

УДК 629.017

М.А. Подригало¹, К.Г. Яценко², И.В. Рогозин²¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков²Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ СРЕДСТВ ПОДВИЖНОСТИ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОЗДУШНЫХ СИЛ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ УКРАИНЫ

В статье приводятся результаты теоретического исследования динамических свойств автомобилей и автопоездов, используемых в качестве средств подвижности (СП) зенитных ракетных комплексов (ЗРК). Предложен метод выбора рационального значения коэффициента динамичности средств подвижности.

Ключевые слова: динамические свойства, коэффициент динамичности, коэффициент использования сцепного веса, средство подвижности, эффективная мощность двигателя.

Введение

Постановка проблемы: При проектировании средств подвижности возникает необходимость рационального выбора коэффициента запаса мощности двигателя, обеспечивающего требуемые показатели динамических свойств [1]. Коэффициент динамичности автомобиля (автопоезда), определяемый коэффициентом запаса двигателя, выбирается из условия преодоления различных подъемов, совершения поворота и разгона машины.

Анализ последних исследований и публикаций. Коэффициент динамичности был предложен в [1, 2] в качестве показателя динамических свойств автомобилей и представляет собой отношение тяговой силы на ведущих колесах автомобиля P_K к суммарной силе сопротивления движению $\sum P_C$, т.е.

$$K_{\text{дин}} = P_K / \sum P_C. \quad (1)$$

Коэффициент динамичности $K_{\text{дин}}$ определяет запас мощности двигателя автомобиля, необходимый для сохранения заданной средней скорости движения при появлении дополнительного сопротивления движению и для разгона на отдельных этапах пути. Такой подход использовался в работе [1, 2] для определения на стадии проектирования мощности двигателей легковых автомобилей. В указанных исследованиях коэффициент динамичности определялся только из условия создания требуемого максимального ускорения легкового автомобиля на горизонтальном участке дороги. В то же время динамические свойства автомобилей и автопоездов, используемых в качестве СП ЗРК Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины на стадии проектирования остаются недостаточно исследованными.

Целью исследования является определение параметров динамичности автомобилей и автопоездов, используемых в качестве СП ЗРК Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины.

Основной материал

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить максимальное значение эффективной мощности двигателя средств подвижности;
- определить минимальное значение коэффициента использования сцепного веса средств подвижности в тяговом режиме;
- определить диапазон рациональных значений коэффициента динамичности СП.

Определение максимальной мощности двигателя

Средства подвижности ЗРК могут перемещаться как по дорогам с твердым покрытием, так и по бездорожью. Рассмотрим движение ЗРК в составе автопоезда по горизонтальному прямолинейному участку дороги с твердым покрытием с заданной средней скоростью V_a . Мощность, развиваемая двигателем в этом случае, равна

$$N_{e0} = \frac{V_a}{\eta_{\text{тр}}} \left(m_{\text{зрк}} \cdot g \cdot f + \frac{C_x}{2} \rho \cdot F \cdot V_a^2 \right), \quad (2)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии; $m_{\text{зрк}}$ – общая масса ЗРК, кг; g – ускорение свободного падения, ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$); f – коэффициент сопротивления качению; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; F – лобовая площадь (модель) ЗРК, м^2 .

При появлении продольного уклона (подъема) для сохранения заданной средней скорости V_a необходима дополнительная мощность двигателя

$$N_{e1} = V_a \cdot m_{\text{зрк}} \cdot g \cdot i / \eta_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где i – величина продольного уклона (подъема) дороги.

В работе [3] показано, что при движении автомобиля на повороте также необходим запас мощности двигателя, который включает в себя три компо-

нента. Первая компонента необходима для обеспечения установившегося поворота с угловой скоростью ω_z и линейной скоростью V_a :

$$N_{e2} = \frac{V_a \cdot m_{ЗРК}}{\eta_{тр}} \cdot (h - r_d) \cdot f \cdot \omega_z^2, \quad (4)$$

где r_d – динамический радиус ведущих колес, м; h – высота центра масс ЗРК, м.

При установившемся повороте

$$\omega_z = V_a / R, \quad (5)$$

где R – радиус поворота на установившейся стадии, м.

После подстановки (5) в (4) получим

$$N_{e2} = \frac{V_a^3 \cdot m_{ЗРК}}{\eta_{тр}} \cdot f \cdot \frac{h - r_d}{R^2}. \quad (6)$$

В установившейся стадии поворота мощность, необходимая для поддержания созданного рулевым управлением требуемого углового ускорения $d\omega_z/dt$ (управляющего воздействия на СП при повороте), равна

$$N_{e3} = \frac{V_a \cdot m_{ЗРК}}{\eta_{тр}} \cdot \frac{R^2 + b^2 + i_z^2 \cdot f \cdot b \cdot (h - r_d)}{R} \cdot \frac{d\omega_z}{dt}, \quad (7)$$

где b – расстояние от проекции центра масс на горизонтальную плоскость до задней оси, м.

