

УДК 621.313

В.О. Чумакевич<sup>1</sup>, О.Є. Сокульський<sup>2</sup>, І.І. Зелений<sup>3</sup>, О.І. Крешешний<sup>4</sup><sup>1</sup> Львівський національний аграрний університет, Львів<sup>2</sup> Національний технічний університет України «КПІ», Київ<sup>3</sup> Військова академія, Одеса<sup>4</sup> Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ БОЙОВИХ МАШИН РЕАКТИВНИХ СИСТЕМ ЗАЛПОВОГО ВОГНЮ

В статті наведено пропозиції з модернізації електроприводів бойових машин реактивних систем залпового вогню шляхом впровадження безредукторних приводів.

**Ключові слова:** електроприводи, реактивні системи, безредукторні моментні двигуни.

### Вступ

**Постановка завдань досліджень.** Основною задачею приводів є забезпечення потрібного руху робочого органа. Необхідно відмітити, що крім традиційних вимог до обладнання військового призначення додатково висуваються вимоги їх енергоекономічності, компактності, підвищеної живучості та можливості отримувати напругу від аварійних джерел живлення протягом заданого періоду часу. Механізми наведення (МН) бойових машин призначені для надання подовжній осі гармати (пакету напрямних, пускової установки) необхідного положення в просторі. Вони діляться на підйомні і поворотні (механізми повороту башти). Ще однією особливістю військових електроприводів механізмів наведення є обов'язкова наявність у них механічних дублерів. У артилерійських (танкових), реактивних та ракетних системах знайшли застосування МН, які класифікують за кінематичною схемою на гвинтові, зубчасті, черв'ячні, ланцюгові та передачі муфтами. Кожен з цих механізмів має свої переваги та недоліки. Основним недоліком є їх габарити та достатньо великі втрати під час передачі енергії. Наприклад, маса редуктора, в середньому, складає до 80 % всієї маси електроприводу [1]. Також редуктори вносять в роботу додаткові люфти, змінюють пружний характер з'єднань, моменти інерції та інші. Нагадаємо, що основною задачею електроприводів бойових машин є наведення із заданою швидкістю і точністю досить масивних об'єктів (стволу гармат, пакети напрямних, пускові установки).

Іншим недоліком є застосування застарілих систем керування, які використовують, як правило, імпульсні системи керування із електромашинним підсилювачем [11 – 14]. Такі підходи до систем керування електроприводами є морально та фізично застарілими [2, 3].

Таким чином, існуючі сьогодні електроприводи не в повній мірі задовольняють вимогам сучасності, а тема статті є актуальною.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** В роботах [1, 5 – 10] наведено переваги та недоліки редукторних та безредукторних електроприводів та варіанти їх виконання.

В [1, 2, 5 – 7] наводяться ряд протиріч між підходом виробників електродвигунів та створення безредукторних приводів. Як правило, високі швидкості більшості електродвигунів, приводи мають додатково шість основних елементів зношування (знижує надійність системи в цілому), привід є основним джерелом шумів, гірша електромеханічна постійна часу

Основний шлях відмови від редуктора полягає в удосконаленні систем керування та застосування низькошвидкісних електродвигунів.

### Основний розділ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді

Проведемо порівняльний аналіз редукторних та безредукторних електричних виконавчих двигунів.

Оскільки в безредукторному приводі двигун недовикористовується по частоті обертання, то, імовірно можливий програш в енергетичних показниках приводу та значне зниження моменту і програш у потужності. Однак при невеликому статичному та динамічному навантаженні, навпаки, можливе навіть поліпшення динаміки приводу: зріст прискорень при розгоні та гальмуванні, зменшення часу відпрацювання заданого переміщення.

Будемо вважати, що у вихідному редукторному приводі використовується оптимальне за швидкодією передаточне відношення редуктора та відповідно по трикутному графіку частоти обертання (рис. 1).

Площа трикутника АВС пропорційна відпрацьованому шляху. Тривалість переміщення  $t_p$  визначається основою трикутника АС. В режимі холостого ходу

$$t_p = \frac{2J_d \delta}{M_d} \cdot \omega_c, \quad (1)$$

де  $J_d$  – момент інерції двигуна;  $\delta=1,1\div 1,15$  – коефіцієнт, враховуючий інерційні маси на валу двигуна;  $\omega_C$  – максимальна частота обертання двигуна, яка відповідає його номінальному режиму;

$M_d=M_{ном} \cdot \lambda_m$  – максимальний момент двигуна, який використовується в перехідних режимах та визначається його переважувальною здатністю.

