

УДК 629.017

К.Г. Яценко<sup>1</sup>, О.А. Бобошко<sup>2</sup><sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

## АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАНЕВРНОСТІ ЗАСОБІВ РУХОМОСТІ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСІВ ТА ВИБІР КРИТЕРІЇВ ЇХ ОЦІНКИ

Проведено аналіз досліджень щодо маневреності засобів рухомості зенітних ракетних комплексів. Запропоновано структуру властивостей маневреності, що враховує особливості їх експлуатації та дозволяє перейти до вибору оціночних адаптивних критеріїв у складних умовах руху. В якості вказаних критеріїв запропоновано використовувати частоту власних коливань засобів рухомості зенітних ракетних комплексів у площині дороги й коефіцієнт динамічності коливань.

**Ключові слова:** засоби рухомості, зенітні ракетні комплекси, маневреність, керованість, динамічність, власні коливання, критерії, експлуатація.

### Вступ

**Постановка задачі.** Досвід останніх локальних військових конфліктів, сучасні погляди на ведення збройної боротьби вказують на необхідність мати у військах такі засоби рухомості (ЗР) зенітних ракетних комплексів (ЗРК), які б мали гарні експлуатаційні властивості й могли забезпечити паритет або військово-технічну перевагу перед аналогічними засобами рухомості армії імовірного супротивника.

Маневреність є однією з найважливіших експлуатаційних властивостей ЗР ЗРК, що визначає бойову ефективність їх використання й безпеку руху. Необхідність використання багатовісних машин і автопоїздів у якості ЗР ЗРК обумовлює актуальність подальшого дослідження показників їх маневреності.

Використання в їхній конструкції багатовісної і, відповідно, багатоопорної ходової частини погіршує стійкість руху через необхідність розташування колісних осей однієї від іншої на відстанях, менших, ніж поздовжня колісна база засобу рухомості. Це зменшує стабілізуючу дію коліс осей, внаслідок чого погіршується стійкість машини.

**Аналіз публікацій.** Питанням стійкості й керованості багатовісних ЗР приділялася значно менша увага, ніж двохвісним. Дослідженню параметрів маневреності багатовісних ЗР присвячені роботи [1 – 7]. Оскільки для забезпечення стійкості прямолінійного усталеного руху водій постійно впливає на кермо, то автори роботи [6] показали, що для даного режиму руху керованість є однією із властивостей більш загальної комплексної властивості – курсової стійкості. У зазначеній роботі [6] запропоновано показник, що характеризує керованість і стійкість усталеного руху, у якості якого прийнята власна частота коливань колісної машини в площині дороги. Однак отримані в роботі [6] аналітичні вирази для визначення власної частоти коливань колі-

сної машини в площині дороги не враховують особливостей ЗР ЗРК. Ці особливості стосуються, насамперед, розташування колісних осей однієї від іншої на певних відстанях, менших, ніж колісна база машини. Таким чином, питання вибору адаптивних критеріїв для оцінки показників маневреності ЗР ЗРК вимагають додаткових досліджень.

**Метою статті є** вибір адаптивних критеріїв для оцінки показників маневреності ЗР ЗРК у складних умовах руху.

### Основний матеріал

До формулювання поняття «маневреність» і її властивостей можуть бути застосовані різні підходи. Найбільш відомим дослідженням, присвяченим маневреності ЗР, є робота Я. Х. Закіна [9]. Стійкість ЗР ЗРК розглядається у двох аспектах – стійкість руху й стійкість положення. Крім того, слід розрізняти траєкторну й курсову стійкість. Необхідно враховувати при оцінці легкості керування не тільки опір повороту керованих коліс, але й опір руху ЗР ЗРК на повороті. І те й інше визначає здатність підсистеми «ЗР ЗРК – дорожнє середовище» не чинити значного опору керуючим впливам. Ступінь повертаємості характеризує чутливість машини до зміни швидкості руху на повороті. Традиційно вважалося, що ступінь повертаємості ЗР ЗРК залежить тільки від співвідношення коефіцієнтів опору відведенню коліс різних осей, а також – від координат центру мас машини в горизонтальній площині. Це співвідношення визначає, яку ступінь повертаємості має ЗР ЗРК – нейтральну, надлишкову або недостатню. Ступінь повертаємості машини (при заданому тиску повітря в шинах) вважалося величиною постійною й підбиралася при проектуванні. Однак, ступінь повертаємості ЗР у процесі руху можна змінювати, створюючи додатковий момент, що повертає у площині дороги за рахунок створення різниці дотичних реакцій на колесах різних бортів.

