

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЕРА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ

А.Ф. Жаркін*, академік НАН України, **В.Б. Павлов****, докт.техн.наук,
В.В. Гребеніков***, докт.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: zhark@ied.org.ua; mobil99@ukr.net; elm1153@gmail.com

В роботі розглянуто контролер управління тяговими електродвигунами на постійних магнітах для транспортних засобів, в якому силовий транзисторний перетворювач виконано на модифікованих IGBT модулях з поліпшеними характеристиками. Використання зазначених модулів, що сьогодні широко застосовуються у напівпровідникових пристроях сучасної техніки подвійного призначення, дає змогу зменшити габарити та масу перетворювача, спростити систему охолодження, підвищити ККД і надійність роботи напівпровідникового перетворювача та електроприводу в цілому з огляду на жорсткі умови їхньої експлуатації. Викотвлено та проведено стендові випробування експериментального зразка напівпровідникового перетворювача і мікропроцесорної системи регулювання у різних режимах роботи, в тому числі за максимального навантаження, що відповідає реальним умовам експлуатації. За результатами проведених випробувань визначено, що технічні характеристики контролера задовольняють вимогам подібних пристроїв. Створений напівпровідниковий контролер на IGBT модифікованих модулях може бути використано для управління двигунами на постійних магнітах та мотор-колесами номінальною потужністю 40-50 кВт, максимальною – 100 кВт. Бібл. 11, рис. 8, табл. 4.

Ключові слова: контролер, транзисторний модуль, електропривод, електродвигун на постійних магнітах.

Вступ. Останнім десятиріччям створення електричних і гібридних транспортних засобів як легкових, так і великої вантажопідйомності, та широке їхнє впровадження у світі набуває все більших обсягів, що свідчить об актуальності вказаного напрямку та потребує відповідного розвитку наукових досліджень. Поряд з розробкою нових первинних джерел енергії (акумуляторних батарей, суперконденсаторів та електрохімічних генераторів) світові виробники велику увагу приділяють підвищенню ефективності всієї системи енергоживлення, включаючи не тільки бортове джерело енергії, але й електротрансмісію та низку допоміжних пристроїв, в яких широко застосовуються напівпровідникові перетворювачі [1-4].

За останні кілька років у розробці пристроїв силової електроніки намітилася чітка тенденція поширеного застосування напівпровідникових матеріалів, які мають високі енергетичні та теплові характеристики. Унікальні властивості цих матеріалів, що мають високу теплопровідність, значні рівні навантажувального струму тощо, забезпечують відповідну можливість створення на їхній основі приладів з поліпшеними енергетичними показниками. В результаті пристрої на основі транзисторних модулів IGBT з такими енергетичними показниками дають змогу радикально зменшити габарити та масу перетворювального устаткування, а також збільшити ефективність роботи за рахунок більш високих частот перетворення. На характеристики таких приладів слабо впливають зміни температури навколишнього середовища внаслідок більш високої температури транзисторного переходу, що забезпечує їчно довготривалу надійність з огляду на жорсткі умови експлуатації. Слід зазначити, що саме під час розробки силових контролерів для спеціальної техніки особлива увага приділяється питанням мінімізації їхньої маси та габаритів. Це, зокрема, зумовлено необхідністю установки на багатокілісних великовантажних машинах кількох електродвигунів або мотор-колів з індивідуальними контролерами, що дає змогу покращити мобільність та керованість транспортного засобу.

Актуальність роботи полягає в тому, що в даний час в Україні немає таких розробок, а вітчизняна промисловість не випускає напівпровідникові перетворювачі для керування електродвигунами на постійних магнітах потужністю 50-100 кВт. Застосування системи керування електродвигунами на постійних магнітах і мотор-колесами, зокрема, в гібридних системах енергоживлення з електромеханічною трансмісією забезпечує не тільки підвищені технічні характеристики, високу надійність і живу-

© Жаркін А.Ф., Павлов В.Б., Гребеніков В.В., 2022
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901> ; ** <https://orcid.org/0000-0003-0565-265X> ;
*** <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>

чість, збільшення запасу ходу, але і можливість руху без теплового випромінювання та шуму, що є важливим для транспортних засобів подвійного призначення [5, 6].