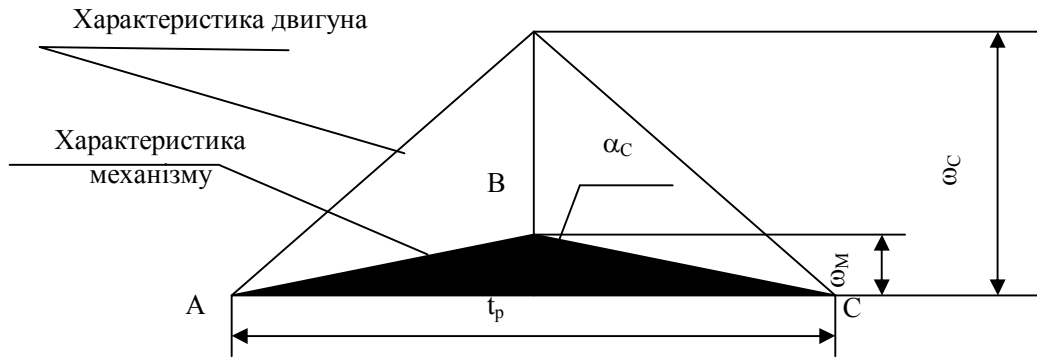


Рис. 1. Трикутний графік частоти обертання

При переході до частоти обертання на вісі двигуна запишемо

$$t_p = \frac{2J_d \delta}{M_d} \cdot v \cdot \omega_M, \quad (2)$$

де  $\omega_M$  – максимальна частота обертання двигуна;  $v$  – відношення частот обертання двигуна в редукторному та безредукторному приводах, яке дорівнює передаточному відношенню редуктора  $j$ .

Тоді шлях запишемо

$$\alpha = \frac{\omega_M t_p}{2} = \frac{2J_d \delta}{M_d} \cdot v \cdot \omega_M \cdot \frac{\omega_M}{2} = \frac{J_d \delta v \omega_M^2}{M_d}. \quad (3)$$

У випадку безредукторного приводу за час розгону та гальмування

$$t_{п.б.} = \frac{2J_d \delta}{M_d} \cdot \omega_M$$

механізм буде проходити шлях

$$\alpha_{п.б.} = \frac{2J_d \delta \omega_M}{M_d} \cdot \frac{\omega_M}{2} = \frac{J_d \delta \omega_M^2}{M_d}. \quad (4)$$

Відповідно більша частина шляху буде відпрацьовуватись в усталеному режимі (рис. 2.) при постійній частоті обертання  $\omega_M$

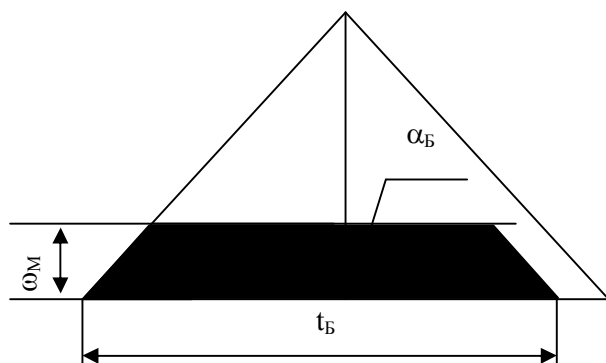


Рис. 2. Трикутний графік частоти обертання безредукторного двигуна у сталому режимі

$$\alpha_{п.ч} = \alpha - \alpha_{п.б.} = \frac{J_d \cdot \delta \cdot v \cdot \omega_M^2}{M_d} - \frac{J_d \cdot \delta \cdot \omega_M^2}{M_d} = \frac{J_d \cdot \delta \cdot \omega_M^2}{M_d} \cdot (v - 1).$$

Тривалість обертання осі механізму з постійною частотою

$$t_{п.ч} = \frac{\alpha_{п.ч}}{\omega_M} = \frac{J_d \cdot \delta \cdot \omega_M^2}{M_d} \cdot (v - 1), \quad (5)$$

звідки повний час руху безредукторного приводу

$$t_{\Sigma} = t_{п.ч} + t_{п.б.} = \frac{2J_d \delta}{M_d} \cdot \omega_M + \frac{J_d \cdot \delta \cdot \omega_M^2}{M_d} \cdot (v - 1) = \frac{J_d \cdot \delta \cdot \omega_M}{M_d} \cdot (v + 1). \quad (6)$$

Відповідно, вигравш по часу при переході до безредукторного приводу може бути оцінений по відношенню:

$$\tau = t_{\Sigma} / t_p = \frac{J_d \cdot \delta \cdot \omega_M}{M_d} \cdot (v + 1) / \frac{2J_d \delta}{M_d} \cdot v \cdot \omega_M = \frac{v + 1}{2v}. \quad (7)$$

Відповідна характеристика, яка показує дану залежність, представлена на рис. 3.