Важливою властивістю ЗР ЗРК, яка характеризує можливість виконувати повороти з максимальною кривизною (мінімальним радіусом) на дорозі та на місцевості, є поворотливість. Чим більша кривизна можливої траєкторії, тобто чим менше радіус повороту машини, тим краще поворотливість. Мінімальний радіус повороту служить показником статичної повороткості ЗР ЗРК. Цей показник найбільш важливий, але не дає вичерпної характеристики поворотливості. У ряді випадків важливий не тільки сам факт повороту машини з певним радіусом, але й те, за який час і на який кут зможе повернутися машина або наскільки знизиться її швидкість у процесі повороту в порівнянні із прямолінійним рухом. Такі дані характеризують вже динамічну поворотність. На думку авторів, динамічну поворотність ЗР ЗРК зручно оцінювати по величині кутової швидкості машини при русі на повороті. Якщо поворотність ЗР ЗРК проявляється незалежно від зовнішніх обмежень на опорній поверхні й суттєво залежить від

таких конструктивних параметрів як габаритні розміри, компоновання (довжина бази, передній і задній звиси, ширина), граничний радіус повороту, то вписуваність враховує обмеження на опорній поверхні. При наявності причіпних ланок в автомобільних потягів існує їхня внутрішня вписуваність у габаритну смугу або в колію ведучого тягача при їхньому криволінійному русі.

Поворот ЗР ЗРК супроводжується зміною напрямку поздовжньої осі машини щодо первісного напрямку руху. При цьому курсовим кутом вважається кут між напрямками поздовжньої осі ЗР ЗРК у розглянутий і початковий моменти часу. На наш погляд, курсовий кут – це кут між напрямками векторів швидкості центру мас машини в початковий і розглянутий моменти часу.

На рис. 1 представлено запропоновану структуру властивостей маневреності ЗР ЗРК, що враховує особливості їх експлуатації. Пунктирною лінією показані відмінності структури від раніше відомої [5].

