

А.В. РУДИЙ, Я.С. МІЩЕНКО, О.Є. ШАТАЛОВ

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИВОДІВ НА ЗРАЗКАХ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Розглянута проблема доцільності використання двигунів внутрішнього згорання на перспективних зразках озброєння та військової техніки. Проведено аналіз останніх досліджень та публікацій щодо зовнішніх характеристик дизельних та електричних двигунів з метою визначення перспектив їх застосування у складі силових установок бойових броньованих машин. Показано недосконалість існуючих науково-методичних підходів. Обґрунтовано актуальність науково-технічної проблеми вибору типу силової установки для перспективних зразків бойових броньованих машин. Аналіз модельного ряду асинхронних електричних двигунів вітчизняного виробництва вказав на значне зростання маси електроприводу у залежності від встановлюваної потужності, що значно обмежує діапазон використання тягових електроприводів на наземній військовій техніці середньої та важкої категорії за масою.

Ключові слова: озброєння та військова техніка, бойова броньована машина, двигун внутрішнього згорання, тяговий електричний двигун, силова установка

А.В. РУДИЙ, Я.С. МИЩЕНКО, О.Е. ШАТАЛОВ

АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрена проблема целесообразности использования двигателей внутреннего сгорания на перспективных образцах вооружения и военной техники. Проведен анализ последних исследований и публикаций по внешним характеристикам дизельных и электрических двигателей с целью определения перспектив их применения в составе силовых установок боевых бронированных машин. Показано несовершенство существующих научно-методических подходов. Обоснована актуальность научно-технической проблемы выбора типа силовой установки для перспективных образцов боевых бронированных машин. Анализ модельного ряда асинхронных электрических двигателей отечественного производства указал на значительный рост массы электропривода в зависимости от установочных мощности, что значительно ограничивает диапазон использования тяговых электроприводов на наземной военной технике средней и тяжелой категории по массе.

Ключевые слова: вооружение и военная техника, боевая бронированная машина, двигатель внутреннего сгорания, тяговий електрический двигатель, силовая установка

A. RUDIJ, YA. MISHCHENKO, O. SHATALOV

FEASIBILITY STUDY OF THE USE OF TRACTORY ELECTRIC DRIVES FOR SAMPLES OF ARMAMENT AND MILITARY TECHNIQUE

The feasibility problem is considered of internal combustion engines use on perspective models of weapons and military technique. The analysis of recent researches and publications concerning the external characteristics of diesel and electric motors was conducted in order to determine the prospects for their use in the armored vehicle power units. The imperfection of existing scientific and methodological approaches is shown. The relevance of the scientific and technical problem of choosing a power unit type for perspective models of armored combat vehicles is substantiated. The analysis of range of domestic production asynchronous electric motors is indicated a significant increase in electric drive mass, depending on the installation capacity, which significantly limits the range of use of traction electric drives on the ground military equipment of medium and heavy category by mass.

Keywords: armament and military technique, military armored vehicle, internal combustion engine, traction electric motor, power plant

Постановка проблеми. Досвід воєнних конфліктів останніх десятиріч, у тому числі військові дії на сході України, свідчать про те, що бойові броньовані машини (ББМ) продовжують відігравати важливу роль у вирішенні широкого спектру бойових завдань, що покладаються не тільки на підрозділи сухопутних військ, а і на підрозділи інших силових структур.

Сучасний парк ББМ Збройних Сил (ЗС) України, сформований у 70-х роках минулого століття, склад якого визначався вимогами воєнної доктрини, прийнятої в СРСР після Другої світової війни та орієнтованої на ведення наступальних фронтових та армійських операцій на усій території Європи в умовах застосування зброї масового ураження, не враховує змін умов бойового застосування ББМ, які відбулися з тих часів.

В основі існуючих підходів до розробки ББМ лежать фундаментальні підходи, що ґрунтуються на намаганні реалізувати в ББМ максимальні експлуатаційні властивості. При цьому вони не враховують змінених умов бойового застосування ББМ, обмежених економічних можливостей України та існуючих

інноваційних способів компоновок їх трансмісії. Це призводить до створення високовартісної, енергонасиченої техніки, параметри та режими функціонування якої не завжди відповідають реальним умовам її застосування.