Таким чином, ми показали математично переваги безредукторних приводів у швидкодії, що є важливим чинником для приводів механізмів наведення бойових машин.

### Методика розв'язання задачі

Оскільки у даній роботі пропонується використання приводу безконтактного виконання то мета розрахунку механізму вертикального наведення буде зводитися до вибору електродвигуна безредукторного типу з урахуванням його розміщення на бойовій машині таким чином щоб залишити базове шасі практично без змін конструкції та усунення можливостей відхилення характеристик зразка від норм встановлених інструкцією по експлуатації.

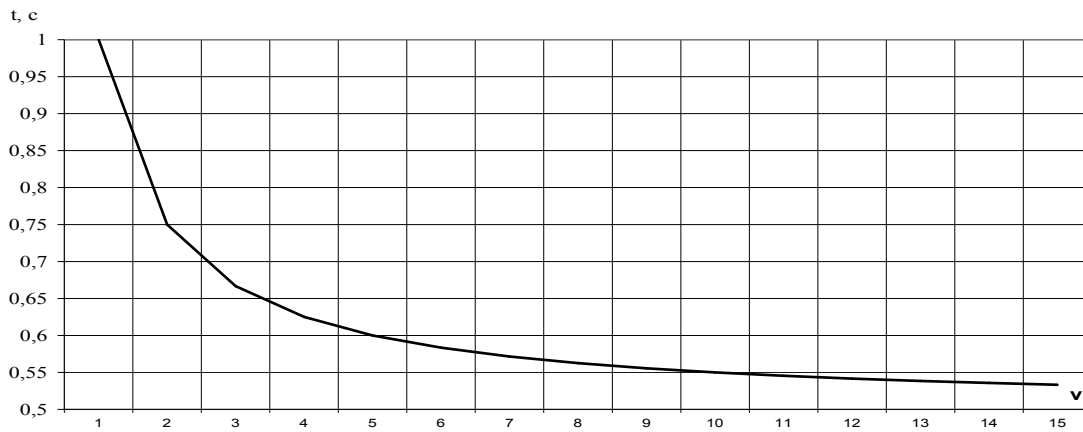


Рис. 3. Виграш у часі при використанні безредукторних виконавчих двигунів

Для повного відпрацювання даної роботи та пропозицій щодо вибору двигуна буду притримуватися наступного плану.

Аналіз вимог, які висуваються до пристрою, що проектується.

Методика розрахунку механізму наведення.

Розрахунок і проектування механізму наведення.

Отже перш за все необхідно висунути вимоги до механізмів наведення бойових машин реактивних систем залпового вогню.

Кути наведення у вертикальній площині повинні бути в межах від  $0^\circ$  до  $70^\circ$ ;

Мінімальний кут піднесення напрямних реак-

тивних систем залпового вогню повинен давати змогу ведення вогню прямим наведенням та максимальний перехід від настільної траєкторії.

Кути наведення в горизонтальній площині повинні складати  $\pm 90^\circ$ .

Підйом, опускання та поворот пакету напрямних повинні виконуватися при допустимих перевантаженнях за мінімально короткий час.

Швидкості наведення повинні складати:

по куту піднесення  $5 \dots 7^\circ/\text{с}$ ;

по азимуту  $5 \dots 7^\circ/\text{с}$ .