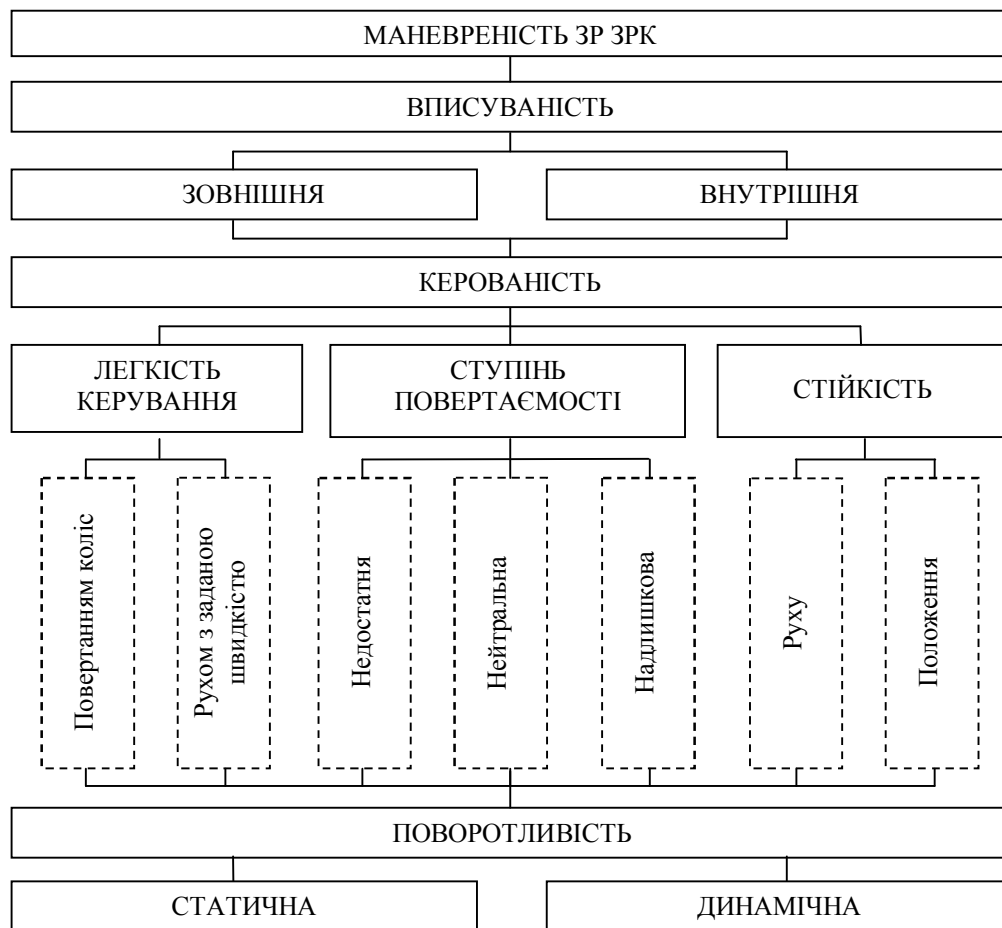


Рис. 1. Запропонована структура властивостей маневреності засобів рухомості зенітних ракетних комплексів при русі їх по криволінійній траєкторії

У зв'язку з тим, що нами запропонована нова структура властивостей маневреності ЗР ЗРК, то вимагає уточнення й структура критеріїв оцінки. У табл. 1 наведені критерії оцінки властивостей маневреності з урахуванням внесених доповнень [5]. У

зазначеній таблиці прийняті такі позначення:  $\bar{\alpha}$  – середній кут повороту керованих коліс;  $k_{b1}$ ,  $k_{b2}$  – коефіцієнти опору відведенню коліс передньої й задньої осей;  $L$  – поздовжня колісна база машини, м;  $R_c$  – радіус повороту центру мас машини, м;  $\varphi$ ,  $f$  – коефі-

цієнти зчеплення коліс із дорогою й опору коченню;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $a, b$  – відстані від передньої й задньої осей до проекції центру мас машини на горизонтальну площину,  $m$ ;  $h, m$  – висота центру мас машини й загальна маса машини,  $m$ ;  $R_x$  – сумарна реакція уздовж осі  $OX$  на колесах машини,  $N$ ;  $i_z$  – радіус інерції машини щодо вертикальної осі.

Аналіз табл. 1 показує, що хоча поняття маневреності ЗР і вплив на неї основних і експлуатаційних факторів визначені досить повно, єдиного оціночного показника або критерію маневреності поки немає. З метою вибору адаптивних критеріїв оцінки показників

маневреності ЗР ЗРК скористаємося теорією коливальних.

Забезпечення постійного курсового кута й заданого радіуса повороту ЗР ЗРК при усталеному русі здійснюється водієм (або автоматичним керуючим пристроєм) шляхом постійного впливу на кермо. Зазначений вплив має коливальний характер із частотою, що досягає 0,7 Гц. Частота власних коливань у площині дороги ЗР ЗРК із недостатньою повертаємістю також перебуває в діапазоні від 0,4 Гц до 0,7 Гц, що створює умови для виникнення резонансу й зрушення коливань по фазі на  $180^\circ$  [8]. Це може привести до порушення керованості й стійкості ЗР ЗРК.

Таблиця 1

Критерії оцінки властивостей маневреності засобів рухомості ЗРК

№ з/п	Критерій	Позначення	Формула для розрахунку	Властивість маневреності
1.	Критична лінійна швидкість руху машини при маневрі – по відведенню; – по заносу; – по перекиданню	$V_{кр}$	$V_{кр} = \sqrt{\frac{L}{m_2^n (k_{b_2} - m_1^n) k_{b_1}}}$	Керованість, стійкість
		$V_{зан}$	$V_{зан} = \sqrt{R_c \cdot \varphi_g \cdot \sqrt{1 - R_x^2 \frac{L^2}{a^2 m^2 \varphi^2 g^2}}}$	
		$V_{пер}$	$V_{пер} = \sqrt{\frac{B \cdot R_c \cdot g}{2h}}$	
2.	Ступінь нестійкості	$\Lambda$	$\Lambda = (V - \varphi g L /  V ) / (a + i_z^2 / a)$	Стійкість
3.	Бічна реакція на задній осі	$R_{\delta_2}$		
4.	Різниця кутів відведення передньої й задньої осей	$\delta_1 - \delta_2$	$\frac{R_{\delta_1}}{k_{y_1}} - \frac{R_{\delta_2}}{k_{y_2}}$	Ступінь повертаємості
5.	Момент, що повертає	$M_{пов}$	$M_{пов} = \frac{mg\varphi}{2} L \cdot \sin \bar{\alpha}$	Легкість керування
6.	Дотична реакція на ведучих колесах	$R_{K_{вед}}$		
7.	Необхідне відносне збільшення кінетичної енергії машини (потужності двигуна)	$\delta w$	$\delta w = \left( \frac{1}{2} \frac{b^2}{L^2} + \frac{i_z^2}{L^2} \right) \text{tg} \bar{\alpha}$	