Оборонний характер Воєнної доктрини України [1] дозволяє стверджувати те, що ББМ повинні бути максимально пристосовані до ведення бойових дій, у першу чергу, на власній території. В той же час, обмежені економічні можливості України зобов'язують до пошуку раціональних шляхів компоновки трансмісії перспективних ББМ для потреб її ЗС.

Для вирішення сучасних бойових задач необхідні ББМ, які б мали силову установку, спроможну підтримувати необхідні параметри рухомості в залежності від зміни вагових показників зразка ББМ та умов місцевості.

Проведений аналіз існуючих науково-методичних підходів [2, 3] щодо вибору компоновки

© А.В. Рудий, Я.С. Міщенко, О.Є. Шаталов, 2019

трансмисії ББМ показав, що вони не дозволяють достатньо враховувати необхідні показники тягових зусиль в умовах сучасного бойового застосування ББМ при різних навантаженнях на силову установку та визначати їх клас за призначенням. Зокрема, вони не дозволяють враховувати переваги сучасних підходів компоновки військової техніки (у тому числі роботизованої) з електричним тяговим приводом при різних умовах їх бойового застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Під час аналізу різних типів силових установок встановлено, що найбільшою популярністю користуються дизельні або бензинові двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Силові блоки з електричними та гібридними силовими установками зразків техніки військового спрямування знаходяться на етапі експериментальних випробовувань та використовуються на дослідних зразках, до прикладу: машина AHED з колісною формулою 8x8, з гібридною силовою установкою, бойова система Thunderbolt компанії United Defense з гібридною силовою установкою, бойова машина розвідки, спостереження та цілевказання RST-V та інші. Використання тягового електричного приводу, яка, наприклад, дозволяє зробити днище машини плоским і суцільним, забезпечує конструктивну перевагу. Метою військових, в першу чергу, є інтеграція сучасних підходів розробки перспективних зразків для власних ЗС. Наприклад, в американській програмі – бойовій системі майбутнього (FCS) – дизель-електричний комбінований привід став основною формою приводу, перетворившись на один з найважливіших елементів конфігурації всього сімейства машин. Незважаючи на призупинення програми FCS в цілому, результатом її став повноцінний окремий зразок самохідної гаубиці XM1203 NLOS-C з гібридною силовою установкою.

На даний момент близькі до серійних дослідні зразки машин, оснащені електричними приводами, проходять стадію випробувань (AHED фірми GDLS з електричним приводом в маточині колеса фірми Magnet-Motor).

Під час проектування зразка військової техніки виникає питання щодо оцінки його пробігу шляхом вибору конструктивних параметрів тягового приводу, що включають параметри електродвигуна, трансмісії і джерела живлення.

Існуючі методики вибору конструктивних параметрів тягового приводу електромобіля для досягнення заданого пробігу, засновані на вже добре вивчених характеристиках батарей (свинцево-кислотних, нікель-кадмієвих та ін.). Виробники сучасних тягових акумуляторних батарей (ТАБ) (нікель-металогідридних, літій-іонних і ін.) вказують ємності батарей і інші характеристики при різних умовах (температура, час і струм розряду), що ускладнює їх порівняльний аналіз і призводить до неоднозначного підходу у оцінці зарядно-розрядних характеристик, що істотно впливає на оцінку пробігу перспективного зразка техніки. Крім цього існуючі методики використовують спрощені рівняння руху елект-

ромобіля при постійній швидкості або в циклах, що не відповідають реальним умовам їх бойового застосування. Тому вдосконалення методик розрахунку і вибору конструктивних параметрів електромобіля з урахуванням процесу розряду сучасних ТАБ і повномасштабної моделі руху транспортного засобу в сучасних бойових умовах є актуальним напрямком розвитку методик з метою підвищення експлуатаційних характеристик перспективних зразків військової техніки під час його проектування [4].

Метою статті є проведення аналізу зовнішніх характеристик дизельних та електричних двигунів з метою визначення перспектив їх застосування у складі силових установок ББМ.