Згідно запропонованих удосконалень обираємо такі вихідні дані для розрахунку механізму підйому:

|   |   |
|---|---|
| Сила нормального тиску ХЧ на цапфи, Н                           | $N_{ц}=26850$   |
| Координати центра ваги ХЧ з снарядами, м                        | $L_{к}=0,5$   |
| Вага хитної частини зі снарядами, Н                             | $Q_{к}=59486$   |
| Момент інерції хитної частини, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$       | $I_{к}=2000$  |
| Кут між площиною симетрії ХЧ і напрямком вітру, град            | $\alpha = 30^\circ$   |
| Число обертів ХЧ навколо вісі цапф, об/хв                       | $n_{н} = 0,78$  |
| Розрахункова навітряна площа, $\text{м}^2$                      | $F = 4,3$   |
| Відстань від вісі обертання ХЧ до центру тиску вітру, м         | $H = 1,5$   |
| Радіус цапфи, м   | $R_{ц} = 0,052$   |
| Момент сили тиску газової струї на пакет, Нм                    | $M_{д} = 20000$   |
| Інерційний момент з рішення задачі динаміки ПУ при стрільбі, Нм | $M_{і} = 3890$  |
| Кути наведення у площині стрільби, град                         | $\varphi_{\text{max}} = 55^\circ; \varphi_{\text{min}} = 0^\circ$ |

### Результати досліджень

Розрахунок та вибір електродвигуна здійснюємо згідно методики [1 – 4].

Момент тертя в цапфах:

$$M_{т} = f \cdot N_{ц} \cdot R_{ц} = 0,12 \cdot 26850 \cdot 0,052 = 167,544 \text{ [Нм]}.$$

$$\text{Момент невідновженості хитної частини:} \\ \Delta M = Q_{к} L_{к} \cos \varphi = 59486 \cdot 0,5 \cdot 1,0 = 29743 \text{ [Нм]}.$$

Момент опору від вітрових навантажень:

$$M_{w} = q_i F_i H \sin^2 \alpha_w = \\ = 1365 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 0,25 = 2201,062 \text{ [Нм]}.$$

Сумарний статичний момент опору підйому:

$$M_{с} = M_{т} + \Delta M + M_{w} = \\ = 167,544 + 29743 + 2201,062 = 32111,606 \text{ [Нм]}.$$

Момент опору від сил інерції в період розгону:

$$M_{р} = I_{к} \cdot \frac{dw}{dt} = 2000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,78}{30 \cdot 0,15} = 1089,085 \text{ [Нм]}.$$

Задамо к.к.д. механізму підйому, виходячи з досвіду проектування,  $\eta = 0,7 \dots 0,85$ . Приймемо  $\eta = 0,85$ .

Потужність двигуна кВт обчислюється як

$$N_{д} = \frac{(M_{с} + M_{р})}{9550 \cdot \eta} \cdot n_{н} = \frac{(32111,606 + 1089,085)}{9550 \cdot 0,85} \cdot 0,78 = \\ = 3,190 \text{ [кВт]}.$$

Аналогічно буде проводитися розрахунок електродвигуна, який буде забезпечувати наведення пакету напрямних по азимуту.

Для механізму вертикального наведення пропонується обрати безредукторний моментний двигун з обмеженим кутом повороту секторного типу.

Оскільки конструкція пакету напрямних у спорядженому виді має велику вагу і момент який створюється відповідно також буде великим наш двигун не зможе витримати таке навантаження, тому я пропоную дещо змінити конструкцію хитної частини, але це буде зроблено таким чином, що не впливатиме на характеристики стрільби та на зміну умов ведення стрільби. Пропонується розмістити замість одного сектору який знаходиться посередині нижньої частини пакету напрямних два, розташовані по обидва боки від пакету напрямних та будуть одночасно ротором (рухомою частиною) електродвигуна. Дану пропозицію схематично зображаю (рис. 4).

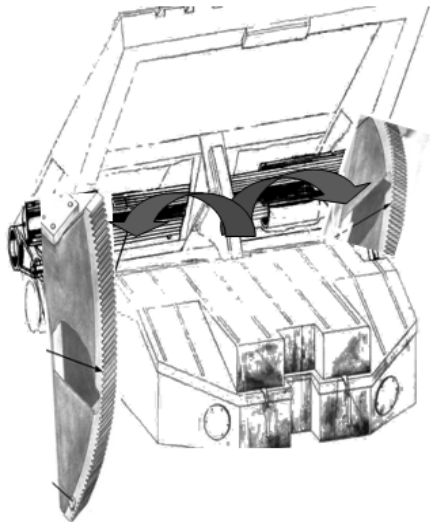


Рис. 4. Пропозиції з розміщення сектора

Таким чином, ми розподілимо вагу пакету напрямних на два двигуни, які будуть працювати синхронно. На рис. 5 зображено двигун вертикального наведення (вид згори).