Метою роботи є експериментальні дослідження контролера для керування електродвигуном на постійних магнітах середньою потужністю до 100 кВт, а також порівняння його характеристик і масо-габаритних показників з контролерами відомих виробників [7-11].

Створення експериментального зразку складалося з декількох етапів:

- створення силової частини контролера;
- створення системи мікропроцесорного управління;
- розробка програмного забезпечення;
- створення блоків контролю, блокування та індикації;
- створення пульта управління.

На рис. 1 показано функціональну схему системи управління (контролера) вентильним 3-х фазним двигуном на постійних магнітах, статорні обмотки якого з'єднано трикутником. Система складається з трифазного інвертора, вхідного фільтра, драйверів на кожен транзистор, мікропроцесорної системи управління.

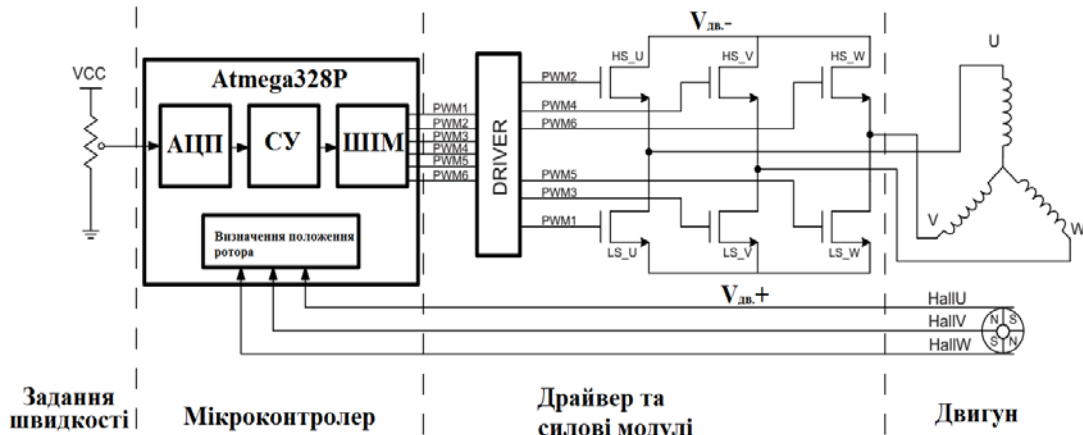


Рис. 1

Основну увагу у цій статті приділено випробуванням силової частини контролера. Розробка інших компонентів системи буде розглядатися у подальших публікаціях. Для вибору параметрів силового модуля було розглянуто максимальний навантажувальний режим тягового електродвигуна під час руху транспортного засобу на ухил 15%. При цьому потужність двигуна протягом трьох хвилин може досягати 100 кВт. В результаті за напруги тягової акумуляторної батареї 400 В максимальний струм навантаження буде складати 250 А. Виходячи з цього, було обрано трифазний модуль IGBT з рідинним охолодженням фірми Infineon, основні параметри якого наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Параметр	Умови вимірювання	Позн.	Значення		
Напруга колектор-емітер	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	705		
Безперервний постійний струм колектора	$T_F = 75^{\circ}\text{C}, T_{vj\text{ max}} = 175^{\circ}\text{C}$	$I_{C\text{ nom}}$	400		
	$T_F = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\text{ max}} = 175^{\circ}\text{C}$	I_C	500		
Піковий струм колектора, що повторюється	$t_p = 1\text{ ms}$	I_{CRM}	800		
Загальна «потужність розсіювання»	$T_F = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\text{ max}} = 175^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	811		
Максимальна напруга затвор-емітер	-	V_{GES}	+20		
Напруга насичення колектор-емітер	$I_C=400\text{A}, V_{GE}=15\text{V}$ $I_C=400\text{A}, V_{GE}=15\text{V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	min.	typ.	max
			-	1.45 1.7	1.70
Напруга затвор-емітер	$I_C = 6.40\text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{GEth}	4.90	5.80	6.50