Дифференцируя уравнение (5) по времени, получим

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{1}{R^2} \cdot \left(\dot{V}_a \cdot R - V_a \frac{dR}{dt} \right), \quad (8)$$

где \dot{V}_a – линейное ускорение ЗРК, м/с².

После подстановки уравнения (8) в выражение (7) получим

$$N_{e3} = \frac{V_a \cdot m_{ЗРК}}{\eta_{тр}} \left(1 + \frac{b^2 + i_z^2 + f \cdot b \cdot (h - r_d)}{R^2} \right) \times \left(\dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt} \right), \quad (9)$$

где i_z – величина радиуса инерции, м.

Из уравнения (9) видно, что при $R \rightarrow \infty$ указанная формула упрощается и принимает вид

$$N_{e3} = m_{ЗРК} \cdot V_a \cdot \dot{V}_a / \eta_{тр}. \quad (10)$$

Выражение (10) было получено в работе [1, 2] при определении мощности двигателя на разгон ЗРК по прямолинейному горизонтальному участку дороги.

Таким образом, необходимая эффективная мощность двигателя должна состоять из четырех компонентов N_{e0} ; N_{e1} ; N_{e2} ; N_{e3} и не превышать значения максимальной эффективной мощности двигателя $N_{e\max}$, выбранной при проектировании, т.е.

$$N_e = N_{e0} + N_{e1} + N_{e2} + N_{e3} \leq N_{e\max}. \quad (11)$$

Уравнение (11) с учетом (3), (6), (9) примет вид

$$N_e = \frac{V_a \cdot m_{ЗРК}}{\eta_{тр}} \left\{ g \cdot (f + i) + V_a^2 \left[\frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{ЗРК}} + \frac{f \cdot (h - r_d)}{R^2} \right] + \right.$$

$$\left. + \left(\dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt} \right) \right\} \leq N_{e\max}. \quad (12)$$

От выражения (12) удобно перейти к удельной мощности СП

$$N_{уд} = N_e / m_{ЗРК}, \quad (13)$$

что позволит унифицировать расчет потребной мощности двигателя для гаммы СП, составляющих типоразмерный ряд.

После подстановки (12) в (13) получим

$$N_{уд} = \frac{V_a}{\eta_{тр}} \left\{ g \cdot (f + i) + V_a^2 \left[\frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{ЗРК}} + \frac{f \cdot (h - r_d)}{R^2} \right] + \right. \\ \left. + \dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt} \right\}. \quad (14)$$

Необходимое значение коэффициента динамичности

$$K_{дин} = \frac{N_e}{N_{e0}} = \frac{N_{уд}}{N_{уд0}}, \quad (15)$$

где $N_{уд0}$ – удельная мощность СП, соответствующая N_{e0} , кВт/кг.

После подстановки (2) и (12) в (15) получим

$$K_{дин} = 1 + \frac{g \cdot i + f \cdot \frac{h - r_d}{R^2} V_a^2 + \dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt}}{f \cdot g + V_a^2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot F / (2m_{ЗРК})}. \quad (16)$$

Выражение (16) можно представить в виде

$$K_{дин} = 1 + K_{зап}, \quad (17)$$

где $K_{зап}$ – коэффициент запаса мощности двигателя по обеспечению требуемых динамических свойств

$$K_{дин} = \frac{g \cdot i + f \cdot \frac{h - r_d}{R^2} V_a^2 + \dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt}}{f \cdot g + V_a^2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot F / (2m_{ЗРК})}. \quad (18)$$

Определение минимального значения коэффициента использования сцепного веса

Реализация максимальной эффективной мощности двигателя N_e возможна при соответствующем значении предельной силы по сцеплению ведущих колес с дорогой. Условием такой реализации является следующее:

$$(N_e / V_a) \cdot \eta_{тр} \leq K_{сц} \cdot m_{ЗРК} \cdot g \cdot (\varphi_{x\max} + f), \quad (19)$$

где $\varphi_{x\max}$ – максимальный продольный коэффициент сцепления колес с дорогой; $K_{сц}$ – коэффициент использования сцепного веса СП, равный отношению суммы нормальных реакций дороги на ведущие колеса к общему весу ЗРК (автопоезда),

$$K_{сц} = \sum R_{zn} / (m_{ЗРК} \cdot g), \quad (20)$$

R_{zn} – суммарная нормальная реакция дороги на колесо n -ой ведущей оси.