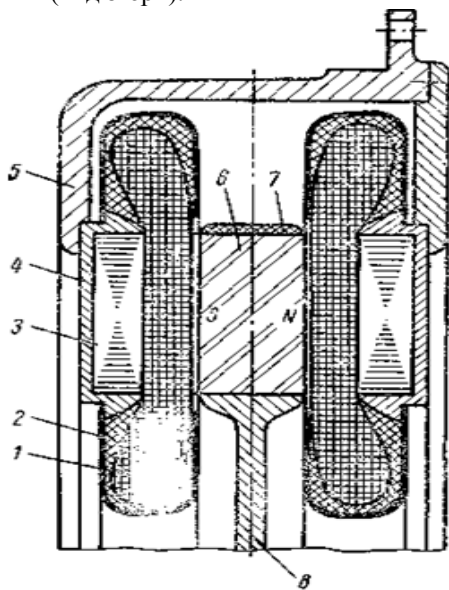


Рис. 5. Моментний двигун з обмеженим кутом повороту ротора: 1 – обмотка; 2 – захисний кожух; 3 – ярмо статора; 4 – кільцевий стакан; 5 – корпус; 6 – постійний магніт; 7 – бандаж із склострічки; 8 – корпус ротора

Для механізму горизонтального наведення я пропоную взяти моментний електродвигун з необмеженим кутом повороту ротора оберненого типу, як було зазначено у другому розділі. Встановлення його на базове шасі не буде викликати труднощів оскільки статор даного двигуна буде нерухомо закріплюватися на корінній шестерні.

На рис. 6 показана одна з конструкцій моментного двигуна в оберненому виконанні. Статор двигуна забезпечений магніто-м'якими полюсними наконечниками, установленими між однополярними секторами кільцевих постійних магнітів (ПМ), а також немагнітною втулкою, на якій закріплені полюсні наконечники і кільцеві ПМ; це дозволяє отримати покращені масогабаритні і енергетичні показники двигуна. Моментний двигун складається з якоря 1, усередині якого розташований статор 2. Якір містить сердечник 3, в пазах якого знаходиться обмотка, сполучена з колектором 4, розміщеним з однієї сторони на лобових частинах обмотки.

Статор 2 має два співвісно установлені кільцевих ПМ 5 і 6, аксіально намагнічених і зорієнтованих назустріч один одному однойменними полюсами; між ПМ розташовані магнітно м'які полюсні наконечники 7. Кожний з кільцевих ПМ має ті, що чергуються протилежній полярності сектори, наприклад 8 і 9. Кільцеві ПМ на торцях двигуна оснащені шунтуючими кільцями 10 і 11. Полюсні наконечники 7 і кільцеві ПМ 5 та 6 закріплені на немагнітній втулці 12.

## Висновок

Перспективним напрямком модернізації РСЗВ є удосконалення електроприводу механізмів наведення шляхом використання безредукторних систем.

Застосування безредукторного електроприводу дозволить збільшити швидкість наведення, зменшити вагу шитної частини, наприклад, для БМ-21 майже на 1000 кг, що дозволить використати вантажопідйомність базового шасі, наприклад, для перевезення додаткового комплекту боєприпасів.

Для електроприводу горизонтального наведення пропонуємо використовувати безредукторний моментний двигун оберненого типу. Постійні магніти необхідно розташувати на статорі двигуна.

Для електроприводу вертикального наведення доцільно використовувати два безредукторних моментні двигуни секторного типу з обмеженим кутом повороту ротора, які розміщуються по обидва боки пакету напрямних і працюють синхронно. Сектор буде виступати ротором даних двигунів.

## Список літератури

1. Свічарник Д.В. *Электрическое машины непосредственного привода. Безредукторный электропривод* / Д.В. Свічарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
2. *Следящие приводы: В 3 т. / под ред. Б.К. Чемоданова. Т. 2: Электрические следящие приводы* / Е.С. Блейз, В.Н. Бродовский, В.А. Введенский и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 880 с.