Рис. 2

Транзисторний IGBT модуль FS400R07A3E3_H6 фірми Infineon серії HybridPACK DC6 зі стрічковими охолоджуючими структурами є силовим модулем зі збільшеною здатністю навантаження постійним струмом і зменшеною паразитною індуктивністю. Розроблений для робочої температури кристалу 150°C (з 30-хвилинним обмеженням інтервалом роботи з температурою 175°C), модуль має трифазну конфігурацію Six Pack, що складається з шести транзисторів IGBT3 Trench-Field-Stop, шунтованих зворотними діодами. Серія модулів HybridPACK DC6 має стрічковий тип охолоджуючої поверхні, що здійснює пряме рідинне охолодження задля зменшення теплового опору кристал-довкілля [7].

За результатами проведеного аналізу характеристик радіаторів, що випускаються серійно, та виходячи з вимог, передбачуваних навантажувальних режимів і загальної компоновки комплектуючих елементів контролера, було зроблено висновок щодо необхідності розробки спеціального радіатора з рідинним охолодженням з урахування розмірів модуля IGBT HybridPACKMDC6, який використовують у контролері. Зважаючи на це, було спроектовано та виготовлено радіатор власної конструкції. Загальний вигляд запропонованого охолоджуючого радіатора, розміри якого $300 \times 260 \times 25$, показано на рис. 2.

Проведення експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження, випробування та осцилографування електромагнітних процесів, а також налаштування режимів роботи електрообладнання, функціональну схему підключення якого наведено на рис. 3, проводилися на випробувальному стенді.



Рис. 3

До складу стенду входить силове (тяговий електродвигун на постійних магнітах і навантажувальний генератор) та вимірювальне (осцилографи, вольтметри, амперметри і стработонометр) обладнання. Основні параметри стендового обладнання: потужність приводного електродвигуна (генератора) 45 кВт; напруга та енергоємність тягової акумуляторної батареї $U = 400\text{ В}$, $Q = 24\text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Зовнішній вигляд системи регулювання (контролера) показано на рис. 4.

Параметри контролера:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| – напруга живлення, максимальне значення | 400 В |
| – максимальний піковий струм | 300 А |
| – частота імпульсів | 12 кГц |
| – номінальна потужність | 50 кВт |
| – максимальна потужність | 100 кВт |
| – вага | 7,9 кг |
| – розміри $h \times w \times d$ | $300 \times 260 \times 100\text{ мм}$ |

Метою експериментальних досліджень (на першому етапі) була перевірка функціонування всіх елементів системи, визначення зон безпечної роботи силових ключів і (на другому етапі) визначення рівня нагріву силового транзисторного блоку в залежності від різних навантажувальних режимів.

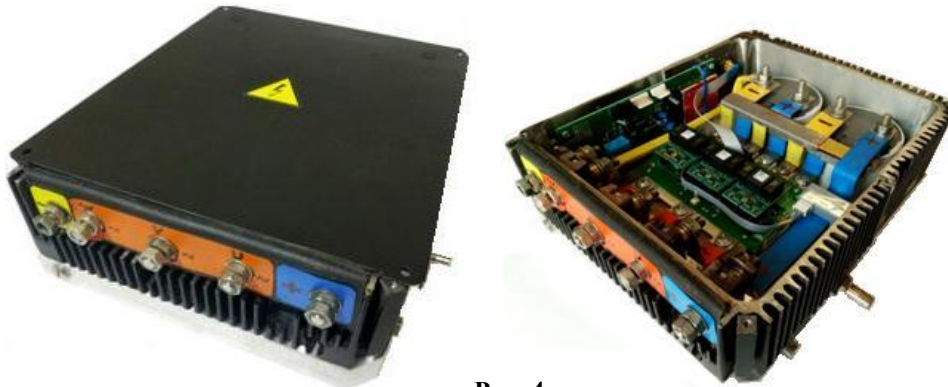


Рис. 4

На всіх компонентах електроустаткування було визначено контрольні точки для здійснення вимірювань та осцилографування. При цьому використовувався аналогово-цифровий осцилограф HAMEG HM 1507 і TEKTRONIX TDS 2002.

