

## ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА

УДК 621.313.84

**В.Т. Беліков**, к.т.н., доц.

**С.С. Ковалішин**,

**А.А. Коваль**

*Військова академія (м. Одеса), Україна*

### ПЕРСПЕКТИВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ НАЗЕМНИХ БОЙОВИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ МАШИН

*Представлено аналіз перспективних електричних двигунів для наземних безекіпажних машин. Зроблено висновок щодо ефективності застосування форсованих електричних двигунів обертального типу оберненої конструкції, що безпосередньо вбудовані в обіддя коліс.*

**Ключові слова:** наземна бойова робототехнічна машина, електричний двигун, тяговий рушій.

**Постановка проблеми.** Результати досліджень, які проводились у різних країнах, підтверджені досвідом вже серійного промислового виробництва і практичного бойового використання наземних бойових робототехнічних машин (БРТМ) і мають загальну масу в діапазоні 25-500 кг, в умовах реальних бойових дій [1] показали, що єдиним реальним джерелом енергопостачання для таких зразків військової техніки є генератори електричної енергії електрохімічного та/або накопичувального типів у вигляді акумуляторів, паливних елементів і суперконденсаторів відповідно. В свою чергу, це привело до необхідності застосування електромеханічних трансмісій прямого електричного приводу з широким використанням тягових електричних двигунів, безпосередньо вбудованих, без проміжних механічних передач, у обіддя коліс БРТМ. При цьому колеса, що приводяться в рух вказаним способом, можуть знаходитися як у безпосередньому механічному контакті з ґрунтом у БРТМ з колісними рушійми, так і знаходитись в зачепленні з гусеницями гусеничних рушіїв. Той факт, що саме це технічне рішення повністю відповідає самим сучасним тенденціям розвитку наземних транспортних систем, знаходить переконливе підтвердження в масовому переході сучасного автомобілебудування до електромеханічних трансмісій з вбудованими електричними двигунами. Розробки останніх років в області створення електричних двигунів, основне магнітне поле яких створюється постійними магнітами високої енергії на базі рідкоземельних металів (самарій, неодим, диспрозій тощо), дозволили не тільки значно підвищити питомі показники електродвигунів, але й в рази збільшити їх здатність до перевантажування.

Завдяки застосуванню приводних електродвигунів оберненої конструкції, що вбудовані без редуктора безпосередньо в обід колеса, стає реальною практична реалізація повнопривідних схем електромеханічних трансмісій на основі повністю автономних приводів кожного з коліс. Це забезпечує якісно нові можливості системи приводу, які істотно підвищують експлуатаційні характеристики транспортних систем БРТМ на основі широкої комп'ютеризації автоматичних систем управління ними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведені дослідження [2] показують, що практично усі транспортні системи (тягові рушії) сучасних наземних БРТМ засновані на електромеханічних приводах різних конструктивних модифікацій [4-6]. У переважній більшості випадків для приводу опорних (колісний рушій) і ведучих (гусеничний рушій) коліс застосовуються електричні двигуни постійного струму і синхронні двигуни змінного струму. В усіх, без виключення, вказаних вище електричних двигунах для генерування основного магнітного поля застосовуються високоерцитивні рідкоземельні постійні магніти, які виготовлені на основі самарієво-кобальтових (Sm-Co) і неодимових (Nd-Fe-B) композицій. При цьому, якщо для перших композицій характерна температурна стабільність в широкому діапазоні робочих температур при індукціях магнітного поля в межах 0,8...0,9 Тл, то в порівнянні з ними композиції другого

роду забезпечують достатньо високі значення магнітних індукцій (1,1...1,2 Тл) при робочих температурах, що не перевищують 120...130 °С. При підтримці постійності температурного режиму на потрібному для обох модифікацій постійних магнітів рівень зниження величин їх магнітних індукцій з часом практично невлесимий, і сягає всього лише 0,1% за десять років.

Застосування постійних магнітів вказаного класу забезпечує можливість значних струмових перевантажень приводних електричних двигунів, тобто форсування динамічних режимів, що особливо важливе для електромеханічних рушіїв наземних бойових робототехнічних машин і комплексів, призначених для виконання бойових і спеціальних завдань у складних фізико-географічних і погодних умовах. Аналіз спеціальної літератури за темою показує, що в даний час в переважній більшості подібних зразків військової техніки, призначеної для застосування підрозділами сухопутних військ, використовуються системи приводу, які забезпечені проміжними перетворювачами електромагнітного обертального моменту приводних електродвигунів у вигляді редукторів і різних передач, які розміщені між двигуном і об'єктом, що приводиться, яким є опорне (ведуче) колесо рушія.