У роботі [8] наведено результати експериментальних досліджень керованості колісних машин, які показали, що частота синусоїдальної кривої, використовуваної для здійснення маневру по траєкторії усіченої синусоїди за рахунок відповідного повороту керма становить 0,7 Гц. Використання маневрів з цією частотою приводить до того, що час від завершення першого повороту кермового колеса (перший пік) до завершення повороту у зворотному напрямку (другий пік) становить приблизно 0,714 с незалежно від заданої величини кута повороту кермового колеса [8]. Ці результати були отримані на підставі численних досліджень верхньої межі здатності людини робити поворот при маневрах з подвійним переходом з однієї смуги на іншу.

Частота власних коливань ЗР ЗРК у площині дороги може бути визначена з такої залежності:

$$v_b = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{y_1} a_1^2 + \frac{C_{y_2}}{C_{y_1}} a_2^2 + \frac{C_{y_3}}{C_{y_1}} a_3^2 + \frac{C_{y_4}}{C_{y_1}} a_4^2 - \Omega}{m_a \left( i_z^2 + \frac{\Omega}{1 + \frac{C_{y_2}}{C_{y_1}} + \frac{C_{y_3}}{C_{y_1}} + \frac{C_{y_4}}{C_{y_1}}} \right)}}, \quad (1)$$

де  $\Omega = \frac{\left( a_1 + \frac{C_{y_2}}{C_{y_1}} a_2 - \frac{C_{y_3}}{C_{y_1}} a_3 - \frac{C_{y_4}}{C_{y_1}} a_4 \right)^2}{1 + \frac{C_{y_2}}{C_{y_1}} + \frac{C_{y_3}}{C_{y_1}} + \frac{C_{y_4}}{C_{y_1}}}$ ;

$C_{y_1}, C_{y_2}, C_{y_3}, C_{y_4}$  – сумарні коефіцієнти бічної жорсткості шин відповідних осей ЗР ЗРК;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – відстані від відповідних осей до проекції центру мас ЗР ЗРК на горизонтальну площину,  $m$ .

Для двохвісного ЗР ЗРК:  $C_{y_2} = 0$ ,  $C_{y_2} = 0$ ,  $a_1 = a$ ,  $a_4 = b$ , а для тривісного ЗР ЗРК  $C_{y_2} = 0$ .

Вимушені коливання відбуваються із частотою збуджуючої сили (у розглянутому випадку – крутного моменту), при цьому, якщо частота власних коливань більше частоти збуджуючої сили, зрушення фаз між коливаннями й силою (моментом) відсутнє. Якщо частота збуджуючої сили більше власної частоти, має місце зрушення фаз на  $\pi$  ( $180^\circ$ ). При рівності частот власних і вимушених коливань відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань, що одержало назву резонансу.

При відсутності демпфірування ( $\alpha_d = 0$  і  $2n = 0$ ) амплітуда вимушених коливань зростає нескінченно. На оточенні точки резонансу величина амплітуди вимушених коливань ЗР ЗРК оцінюється за допомогою коефіцієнта динамічності коливань  $K_{dk}$  [6]

$$K_{dk} = \left[ \left( 1 - v_{зб}^2 / v_{вл}^2 \right)^2 + n^2 / (4\pi^2) \cdot v_{зб}^2 / v_{вл}^4 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

де  $v_{зб}$  – частота збуджуючого повертаючого моменту, Гц;  $v_{вл}$  – частота власних коливань ЗР ЗРК у площині дороги, Гц.