На рис. 5 показано осцилограми фазного струму та напруги електродвигуна з модуляцією, а на рис. 6 – без модуляції; 1 поділка дорівнює 50 А, 250 В.

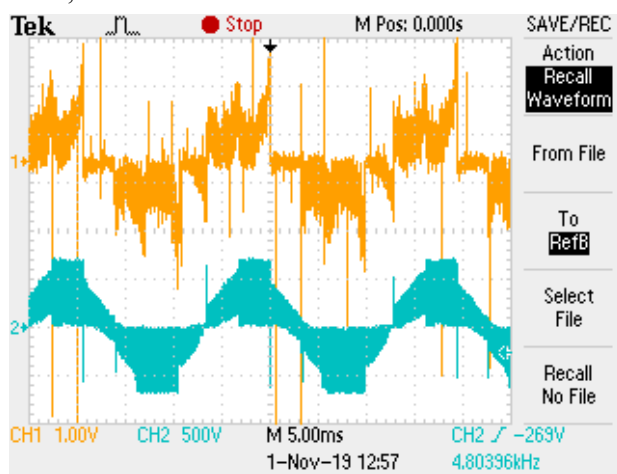


Рис. 5

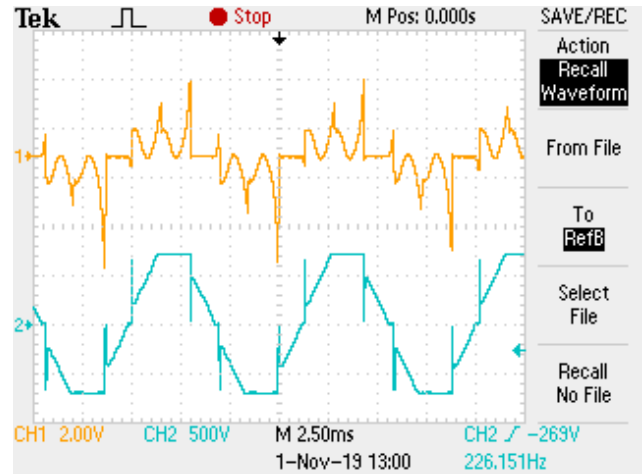


Рис. 6

На рис. 7 показано осцилограму струму у фазі $R-L$ навантаження (без модуляції), 1 поділка = 100А, а на рис. 8 – напруги (з модуляцією) в фазі $R-L$ навантаження; 1 поділка = 200 В.

З наведених осцилограм видно, що рівні перенапруг та викидів струмів на елементах не пере-