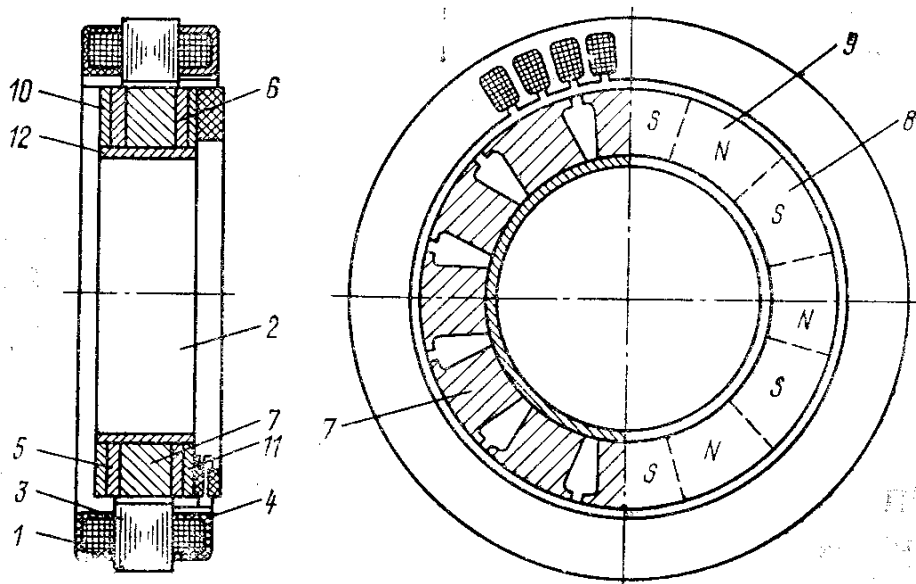


Рис. 6. Моментний двигун оберненого виконання

3. Маруцак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням: навч. посібн. / Я.Ю. Маруцак. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. – 208 с.

4. Белановский А.С. Электрооборудование танков: Учебник / А.С. Белановский, Б.В. Новиков, В.М. Тихомиров, М.Н. Фесенко / под ред. проф. А.С. Белановского. – М.: ВАБВ., 1972. – 556 с.

5. Сапсаев А.В. Циклический безредукторный электропривод / А.В. Сапсаев // Электротехника. – 2000. – № 11/00. – С. 29-34.

6. Щур І.З. Система безредукторного електропривода інфранизьких частот обертання / І.З. Щур, С.О. Малярчук, В.Б. Козій // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – К.: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 77-78.

7. Сабинин Ю.А. Безредукторный позиционный электропривод / Ю.А. Сабинин, А.В. Денисова // Электротехника. – 1999. – № 8. – С. 22-28.

8. Щур І.З. Алгоритм роботи комплексного давача електричного кута положення, швидкості і напрямку обертання для тихохідного електропривода / І.З. Щур, С.О. Малярчук, В.Б. Козій // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2005. – № 544. – С. 168-173.

9. Чучман Ю.І. Прецизійний тихохідний безредук-

торний безконтактний електропривід / Ю.І. Чучман, І.З. Щур, М.В. Черепаняк, В.М. Журкіна // Електроінформ. – 2006. – № 2. – С. 13-16.

10. Бельский Ю.М. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов Ю.М. Бельский, Г.С. Зеленков, А.Г. Микеров / – Л.: Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды, 1987. – 27 с.

11. Боевая машина пехоты БМП-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М. Воениздат, 1979. – 624 с.

12. Боевая машина пехоты БМП-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ч. 1. – М.: Воениздат, 1987. – 248 с.

13. Изделие 2С3М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2С3МТОЗ.Система 2Э24. Кн. 3. М.: Воениздат, 1979. – 36 с.

14. Рой М.В. Реактивні системи залпового вогню. Основи будови та експлуатації артилерійської частини і реактивних снарядів. Навчальний посібник. / М.В. Рой. – Суми: Військовий інститут артилерії при Сумському державному університеті, 1998. – 168 с.

Надійшла до редколегії 11.07.2012

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. Ю.І. Миргород, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БОЕВЫХ МАШИН РЕАКТИВНЫХ СИСТЕМ ЗАЛПОВОГО ОГНЯ

И.О. Чумакевич, О.Е. Сокульский, И.И. Зеленый, А.И. Кремешный

В статье приведены предложения по модернизации электроприводов боевых машин реактивных систем залпового огня путем внедрения безредукторных приводов.

**Ключевые слова:** электроприводы, реактивные системы, безредукторные моментные двигатели.

### MODERNIZATION OF FIGHTING ELEKTROPRIVOD MACHINES OF REACTIVE SYSTEMS OF A VOLLEY FIRE

I.O. Chumakevich, O.E. Sokul'skiy, I.I. Zelenyy, O.I. Kremeshnyy

In the article resulted suggestion on modernization of elektroprivod of fighting machines of the reactive systems of a volley fire by introduction of direct-drives.

**Keywords:** electric drive, reactive systems, direct-drive moment engines.