**Метою статті** є обґрунтування доцільності запропонованої структури тягових рушіїв наземних безекіпажних робототехнічних комплексів

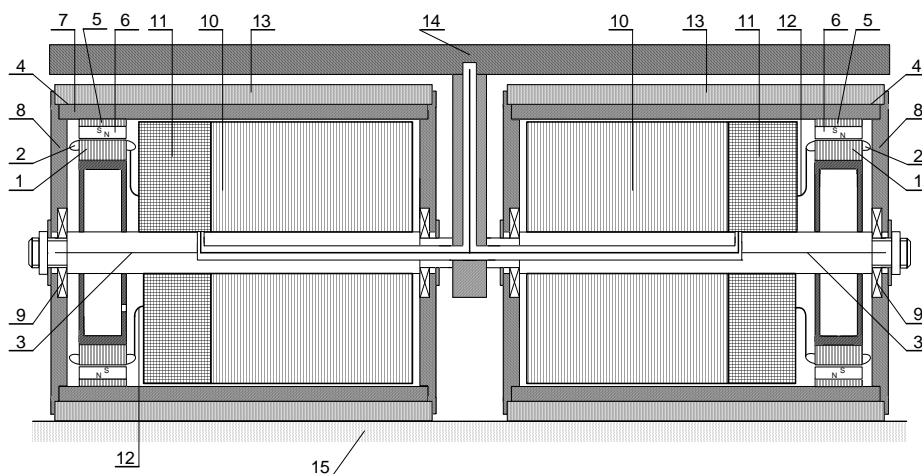
**Основний матеріал.** Обставини принципового значення, які обумовлені тим, що сучасні системи управління приводними електричними двигунами широко використовують мікропроцесорну техніку і мініатюрні датчики положення і швидкості, що працюють з прецизійною точністю, а так само високі динамічні й регульовальні властивості самих приводних двигунів з високоенергетичними постійними магнітами, зумовили перехід до електромеханічних тягових рушіїв БРТМ, заснованих на системах прямого, безпосереднього електромеханічного приводу.

Очевидно, що у цих рушіях повністю виключено застосування у будь-якому вигляді проміжних трансформаторів енергії.

Серед приводних електричних двигунів обертального типу, що використовуються в системах прямого, безпосереднього електричного приводу опорних або ведучих коліс тягових рушіїв наземних бойових робототехнічних машин, з конструктивної точки зору, найефективнішими є обертальні електричні двигуни оберненого типу. Загальний вид подовжнього розрізу оберненого електричного двигуна представлений на рис. 1.

Пара таких двигунів показана в комплекті з електрохімічними елементами живлення і перетворювачами електричної енергії системи керованого електроприводу у вигляді елемента пари ведучих коліс гусеничного рушія наземної робототехнічної машини.

Феромагнітні магнітопроводи 1 статорів обох електродвигунів мають якірні обмотки 2 управління (тут і далі – позиції згідно рис. 1).