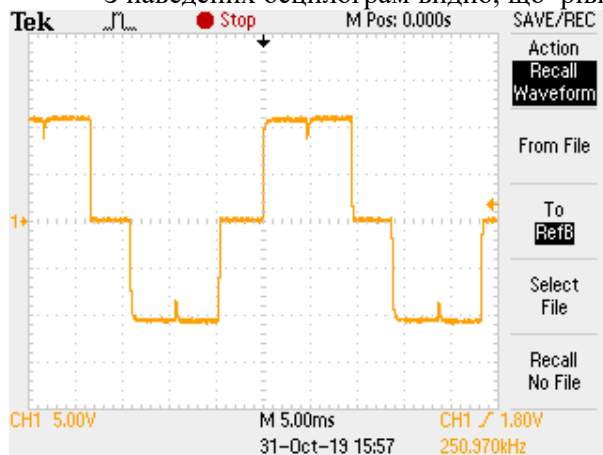


Рис. 7

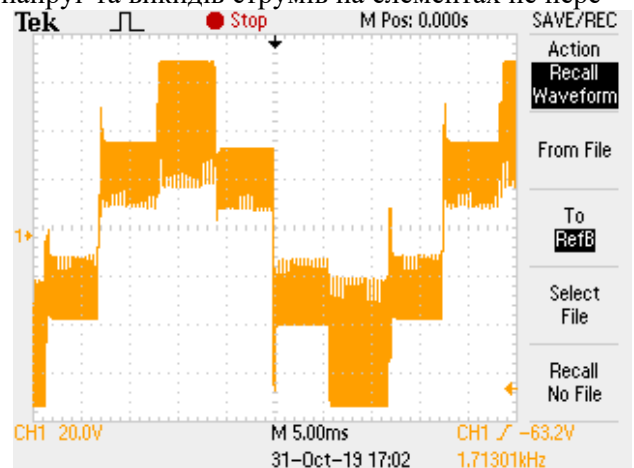


Рис. 8

вищують допустимих. Так на рис. 5 і 6 піковий струм електродвигуна у разі модуляції досягає зна-

чення приблизно 100 – 150 А, що згідно з табл. 1 не має перевищувати 800 А для модуля *IGBT*, а в режимі без модуляції (коли подається повна напруга джерела живлення) величина пікового струму ще менше. Величина напруги колектор-емітер не перевищує значення 705 В, зазначеного в табл. 1, як на рис. 5, 6, так і на рис. 7, 8 для напруги в фазі *R-L* навантаження.

Одним з важливих етапів випробувань, що визначають експлуатаційну надійність контролера, є визначення температури нагрівання кристала модуля *JGBT* за різних режимах навантаження. Тому на другому етапі проводилися теплові випробування силового блоку під час роботи на електродвигуні з постійними магнітами. У разі підключення системи рідинного охолодження електродвигуна та силового блоку контролювався вхідний струм від акумуляторної батареї (АБ) і температура охолоджуючої води. Тривалість випробування становила 30 хв, тобто до виходу температури на стає значення. Результати випробувань представлено у табл. 2. З таблиці видно, що температура охолоджуючої рідини як в електродвигуні, так і в силовому блоці не перевищувала 60⁰С. При цьому максимальний струм навантаження не перевищував 60 А, що відповідало потужності електродвигуна 20 кВт.

Таблиця 2

№	Тривалість випробування, хв	Напруга АБ, В	Струм навантаження, А	Темп. охолодження двиг., ⁰ С	Темп. кристалу модуля <i>IGBT</i> , ⁰ С	Темп. навкол. серед., ⁰ С
1	30	400	25	41	48	25
2	31	400	28	40	45	25
3	30	395	35	43	49	26
4	32	390	35	44	50	23
5	29	380	40	42	51	20
6	30	380	42	50	55	22
7	30	376	55	54	58	22
8	31	373	56	55	57	23

Зважаючи на відсутність більш потужного електродвигуна на постійних магнітах, подальші випробування силового блоку на нагрів проводилися за допомогою активно-індуктивного навантаження. Трифазний вихід контролера приєднувався до навантаження, що складається з трьох ланцюгів з послідовно підключеними резисторами ($R_{\phi}=0,5$ Ом) і дроселями ($L_{\phi}=1,6$ мГ), які з'єднано в "зірку". Результати випробувань наведено у табл. 3.