За результатами аналізу типових компоновальних схем існуючих зразків техніки з різними видами тягових приводів встановлено, що як одні, так і інші не позбавлені недоліків.

Одним із суттєвих недоліків силової установки з тяговим електричним двигуном та живленням виключно від акумуляторів є невисока автономність зразка техніки, оснащеного нею. Втім, важливою перевагою такого приводу є відносна його безшумність. Враховуючи це, такі технічні рішення доцільно використовувати на перспективних зразках ББМ невеликої маси, призначених для визначення спеціфічних завдань військової розвідки.

Вагомим недоліком тягового приводу від ДВЗ є його габаритні показники і відповідно нижчі тягові характеристики на початку руху зразка ББМ, а також велика кількість пально-мастильних матеріалів під час експлуатації на відміну від трансмісій з приводом від електродвигуна. Також слід пам'ятати про те, що дизельні двигуни зазвичай випромінюють звукові хвилі у спектрі низьких частот, що є значною демаскуючою ознакою.

У порівнянні з вищевказаними типами трансмісій більш збалансованими характеристиками володіють зразки ББМ з гібридними силовими установками. Принцип дії гібридних зразків техніки полягає у циклічній роботі системи «ДВЗ – накопичувач енергії – привід». В залежності від завдань, які ставляться перед конструкторами сучасних ББМ, можуть бути виконані за різними схемами, що мають як переваги, так і недоліки. За способом підключення двигуна та накопичувача енергії до приводу схеми поділяються на: послідовні, паралельні та паралельно-послідовні.

Послідовна схема виключає можливість механічного зв'язку ведучого колеса з первинним джерелом енергії, використовуються подвійне перетворення енергії, виникає необхідність використання електромашин та силового перетворювача на повну потужність двигуна привода, відносно висока вартість комплексу тягового обладнання. Проте електрична схема також доволі проста, її можна використовувати як з ДВЗ, так і з альтернативними джерелами енергії (паливними елементами тощо). Вона дозволяє стабілізувати режим роботи теплового двигуна в плані максимальної паливної ефективності, виключити конструктивні елементи механічної передачі, а також забезпе-

чити будь-яку компоновку елементів привода (відсутня передача енергії по механічному каналу).

Паралельна схема забезпечує передачу енергії на колеса як від ДВЗ, так і паралельно від електродвигуна. При цьому накопичувач енергії працює так само, як в послідовній схемі. Електродвигун компенсує нерівномірності роботи ДВЗ та коливання крутного моменту і при цьому забезпечує плавність ходу і економію палива за рахунок енергії, отриманої при рекуперативному гальмуванні. При невеликих навантаженнях рух може забезпечувати тільки електродвигун, а ДВЗ вмикається в роботу лише для підтримання необхідного тягового зусилля через диференціал, який забезпечує формування необхідного передавального числа трансмісії. Схема має відносно вищий ККД та хороші масогабаритні показники, до того ж вона відносно недорога (електрообладнання застосовується тільки на частину повної потужності). До недоліків схеми відноситься складність механічної синхронізації роботи ДВЗ та електропривода, обмеження в компоновці, необхідність застосування пристроїв механічної синхронізації (коробок передач спеціальної конструкції).

Комбінована схема поєднує переваги послідовної і паралельної схем за рахунок спеціального при-

строю узгодження роботи ДВЗ і електродвигуна (наприклад, несиметричний планетарний диференціал). У такій схемі може працювати як одне джерело енергії (ДВЗ або накопичувач електроенергії), так і відразу два (ДВЗ і накопичувач), а обертання передається на колеса як механічним, так і електричним двигунами, або тільки одним з них (будь-яким). Така схема забезпечує високу економічність, максимальну гнучкість в режимах роботи системи тягового привода, але є досить складною в розробці і реалізації, вимагає створення складних і дорогих механічних елементів [5, 6].

Головне завдання гібридного зразка БМ – зниження витрати палива, а також зниження шуму роботи силової установки в районах їх бойового застосування.