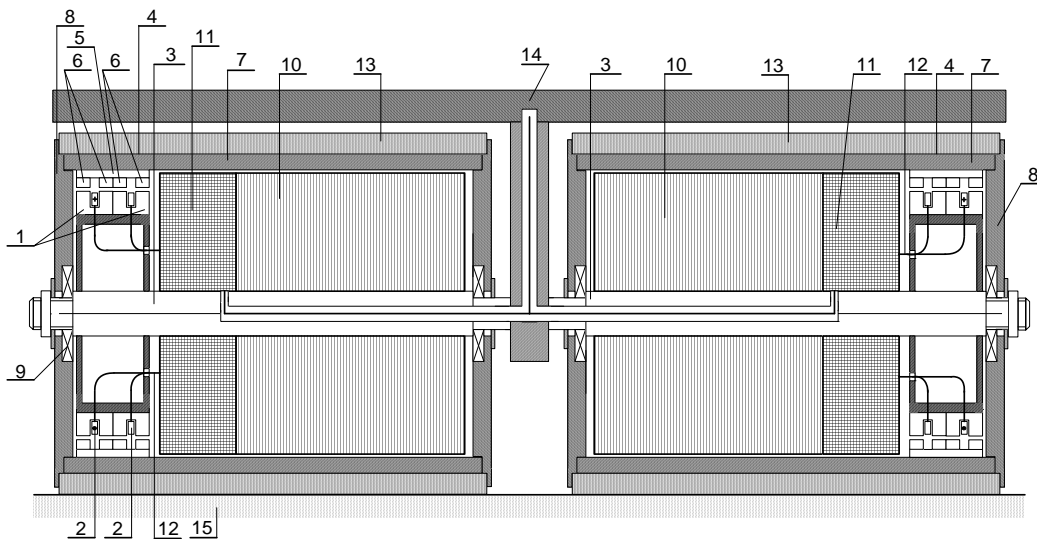


**Рис. 1 – Електромеханічний рушіїв з електродвигунами оберненого виконання, вбудованими в обіддя приводних коліс БРТМ**

Вказані магнітопроводи *1* жорстко закріплені на нерухомому валу *3* коліс *4* гусеничних тягових рушіїв. Кільцеві феромагнітні магнітопроводи *5* роторів двигунів несуть жорстко закріплені на них високоенергетичні постійні магніти *6*, які створюють основне магнітне поле двигунів.

Зовнішні поверхні постійних магнітів *6* обернені у бік зовнішньої поверхні статора *1*. Ротори *5* встановлено на внутрішній поверхні обіддя *7* приводних коліс гусеничного рушія. Бічні кришки *8*, закріплені на обідді *7*, встановлені на підшипниках кочення *9*, які встановлені на посадочних поверхнях нерухомого валу *3*. Завдяки такій конструкції обернених приводних електричних двигунів електричний привід стає прямим, безпосереднім, оскільки повністю усунені будь-які проміжні передачі між роторами приводних двигунів і парою ведучих коліс *4*. Джерела електричної енергії для кожного з приводних двигунів виконані у вигляді електрохімічних елементів *10*, до яких підключені перетворювачі *11*, що безпосередньо живлять за допомогою сполучних провідників *12* якірні обмотки *2* управління двигунів. Гнучкі гусеничні стрічки *13* забезпечують високу прохідність транспортного функціонального блоку-модуля *14* наземної БРТМ *15*. Простота конструкції описаного вище електромеханічного рушія підвищує надійність системи приводу і його живучість в похідних і бойових умовах.

Останніми роками у Німеччині спеціально для використання в системах бронетанкового озброєння і техніки були розроблені і випробувані електричні двигуни так званого «трансверсального» типу, що відрізняються високими питомими показниками і, відповідно, меншими, в порівнянні із звичайними електричними двигунами, габаритами. На відміну від звичайних двигунів постійного і змінного струму, у трансверсальних двигунах використовується поперечне замикання магнітного потоку, що при використанні високоенергетичних рідкоземельних постійних магнітів з полюсними діленнями в діапазоні 8...15 мм дозволяє збільшити питоме електромагнітне зусилля в 2,5...4 рази. При цьому необхідно використовувати такі перетворювачі електричної енергії системи управління тяговим приводом, які здатні забезпечити генерацію високочастотних імпульсів струму, що подається на якірні обмотки управління (рис. 2).



**Рис. 2 – Електромеханічний рушій з електродвигунами трансверсального виконання, вбудованими в обіддя приводних коліс БРТМ**

На рис. 2 представлений елемент конструкції гусеничного тягового рушія БРТМ, в якому встановлена пара тягових електричних двигунів трансверсальної конструкції.

Статори вказаних приводних електродвигунів виконані у вигляді набору П-подібних феромагнітних магнітопроводів *1* тут і далі – позиції рис. 2). У пазах П-подібних феромагнітних магнітопроводів *1* укладені кільцеві секції якірних обмоток управління *2*. Комплект рівномірно розміщених в радіальному напрямі по колу П-подібних феромагнітних магнітопроводів *1* закріплені на нерухомому валу *3*. Ротор кожного з пари тягових двигунів, що обертається і

приводить в рух колесо 4, складається з феромагнітного кільця 5, на поверхні якого, зверненою до статора, жорстко закріплений комплект високоенергетичних постійних магнітів 6, що знаходяться в електромагнітній силовій взаємодії з магнітним полем, що створюється кільцевими якірними обмотками 2 управління. Ротори, що складаються з феромагнітних кілець 5 і комплекту постійних магнітів 6, встановлені усередині обіддя 7 приводних коліс рушія 4.