Выражение (19) преобразуем к виду

$$N_{уд} \leq K_{сц} \cdot V_a \cdot g \cdot (\varphi_{x\max} + f) / \eta_{тр}. \quad (21)$$

После подстановки в неравенство (21) выражение (14) определим условие буксования ведущих колес

$$K_{\text{сц}} \geq \frac{f + i + V_a^2 \left(\frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}} \cdot g} + f \frac{h - r_d}{g \cdot R^2} \right) + \frac{1}{g} \left(\dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt} \right) / \left((\varphi_{x \max} + f) \cdot \eta_{\text{тр}} \right)}{(\varphi_{x \max} + f) \cdot \eta_{\text{тр}}} + \frac{1}{g} \left(\dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt} \right) / \left((\varphi_{x \max} + f) \cdot \eta_{\text{тр}} \right). \quad (22)$$

Уравнение (15) можно представить в виде

$$N_{\text{уд}} = N_{\text{уд}0} \cdot K_{\text{дин}} = N_{\text{уд}0} \cdot (1 + K_{\text{зап}}) = \frac{V_a}{\eta_{\text{тр}}} \left(f \cdot g + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2 \right) \cdot (1 + K_{\text{зап}}). \quad (23)$$

В уравнении (23)

$$N_{\text{уд}0} = \frac{V_a}{\eta_{\text{тр}}} \left(f \cdot g + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2 \right) (1 + K_{\text{зап}}). \quad (24)$$

Подставляя (23) в (21), получим после преобразований условие отсутствия буксования ведущих колес

$$K_{\text{сц}} \geq \frac{f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2}{\varphi_{x \max} + f} (1 + K_{\text{зап}}). \quad (25)$$

Однако величина $K_{\text{сц}}$ не может быть больше единицы. Из неравенства

$$\left(\left(f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2 \right) / (\varphi_{x \max} + f) \right) \cdot (1 + K_{\text{зап}}) \leq 1. \quad (26)$$

Диапазон рациональных значений коэффициента динамичности

Определяем условие ограничения $K_{\text{зап}}$ по сцеплению ведущих колес с дорогой

$$K_{\text{зап}} \leq \frac{\varphi_{x \max} + f}{\left(f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2 \right)} - 1. \quad (27)$$

Условие ограничения коэффициента динамичности (с учетом соотношения (17)):

$$K_{\text{дин}} \leq \frac{\varphi_{x \max} + f}{\left(f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2 \right)}. \quad (28)$$

Таким образом, рассматривая значения $K_{\text{дин}}$, получаемые расчетом из выражений (16) и (28), определим допустимый диапазон значений $K_{\text{дин}}$ для ЗРК (автопоезда)

$$1 + \frac{g \cdot i + f \frac{h - r_d}{R^2} V_a^2 + \dot{V}_a - \frac{V_a}{R} \frac{dR}{dt}}{f \cdot g + V_a^2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot F / (2m_{\text{ЗРК}})} \leq K_{\text{дин}} \leq \frac{\varphi_{x \max} + f}{\left(f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot F}{2m_{\text{ЗРК}}} V_a^2 \right)}. \quad (29)$$

Выводы

В результате проведенного исследования получены аналитические выражения, позволяющие определять требуемую мощность средств подвижности ЗРК с учетом запаса на преодоление кратковременных дополнительных сопротивлений движению. Определен допустимый диапазон изменения коэффициента динамичности $K_{\text{дин}}$, при попадании в который средство подвижности будет обладать требуемым динамическими свойствами.

Список литературы

1. Динамика автомобиля. Монография / М.А. Подригало, В.П. Волков, А.А. Бобошко, В.А. Павленко, В.Л. Фаист, Д.М. Клец, В.В. Редько; под ред. М.А. Подригало. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 424 с.
2. Фаист В.Л. Удосконалення вимог до динамічних властивостей легкових автомобілів: автореферат, дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / В.Л. Фаист. – Х., 2012. – 20 с.
3. Подригало М.А. Энергетический аспект обеспечения маневренности автомобилей / М.А. Подригало, Д.М. Клец // Транспортна Академія України: 20 років (1992-2012). – К.: НТУ, 2012. – С. 182-191.

Поступила в редколлегию 14.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.С. Полянский, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДИНАМІЧНОСТІ ЗАСОБІВ РУХОМОСТІ ЗЕНІТНИХ РАКЕТНИХ КОМПЛЕКСІВ ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

М.А. Подригало, К.Г. Яценко, І.В. Рогозін

У статті наведено результати теоретичного дослідження динамічних властивостей автомобілів і автопоїздів, що використовуються у якості засобів рухомості зенітних ракетних комплексів Повітряних Сил Збройних Сил України. Запропонований метод вибору раціонального значення коефіцієнта динамічності засобів рухомості.

Ключові слова: динамічні властивості, коефіцієнт динамічності, коефіцієнт використання зчепної ваги, засіб рухомості, ефективна потужність двигуна.

DEFINITION OF DYNAMIC COEFFICIENT OF AIR DEFENSE MISSILE SYSTEM MOBILITY MEANS OF UKRAINE AIR ARMED FORCES

M.A. Podrigalo, K.G. Yatsenko, I.V. Rogozin

The results of a theoretical study of the dynamic properties of automobiles and trains, which are used as an air defense missile system mobility means of Ukraine air armed forces are shown in the article. The method of mobility means rational dynamic coefficient selecting is proposed.

Keywords: dynamic properties, dynamic coefficient, coupling weight using coefficient, mobility means, efficient engine power.