Таблиця 3

№	Тривалість експерименту, хв	Напруга АБ, В	Струм навантаження, А	Темп. кристалу модуля <i>IGBT</i> , ⁰ С	Темп. навкол. серед., ⁰ С	Споживана потужність, кВт
1	30	400	80	72	20	32,00
2	30	390	100	78	21	39,00
3	30	386	125	83	19	48,25
4	29	380	132	88	17	50,16
5	3	390	230	82	18	89,70
6	3	396	240	90	19	95,00
7	3	395	255	96	22	100,72

Під час проведення випробувань одночасно з вимірюванням температури охолоджуючої рідини проводився контроль температури кристала модуля *IGBT* шляхом вимірювання величини опору тестового резистора модуля. У найбільш навантажених режимах (табл. 3, поз. 6, 7) температура кристалу не перевищувала 100⁰С за допустимої температури 175⁰С. З наведених таблиць видно, що за тепловими характеристиками контролер (силовий блок) не порушує нормативних вимог, забезпечуючи функціонування навантаження потужністю від 50 кВт (довгостроково) і до 100 кВт (короткочасно).

У табл. 4 наведено технічні характеристики контролера, розробленого Інститутом електродинаміки НАН України та відомим розробником у цій галузі фірмою UniTek Industrie Elektronik GmbH (BAMOCAR). З порівняння наведених характеристик видно, що основні показники запропонованого контролера відповідають (або навіть є кращими) показникам розглянутого зарубіжного пристрою.

Таблиця 4

Параметри	Розмірність	ІЕД НАН України	ВАМОСАР
Напруга живлення	V=	До 400	Від 24 до 700
Макс. вихідна напруга, змінного струму	$V_{\sim\text{eff}}$	до 3x400	до 3x450
Тривалий вихідний струм	A_{eff}	130	200
Макс. амплітуда вихідного струму	A_{lo}	400	400
Частота модуляції	kHz	12	8-16
Вага	kg	7,9	8,5
Розміри: висо-та×ширина×товщина	mm	300×260×100	355×230×135

Висновки.

1. Створено контролер для керування тяговим електродвигуном на постійних магнітах тривалою потужністю до 50 кВт, що застосовується у багатоколісних транспортних засобах подвійного призначення. Застосування транзисторного модуля IGBT з безпосереднім рідинним охолодженням кристала дало змогу покращити теплові характеристики та масогабаритні показники контролера.

2. Результати випробувань показали надійне функціонування контролера як під час тривалого, так і короткочасного подвійного навантаження. За тепловими характеристиками контролер не порушує нормативних вимог, а рівні перенапруг та викидів струмів на його елементах не перевищують допустимих.

3. Проведений аналіз показав, що технічні характеристики розробленого контролера відповідають характеристикам контролерів, запропонованих відомими розробниками цієї апаратури, а саме, фірмами ЕМІКРОН, ІРН, Расіng, ВАМОКАР.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток елементів теорії, розроблення нових методів розрахунку та створення засобів для підвищення надійності та енергоефективності режимів і технологічних процесів в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр "Режим-1"), державний реєстраційний номер 0122U001494, КПКВ6541230.

1. Modern Military Vehicles – MEGA. URL: <https://www.megaev.com/modern-military-vehicles/> (дата звернення 30.05.2022).

2. Meissner E., Richter G. Battery Monitoring and Electrical Energy Management: Precondition for future vehicle electric power systems. *Journal of Power Sources*. 2003. Vol. 116. No 1. Pp. 79–98. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00713-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00713-9).

3. Choi S.Y., Jeong S.Y., Gu B.W., Lim G.C., Rim C.T. Ultraslim S-Type Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. No 11. Pp. 6456–6468. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2444894>.

4. Yang Yajuan, Zhao Han, Jiang Hao. Drive Train Design and Modeling of a Parallel Diesel Hybrid Electric Bus Based on AVL/Cruise. *World Electric Vehicle Journal*. 2011. Vol. 4. Pp. 75-81. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj4010075>.

5. Grebenikov V.V., Priymak M.V. Design of the electric motor with permanent magnets for electric vehicle according the driving cycle. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.065>.

6. Шидловський А.К., Павлов В.Б., Павленко В.Е. Анализ зависимости КПД комбинированной системы энергопитания от параметров управления. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 29–31. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.029>

7. Колпаков А.И. Особенности проектирования частотных преобразователей средней и большой мощности. *Электронные компоненты*. 2003. № 6. С. 23-27.