Тут, точно так, як і в тяговому приводі, конструкція якого була представлена вище на рис. 1, обіддя 7 закриті бічними кришками 8, які з можливістю вільного обертання встановлені на підшипниках кочення 9 на нерухомому валу 3. На ньому ж у внутрішньому просторі приводних коліс 4 встановлені електрохімічні джерела електроенергії 10 і її перетворювачі 11, що живлять через систему підвідних провідників 12 кільцеві секції 2 якірних обмоток управління. Тяговий рушій, що укомплектований гнучкими композитними гусеничними стрічками 13, на яких транспортний функціональний блок-модуль 14 наземної БРТМ переміщається по ґрунту 15.

Визначення геометричних розмірів основних функціональних елементів приводного тягового двигуну і визначення його масогабаритних показників можна провести на підставі наступних початкових (або вихідних) даних:

- загальна маса корпусу транспортної платформи БРТМ – 300 кг;
- загальна маса корпусу поворотного бойового відділення БРТМ – 170 кг;
- загальна маса системи датчиків і прицілів БРТМ – 100 кг;
- загальна маса озброєння і боекомплекту БРТМ – 300 кг;
- загальна маса електрохімічних джерел енергопостачання – 450 кг;
- загальна маса перетворювачів електроенергії – 120 кг;
- загальна маса шести автономних приводів тягового рушія – 240 кг;
- загальна маса БРТМ – 1680 кг;
- максимальна швидкість руху БРТМ – 10 м/с (36 км/год);
- загальні габарити БРТМ, LxVxH – 1800x1300x1400 мм.

На рис. 3 представлений ескіз геометрії приводного (ведучого) колеса 1 рушія з вбудованим електричним двигуном оберненої конструкції, що обертається, феромагнітне кільце 2 ротора жорстко закріплено усередині ободу 3 колеса 1 (тут і далі – позиції рис. 3).

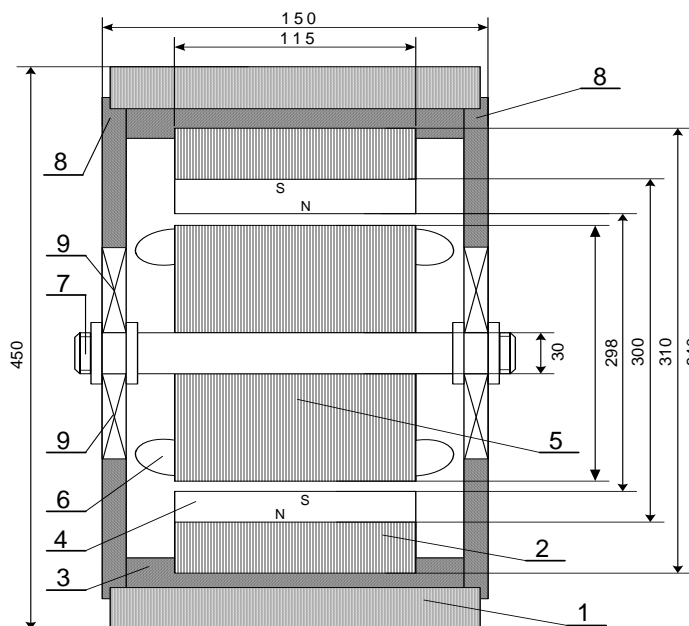


Рис. 3 – Геометрія приводного колеса рушія БРТМ з вбудованим оберненим двигуном

На внутрішній поверхні феромагнітного кільця 2 встановлені постійні високоерцитивні магніти 4, які звернені до нерухомого феромагнітного магнітопроводу 5 статора з якірною обмоткою 6 керування. Магнітопровід 5 жорстко закріплений на нерухомому валу 7 двигуна. Бічні кришки 8 приводного (ведучого) колеса 1 встановлені на підшипниках кочення 9, що знаходяться на валу 7.

Розрахунок величини сумарного електромагнітного окружного зусилля, що розвивається комплектом постійних магнітів 4 роторів приводного двигуна при підключенні якірної обмотки 6 керування до джерела електроживлення у вигляді перетворювача, сполученого з електрохімічним генератором (акумуляторною батареєю або комплектом паливних елементів), проведено з урахуванням наступних попередніх даних.