Таким чином, при  $v_{зб} < v_{вл}$ , чим ближче значення коефіцієнта динамічності  $K_{dk}$  до одиниці, тим краще керуваність і, відповідно, стійкість прямолінійного встановленого руху ЗР ЗРК.

## Висновки

1. Проведений аналіз літературних джерел показав, що, незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених маневреності колісних машин, питанням керуваності, особливо при вході ЗР ЗРК у поворот, приділено недостатньо уваги. Встановлено, що на керуваність ЗР ЗРК значний вплив чинять бічні реакції, які виникають у контактні коліс із дорогою при повороті.

## АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАНЕВРЕННОСТИ СРЕДСТВ ПОДВИЖНОСТИ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ИХ ОЦЕНКИ

К.Г. Яценко, А.А. Бобошко

*Проведен анализ исследований маневренности средств подвижности зенитных ракетных комплексов. Предложена структура свойств маневренности, учитывающая особенности их эксплуатации и позволяющая перейти к выбору оценочных адаптивных критериев в сложных условиях движения. В качестве указанных критериев предложено использовать частоту собственных колебаний средств подвижности зенитных ракетных комплексов в плоскости дороги и коэффициент динамичности колебаний.*

**Ключевые слова:** средства подвижности, зенитные ракетные комплексы, маневренность, управляемость, динамичность, собственные колебания, критерии, эксплуатация.

## ANALYSIS OF MANEUVERABILITY PROPERTIES OF ANTI-AIRCRAFT MISSILE SYSTEMS MOBILITY MEANS AND SELECTION OF THEIR EVALUATION CRITERIA

K.G. Yatsenko, A.O. Boboshko

*An analysis of maneuverability researches of anti-aircraft missile systems mobility means is conducted. The structure of maneuverability properties, that takes into account the peculiarities of their operation and permits the selection of evaluation adaptive criteria in difficult motion conditions, is proposed. As the given criteria it is proposed to use the frequency of natural oscillations of the anti-aircraft missile systems mobility means in road plane and the coefficient of dynamic fluctuations.*

**Keywords:** means of mobility, anti-aircraft missile systems, maneuverability, controllability, dynamics, natural oscillations, criteria, operation.

2. Запропонована структура властивостей маневреності ЗР ЗРК, що враховує особливості їх експлуатації, дозволяє перейти до вибору адаптивних критеріїв для оцінки показників маневреності ЗР ЗРК у складних умовах руху. Для розв'язання даного завдання запропоновано використовувати частоту власних коливань ЗР ЗРК у площині дороги й коефіцієнт динамічності коливань.

## Список літератури

1. Аксенов П.В. Многоосные автомобили / П.В. Аксенов. – М.: Машиностроение, 1989. – 280 с.
2. Антонов Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. – М.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
3. Завьялова Л.И. Повышение устойчивости движения многоосного автомобиля за счет рационального выбора числа колесных осей и схемы рулевого управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец 05.22.02 "Автомобили и тракторы" / Л.И. Завьялова – К., 1997. – 27 с.
4. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
5. Маневренность и тормозные свойства автомобилей / М.А. Подригало, В.П. Волков, В.И. Кирчатый, А.А. Бобошко, под ред. М.А. Подригало. – Х.: ХНАДУ, 2003. – 403 с.
6. Подригало М.А. Управляемость колесных машин при установившемся движении / М.А. Подригало, Д.М. Клец, В.И. Гацько // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, 2011. – Вып. 29. – С. 117-125.
7. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин / Г.А. Смирнов. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
8. Forkenbrock, Garrick I. and Devin Elsassner, An Assessment of Human Driver Steering Capability, NHTSA Technical Report, DOT HS 809875, October 2005. – Режим доступа: [http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/vrte/ca/capubs/HNTSA\\_forkenbrock\\_driversteeringcapabilityrpt.pdf](http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/vrte/ca/capubs/HNTSA_forkenbrock_driversteeringcapabilityrpt.pdf).
9. Закин Я. Х. Маневренность автомобиля и автопоезда / Я. Х. Закин. – М.: Транспорт, 1986. – 136 с.

Надійшла до редколегії 14.10.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Х.В. Раковський, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.