Аналіз існуючих зразків БМ, що знаходяться на озброєнні ЗСУ, показав, що найбільш вживаними для них є двигуни з діапазоном потужностей 87-330 кВт. На відміну від існуючих зразків БМ, що обладнані дизельними двигунами сучасні електродвигуни мають більші значення потужностей з діапазоном 109–778 кВт. Порівняльні характеристики двигунів внутрішнього згоряння та електродвигунів представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Зовнішні характеристики двигунів внутрішнього згоряння та електродвигунів

Марка машини	Маса машини, т	Марка двигуна	Потужність двигуна, к.с./(кВт)	Крутний момент, Нм
ДВЗ				
КрАЗ «Cougar»	4,2	Toyota 1GR-FE 4.0i	239/(178)	377
Козак	4,7	Iveco Daily 3.0TDI	176/(130)	400
Дозор-Б	6,3	Deutz BF4M 1013FC	118/(87)	700
БРДМ-2	7,0	Газ-41	140/(103)	350
Козак-2	11,0	Iveco Eurocargo 5.9	279/(205)	950
БТР-80	13,6	КамАЗ-7403	260/(191)	765
БМП-2	14,0	УТД-20С1	300/(221)	980
БТР-4Е	22,1	Deutz BF6M 1015CP	453/(330)	2080
ЕЛЕКТРОДВИГУНИ				
Tesla Model S	2,4	Трифазна асинхронна машина	420/(310)	600
Tesla Model X P90D	2,5		762/(560)	967
Tesla 3	1,6		238/(175)	430
Tesla Model S P100D	1,8		778/(572)	734
Chevrolet EV1	1,4		137/(100)	149
Nissan Leaf	1,5	Синхронна машина	109/(80)	280
BMW i3	1,3		170/(125)	250

Перспектива використання тягових електроприводів на зразках БМ обумовлена результатом аналізу наявних на ринку електроавтомобілів (Zero Emission), які є серійними і вже використовуються. Вагомою перевагою електродвигунів у порівнянні з ДВЗ є те, що максимальний крутний момент можна отримати від початку обертання валу двигуна, тобто від нуля обертів. З метою визначення різниці ефективності коефіці-

єнта тягового зусилля ДВЗ та електродвигунів для порівняння були обрані подібні за значеннями максимального крутного моменту двигуни Deutz BF4M 1013FC та Tesla Model S P100D (рис. 1). Характеристики зазначених двигунів були апроксимовані із точністю $R^2=0,99$ і отримані відповідні емпіричні залежності для дизельних двигунів (1) та для електродвигунів (2)

$$M_1(n) = 5,4315n^3 - 14,255n^2 + 11,642n - 2,0363; \quad (1)$$

$$M_2(n) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 < n \leq 0,429 \\ -1,3522n + 1,5737, & \text{якщо } 0,429 < n \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

З метою визначення ефективності застосування електродвигунів отримані функції коефіцієнтів корисного тягового зусилля (K_{kz}), які були проінтегровані в межах робочих обертів двигунів (3), (4).

$$K_{kzD} = \int_0^1 M_1(n)dn, \quad (3)$$

$$K_{kzE} = \int_0^1 M_2(n)dn = \int_0^{0,429} 1dn + \int_{0,429}^1 (-1,3522n + 1,5737)dn. \quad (4)$$

За результатом обчислення отриманих функцій K_{kz} для зазначених двигунів коефіцієнти складають: для електродвигуна – $K_{kzE} = 0,776$, для ДВЗ – $K_{kzD} = 0,518$, що дозволяє стверджувати про більш ефективне використання потужності електродвигунами, особливо в нижньому діапазоні обертання вала двигуна, який характеризує етап розгону зразка ББМ.