Величина площі активної поверхні постійних магнітів ротору, що звернена до статора і бере участь у створенні кругового електромагнітного зусилля:

$$S_{ma} = \pi D_{ma} l_{ma} k_{ma} = \\ = \pi \times 0,3 \times 0,115 \times 0,75 = 0,0813 \text{ м}^2,$$

де  $D_{ma} = 0,3\text{м}$  – діаметр внутрішньої поверхні ротору, зверненої до статора;

$l_{ma} = 0,115\text{м}$  – активна довжина постійних магнітів в подовжньому напрямку;

$k_{ma} = 0,75$  – коефіцієнт, рівний відношенню ширини магніту до полюсного ділення ротору.

Сумарне електромагнітне зусилля, що виникає під час взаємодії магнітних полів статора і ротору, яке прикладене до внутрішньої поверхні ротору, визначається за формулою:

$$F_2 = F_{\text{пт}} S_{ma} = 20000 \times 0,0813 = 1626 \text{ Н},$$

де  $F_{\text{пт}} = 20000 \text{ Н/м}^2$  – питоме електромагнітне зусилля, що виникає при взаємодії плоского квадратного провідника площею  $1 \text{ м}^2$ , що знаходиться в магнітному полі, індукція якого дорівнює  $1,0 \text{ Тл}$  при питомому струмовому навантаженні провідника  $20000 \text{ А}$ .

Величина номінального значення потужності, яку може розвивати один автономний функціональний тяговий блок-модуль з вбудованим магнітоелектричним приводним двигуном для рушія БРТМ, що має вищезгадані масогабаритні параметри, визначається таким чином.

Інтегральне значення тягового зусилля, яке здатен розвивати даний приводний двигун на зовнішньому колі приводного колеса БРТМ, складатиме:

$$F_1 = F_2 \frac{D_{ma}}{D_1} = 1626 \times \frac{0,3}{0,45} = 1084 \text{ Н}.$$

Розрахункове значення номінальної потужності одного тягового електричного двигуна складатиме:

$$P_{2\text{н}} = F_1 V_{\text{max}} = \\ = 1084 \times 10 = 10840 \text{ Вт} = 10,84 \text{ кВт} \approx 11 \text{ кВт}.$$

Сумарна величина потужності тягового рушія, що необхідна для руху БРТМ по горизонтальній поверхні без підйому, визначається відповідно до формули:

$$P_{2\text{гор}} = G_{\Sigma} g f_{\text{к}} V_{\text{max}} = \\ = 1680 \times 9,81 \times 0,05 \times 10 = 8240 \text{ Вт} = 8,24 \text{ кВт}.$$

Визначення, на який можливий підйом даної БРТМ зі швидкістю при номінальному навантаженні всіх шести приводних двигунів, може бути проведене шляхом розв'язання рівняння:

$$P_{2\Sigma} = (G_{\Sigma} g \sin\alpha + G_{\Sigma} g f_{\text{к}}) V_{\text{max}} = G_{\Sigma} g V_{\text{max}} (\sin\alpha + f_{\text{к}}),$$

таким чином,

$$\sin \alpha = \frac{P_{2\Sigma}}{G_{\Sigma} g V_{\max}} - f_k = \frac{6 \times 11000}{1680 \times 9,81 \times 10} - 0,05 = 0,35.$$

Відповідно, кут максимальної крутизни схилу дорівнює  $21^\circ$ .

Прискорення розгону при одночасному подаванні на якірні обмотки всіх шести приводних двигунів електромеханічного рушія БРТМ струмів номінального значення визначається зі співвідношення:

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{G_{\Sigma}} = \frac{1084 \times 6}{1680} = 3,87 \text{ м/с}^2.$$

Згадані вище форсовані тягові електричні двигуни з рідкоземельними постійними магнітами мають високу перевантажувальну здатність і, відповідно, високі динамічні характеристики, що має забезпечити надійне функціонування при подвійному перевантаженні по струму протягом 0,5 години.

