты экспериментальных исследований силовых полупроводниковых преобразователей систем управления и другого электрооборудования (создаваемых на основе предыдущих теоретических исследований) для систем электропитания транспортных средств с автономными источниками питания, а также результаты ходовых испытаний электромобиля ЗАЗ-1109 в условиях движения по городскому циклу SAE 227 j (A, B, C, D). Библ. 9, рис. 19, табл. 7.

Ключевые слова: полупроводниковые преобразователи, системы управления, электропитание, транспортные средства, электромобиль.

A.K. Shydlovskiy¹, V.B. Pavlov², O.V. Popov³, V.E. Pavlenko⁴, M.V. Tretyak⁵

1–5 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Development of semi-conductor components of an electric equipment of systems of the power supplies of vehicles with independent power supplies

Presents results of experimental studies of power semiconductor transducer control systems and other electrical equipment (produced on the basis of previous theoretical studies) for power supply systems of vehicles with autonomous power supply, and the results of running tests of electric ZAZ-1109 in traffic on urban cycle SAE 227 j (A, B, C, D). References 9, figures 19, tables 7.

Key words: semi-conductor converters, control systems, power supplies, vehicles, electric car.

Надійшла 4.01.2012

Received 4.01.2012