З метою обґрунтування комплексного коефіцієнту

доцільності використання електродвигунів на зразках ББМ необхідно провести аналіз залежності вагових параметрів електродвигунів від їх зовнішніх характеристик. Сучасні підходи з використанням інноваційних матеріалів та технологій під час розробки електродвигунів дозволяють отримувати тягові електродвигуни номінальної потужності до 600 кВт при їх масі до 70кг. Втім на вітчизняному ринку такі технології недоступні. На даний час в Україні активно впроваджується технологія обмотки асинхронних електродвигунів за комбінованою схемою «Слов'янка», яка використовує у якості основи існуючі на ринку промислові електродвигуни. Модернізовані таким чином двигуни використовуються під час розробки перспективних вітчизняних зразків автономного електротранспорту. Однак використання даної інновації не позбавляє сучасні вітчизняні тягові електричні двигуни основного недоліку – значного зростання маси при збільшенні необхідної потужності двигуна. Частково ця проблема вирішується шляхом підняття обертів двигуна, що дозволяє зменшити габаритні розміри. Але, в цілому, отримана емпіричним шляхом залежність маси тягового електроприводу від його потужності представлена на рис. 2 і виглядає як (5):

$$m_e(P) = -0,0121P^2 + 9,5691P - 183,1, \quad (5)$$

де m_e – маса тягового електродвигуна, кг;
 P – потужність тягового електродвигуна.

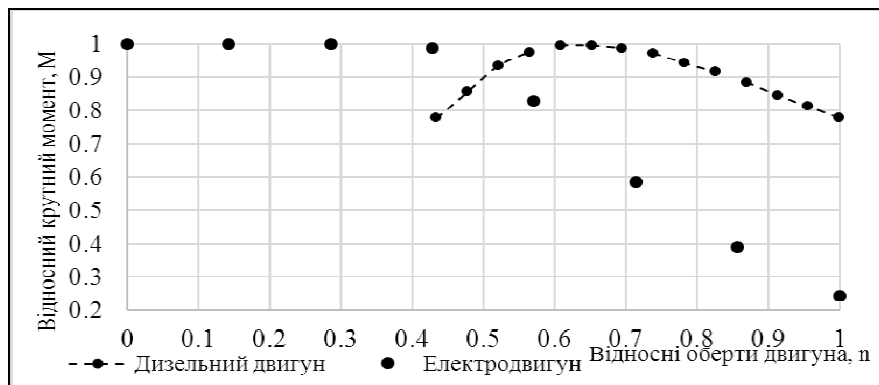


Рисунок 1 – Порівняльні характеристики двигунів Deutz BF4M 1013FC та Tesla Model S P100D

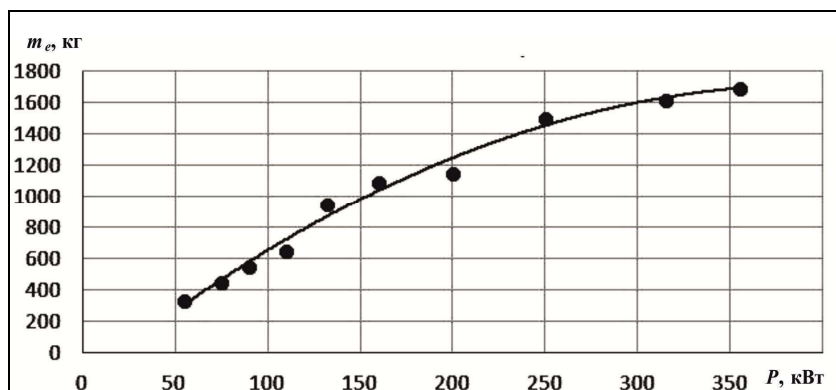


Рисунок 2 – Залежність маси асинхронних електродвигунів від їх потужності

Точність апроксимації функції $m_e(P)$ склала $R^2=0,9866$.

За результатами аналізу отриманої функції встановлено, що маси електродвигунів вітчизняного виробництва високої потужності є більшими від аналогічних за потужністю ДВЗ. Проте маси електродвигунів з меншими потужностями цілком порівняні з масами ДВЗ, що дає підстави стверджувати про наявність перспективи використання тягових електродвигунів невеликої потужності замість ДВЗ на ряді ББМ вузькоспеціалізованого призначення. Таким чином, постає наукова проблема пошуку та обґрунтування критеріїв, які дозволять визначити доцільність використання силових установок того чи іншого типу для перспективних зразків ББМ.

Висновки. За результатами проведених досліджень зроблені наступні висновки.