Питомий показник для приводних електричних двигунів трансверсального виконання при ширині рідкоземельних постійних магнітів збудження основного магнітного поля, що знаходиться в межах 0,01...0,015 м, перевищує відповідні значення, що властиві тяговим двигунам звичайного виконання, у 2,5...3 рази. Очевидно, що в такій же мірі можуть бути зменшені масогабаритні характеристики приводних двигунів або збільшені значення тягових зусиль і потужностей при збереженні колишніх масогабаритних показників.

**Висновки.** У основу конструктивного виконання транспортної системи машин, що розглядались, був покладений принцип їх компоновки з набору автономних тягових приводних блоків-модулів, обладнаних прямими безпосередніми тяговими електромеханічними приводами, розміщеними в кожному з опорних або приводних коліс. Принцип безпосереднього прямого тягового електромеханічного приводу транспортних систем цього спеціалізованого робототехнічного устаткування полягає у тому, що для електричного приводу кожного з опорних або приводних коліс автономного транспортного блоку-модулю використані форсовані електричні двигуни обертового типу оберненої конструкції, що безпосередньо вбудовані в обіддя коліс, які приводяться ними у рух.

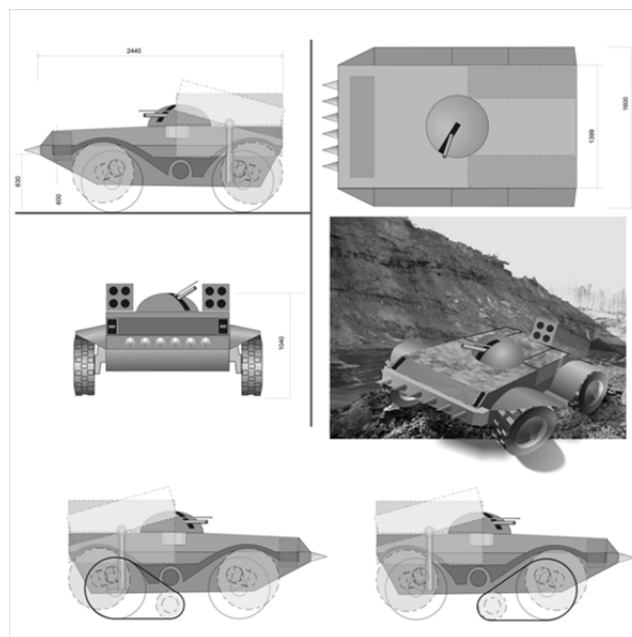


Рис. 4 – Варіанти побудови рушіїв гусеничного, колісного і комбінованого типу

Автономні тягові функціональні блоки-модулі транспортних систем БРТМ можуть бути забезпечені рушіями колісного, гусеничного або комбінованого типів (рис. 4).

Принципова особливість форсованих приводних електричних двигунів з висококоерцитивними постійними збудженнями для автономних тягових блоків-модулів транспортних систем БРТМ полягає в тому, що вони здатні забезпечити можливість їх двократного півгодинного перевантаження по обертальному моменту і струму навантаження якірної обмотки і короткочасного (до 0,5 с) 5...6-кратного перевантаження по моменту і струму.

Така конструкція має загальні високі динамічні показники транспортних систем БРТМ, що забезпечує не тільки надійне маршове маневрування, але і бойове функціонування БРТК з високими швидкостями руху в умовах складного рельєфу місцевості.

Система енергопостачання сучасних БРТМ повинна відповідати основному принципу її побудови: живлення всіх складових виконавчої апаратури і механізмів здійснюється від генераторів електричної енергії. Генератори переважно мають електрохімічне виконання у вигляді електричних акумуляторів або паливних елементів. На сьогодні також застосовуються суперконденсатори, які повинні заряджатися від зовнішніх джерел електричної енергії так само, як і електричні акумулятори. У ряді випадків можуть бути використані комбіновані схеми електроживлення.

Наукові дослідження і технічні розробки, проведені протягом останніх років дозволили створити нові системи електрохімічних акумуляторів, питомі показники яких починають наближатися до 600 Вт/кг, що практично вчетверо перевищує питомі показники свинцево-кислотних акумуляторів і втричі – показники найсучасніших літєво-іонних акумуляторів.

Розрахунки, які наведені в [2], показали, що повне енергозабезпечення для успішного бойового функціонування усіх виконавчих систем БРТМ може бути досягнуто у разі, коли мінімальна маса енергії буде складати не менше 25% від повної маси БРТМ.