8. SKAI – Most compact power electronic system for electro. URL: <https://www.semikron.com/products/product-lines/skai.html> (дата звернення 25.05.2022).

9. Motor controllers – TM4. URL: <https://www.danatm4.com/products/systems/> (дата звернення 25.05.2022).

10. ВАМОКАР D3 – UniTek Industrie Elektronik GmbH. URL: <https://www.unitek-industrie-elektronik.de>bam> (дата звернення 25.05.2022).

11. Hybrid Pack Drive – Infineon Technologies. URL: <http://www://Infineon.com>dgdl>Infineon-A> (дата звернення 25.05.2022).

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CONTROLLER FOR CONTROL OF THE TRACTION ELECTRIC MOTOR ON PERMANENT MAGNETS

A.F. Zharkin., V.B. Pavlov, V.V. Grebenikov
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: zhark@ied.org.ua , mobil99@ukr.net , elm1153@gmail.com

The controller of traction electric motors on permanent magnets for vehicles in which the power transistor converter is made on the modified IGBT modules with the improved characteristics is described in this work. The use of these modules, which are widely used today in semiconductor devices of modern dual-use technology, allows to reduce the size and weight of the converter, simplify the cooling system, increase efficiency and reliability of the semiconductor converter and electric drive in general due to harsh operating conditions. Bench tests of the experimental sample of the semiconductor converter and the microprocessor control system in various operating modes, including at the maximum load corresponding to real operating conditions are made and carried out. As a result of tests, it was determined that the technical characteristics of the controller meet the requirements of such devices. The created semiconductor controller on IGBT modified modules can be used to control motors on permanent magnets and motor wheels with a nominal power of 40-50 kW, maximum - 100 kW. References 11, figures 8, tables 4.

Key words: controller, transistor module, electric drive, electric motors with permanent magnets.

1. Modern Military Vehicles – MEGA. URL: <https://www.megaev.com/modern-military-vehicles/> (accessed at 25.05.2022).
2. Meissner E., Richter G. Battery Monitoring and Electrical Energy Management: Precondition for future vehicle electric power systems. *Journal of Power Sources*. 2003. Vol. 116. No 1. Pp. 79–98. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00713-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00713-9).
3. Choi S.Y., Jeong S.Y., Gu B.W., Lim G.C., Rim C.T. Ultraslim S-Type Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30. No 11. Pp. 6456–6468. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2444894>.
4. Yang Yajuan, Zhao Han, Jiang Hao. Drive Train Design and Modeling of a Parallel Diesel Hybrid Electric Bus Based on AVL/Cruise. *World Electric Vehicle Journal*. 2011. Vol. 4. Pp. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj4010075>.
5. Grebenikov V.V., Priymak M.V. Design of the electric motor with permanent magnets for electric vehicle according the driving cycle. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 65–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.065>
6. Shydlovskiy A.K., Pavlov V.B., Pavlenko V.E. Analysis of the efficiency dependence of a combined power supply system on control parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 29–31. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.029>
7. Kolpakov A.Y. Designing features of medium and high power frequency converters. *Elektronnye Komponenty*. 2003. No 6. Pp. 23-27. (Rus)
8. SKAI – Most compact power electronic system for electro. URL: <https://www.semikrom.com>product-lines>skai.html> (accessed at 25.05.2022).
9. Motor controllers – TM4. URL: <https://www.danatm4.com>products>col 50-pro> (accessed at 25.05.2022).
10. BAMOCAR D3 – UniTek Industrie Elektronik GmbH. URL: <https://www.unitek-industrie-elektronik.de>bam> (accessed at 25.05.2022).
11. Hibrid Pack Drive – Infineon Technologies. URL: <http://www://Infineon.com>dgdI>Infineon-A> (accessed at 25.05.2022).

Надійшла 25.05.2022
Остаточний варіант 06.06.2022