1. Зі зростанням рівня сучасних технологій набуває актуальності питання використання альтернативних джерел механічної енергії на наземних зразках військової техніки, зокрема тягового електроприводу.

2. Порівняльний аналіз зовнішніх характеристик дизельних та електричних силових установок вказує на переваги останніх з питання раціонального використання потужності.

3. Аналіз модельного ряду асинхронних електричних двигунів вітчизняного виробництва вказує на значне зростання маси електроприводу у залежності від встановлюваної потужності, що значно обмежує діапазон використання тягових електроприводів на наземній військовій техніці середньої та важкої категорії за масою.

4. Враховуючи вищезазначене, актуальним завданням залишається пошук критерію визначення доцільності використання тягових електроприводів для

перспективних зразків ББМ.

Список літератури

1. Воєнна доктрина України // Про нову редакцію Воєнної доктрини України: Указ Президента України від 24.09.2015р. № 555/2015. К.: РНБОУ, 2015. 27 с.
2. Теория и конструкция танка: [в 10 т.] М.: Машиностроение, 1990. – Т.1: Основы системы управления развитием военных гусеничных машин / [сост. Потемкин Э.К., Вильховченко Н.Н. и др.; ред. Исакова П.П.]. 1982. 212 с.
3. Теория, конструкция и расчёт боевых колёсных машин / [Агейкин Я.С., Антонов Д.А и др.; ред. Медведкова В.И.] Москва: Академия бронетанковых войск, 1976. 405 с.
4. Advanced Hybrid Vehicle Propulsion System Study – Режим доступу: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19830016161.pdf>
5. Beunk H. Stepless changing with diesel-electric power. Profi International. 1999. № 12. P. 28–30.
6. Ксеневиц И. П., Изосимов Д. Б. Идеология проектирования электромеханических систем для гибридной мобильной техники // Тракторы и сельхозмашины. 2007. № 2. С. 12–20.

References (transliterated)

1. *Voenna doktrina Ukraini* // Pro novu redakciyu Vo-ennoi doktrini Ukraini: Ukaz Prezidenta Ukraini vid 24.09.2015r. № 555/2015. Kyiv: RNBOU, 2015. 27 p.
2. *Teoriya i konstrukciya tanka*: [v 10 t.] M.: Mashinostroenie, 1990. – T.1: Osnovy sistemy upravleniya razvitiem voennyh gusenichnyh mashin / [sost. Potemkin E.H.K., Vil'hovchenko N.N. i dr.; red. Isakova P.P.]. 1982. 212 p.
3. *Teoriya, konstrukciya i raschyot boevykh kolyosnyh mashin* / [Agejkin Y.A.S., Antonov D.A i dr.; red. Medvedkova V.I.] Moscow: Akademiya bronetankovyh vojsk, 1976. 405 p.
4. *Advanced Hybrid Vehicle Propulsion System Study* – Режим доступу: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19830016161.pdf>
5. Beunk H. Stepless changing with diesel-electric power. Profi International. 1999, no 12, pp. 28–30.
6. Ksenevich I. P., Izosimov D. B. Ideologiya proekti-rovaniya ehlektromekhanicheskikh sistem dlya gibridnoj mobil'noj tekhniki // *Traktory i sel'hozmashiny*. 2007, no 2, pp. 12–20.

Надійшло (received) 22.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рудий Андрій Володимирович (Рудий Андрей Владимирович, Rudij Andrij) – кандидат технічних наук, Національна Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, викладач кафедри бронетанкової техніки, Львів, тел. 093-995-61-57, E-mail: rasty82@ukr.net

Мищенко Ярослав Сергійович (Мищенко Ярослав Сергеевич, Mishchenko Yaroslav) – кандидат технічних наук, Національна Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, старший викладач кафедри бронетанкової техніки, Львів, тел. 093-720-82-66, E-mail: sl.1983@ukr.net

Шаталов Олег Євгенійович (Шаталов Олег Евгеньевич, Shatalov Oleg) – кандидат технічних наук, Національна Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, доцент кафедри бронетанкової техніки, Львів, тел. 097-457-38-31, e-mail: shatl-oleg-ua@ukr.net