Новітні системи електрохімічних акумуляторів, як, наприклад, алюмінієво-повітряні або літєво-сірчані, дозволяють знизити частку енергетичних джерел в загальній масі роботизованих установок літєво-іонного електрохімічного генератора електричної військового призначення до 18,5% і 14,2%, відповідно. Наведені значення будуть сприяти зниженню загальної маси БРТМ або збільшенню маси корисного вантажу (боєкомплекту озброєння) відповідно на 6,5% і 10,8% відповідно.

### Список використаних джерел

1. «Застосування бойових роботів у Афганістані і Іраку» // «Народна армія», № 23/1535. – 2 лютого 2005 р.
2. Звіт по НДР «Гладиатор-СВ». – Одеса, НЦ БЗ СВ. – 2010. – Інв.699-в.
3. Юревич Е.И. Основы роботехники. – 2 изд., перераб. и доп. / Е. И. Юревич – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 416 с.
4. Беліков В.Т. та ін. Модульно-структурований військовий наземний робот для бойових і спеціальних операцій. Патент України № 88585 від 26.10.2009 р.
5. Беліков В.Т. та ін. Здвоєний модульноструктурований військовий наземний робот. Патент України № 88833 від 21.11.2009 р.
6. Беліков В.Т., Борисюк М.Д., Дяченко О.Ф., Розвод Р.С. та ін. Військова гусенична машина з електрохімічною енергетичною установкою. Патент України №83016 від 10.06.2008 р.

Рецензент: О.П. Григор'єв, к.т.н., с.н.с., Військова академія (м. Одеса)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ БОЕВЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ МАШИН

**В.Т. Беликов, С.С. Ковалишин, А.А. Коваль**

*Представлен анализ перспективных электрических двигателей для наземных безэкипажных машин. Сделан вывод об эффективности применения форсированных электрических двигателей вращательного типа, обращённой конструкции, непосредственно вмонтированных в ободья колёс.*

**Ключевые слова:** наземная боевая робототехническая машина, электрический двигатель, тяговый движитель.

## PROSPECTS OF THE ELECTRIC ENGINES FOR UNMANNED GROUND VEHICLES

**V.T. Belikov, S.S. Kovalishin, A.A. Koval**

*The presented analysis of the perspective electric engines for unmanned ground vehicles. Conclusion is made about efficiency of the using forced electric engines rotation type, turned to designs, directly mounted in rim travell about.*

**The keywords:** overland combat robotic machine, electric engine, tractive propeller.

УДК 62-523.8

**В.І. Бучка**

*Військова академія (м. Одеса), Україна*

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СПОСТЕРЕЖНИХ ПРИЛАДІВ НІЧНОГО БАЧЕННЯ

*В роботі проведений аналіз основних шляхів та перспектив розвитку спостережних приладів нічного бачення. Розглянуто покоління розвитку електронно-оптичних приладів, їх недоліки та переваги. Зроблені висновки щодо розробки шляхів удосконалення приладів нічного бачення.*

**Ключові слова:** прилади нічного бачення, електронно-оптична система, оптика, кратність, інфрачервоне випромінювання, люмінесцентна плівка.

**Актуальність задачі.** Стратегічна стабільність у світі необхідна всім державам для забезпечення власної безпеки. В повній мірі це стосується й України. Внутрішні економічні та політичні зміни умов, а також зміни в геополітичній сфері світу, накладають відповідні вимоги до створення в Україні якісно нових збройних сил, які будуть відповідати цим вимогам часу. Реформи в збройних силах передбачають розвиток та розробку основних положень теорії озброєння, а також теоретичного обґрунтування розвитку озброєння і військової техніки. Тому досить актуальними в наш час є роботи, спрямовані на розробку системи методик для забезпечення наукових досліджень саме в галузі розвитку нового озброєння і військової техніки.

Бойова готовність збройних сил і бойова ефективність озброєння в значній мірі залежать від якості ведення бойових дій в нічних умовах. Їх показники не повинні погіршуватись при діях в темний час доби. Тому до приладів нічного бачення висуваються досить високі вимоги, адже саме від них залежить якість проведення розвідки та корегування стрільби своєї артилерії в нічних умовах.

Завдання тактико-технічних вимог до електронно-оптичних приладів нічного бачення (ЕОПНБ) та їх елементів являє собою досить складний процес.