

PROPOSALS FOR AN ALGORITHM FOR DETERMINING COMBAT LOSSES OF PERSONNEL FOR THE PURPOSE OF PREDICTING CHANGES IN THE COMBAT EFFICIENCY OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

M. Kudrytskyi, N. Pater, V. Kostrytsia

The article presents proposals for an algorithm for determining combat sanitary and irreversible losses of personnel in order to predict changes in the effectiveness of the combat use of weapons and military equipment.

To do this, the authors proposed a coefficient for maintaining the effectiveness of combat use, which takes into account the results of the joint functioning of such systems: provision of workable samples of weapons and military equipment (subsystems of production and procurement, restoration, reserve); provision of expendable material and technical means (missiles and ammunition, fuels and lubricants); training systems for military personnel (crews).

The coefficient theoretically confirms the fact that the effectiveness of combat use of a unit (subdivision) during military operations depends on the availability of combat-ready weapons and military equipment, including those equipped with trained crews, consumable material and technical resources (missiles and ammunition, materials, etc.).

Based on this, the authors proposed an algorithm for determining combat sanitary and irretrievable losses based on the use of the expert assessment method.

The fundamental novelty of the proposed proposals is that the determination of combat sanitary and irretrievable losses is carried out taking into account the amount of average daily losses of weapons and military equipment during combat operations and their structure. That is, the authors have established a relationship between the degree of damage to a weapon and military equipment sample (weak, medium and strong damage to a weapon and military equipment sample received as a result of fire from the enemy) and combat sanitary and irretrievable losses of personnel.

This allows for a more accurate determination of the number of combat-ready weapons and military equipment samples (working weapons and military equipment samples, equipped with a crew and expendable material and technical means) in a unit (subdivision), which allows for forecasting changes in the effectiveness of their combat use.

In the future, the proposed proposals can be used in headquarters (services) for planning the use of troops (forces) during combat operations.

Keywords: weapons and military equipment, loss of personnel.

УДК 623.546; 358.623

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.51-56>

П.П. Ткачук, І.В. Горчинський, Л.Д. Величко, М.І. Сорокати́й

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 01 October 2024; Revised 07 October 2024; Accepted 04 November 2024

ВПЛИВ ЗМІН МАСИ ПОДОВЖЕНОГО ЗАРЯДУ І ГАЛЬМІВНОГО КАНАТУ НА РУХ РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

Триваюча російсько-українська війна дала значний поштовх до використання мін та саморобних вибухових пристроїв. На території України є сотні квадратних кілометрів мінних полів, величезна кількість групових та одиночних локацій, де містяться міни, боєприпаси та інші вибухонебезпечні матеріали. З метою запобігання втратам особового складу та техніки від їх дій необхідне проведення розмінювання відповідних територій. Для цього використовують механізоване і ручне розмінювання. Коткові, бойкові та ножові мінні тралі забезпечують ймовірність знешкодження вибухонебезпечних пристроїв до 95%. Проте їхні тактико-технічні характеристики не є сприятливими для використання їх в безпосередній близькості до ворога. У цьому випадку, для створення проходу в мінному полі, використовують подовжені заряди. Ймовірність знешкодження мін з використанням подовжених зарядів досягає 90%. Однак питаннями дослідження динаміки реактивного двигуна, подовженого заряду і гальмівного канату не приділялась належна увага. У роботі запропонована математична модель руху цієї механічної системи, з врахуванням зміни мас реактивного палива, кабельного заряду і гальмівного канату. Отримана система нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку дозволяє оцінити вплив маси реактивного двигуна, кута його вильоту, законів зміни витрат реактивного палива та інших чинників на дальність лету реактивного двигуна. У роботі розглядався рух механічної системи без врахування сили опору повітря. Визначено параметри руху реактивного двигуна (дальність лету, висота траєкторії, кінцева швидкість і тривалість лету), якщо реактивна сила є сталої величини і кут нахилу направляючих дорівнює 60° . Метою подальших досліджень буде визначення впливів кута нахилу напрямних та закону зміни величини реактивної сили на дальність лету реактивного двигуна.

Ключові слова: розмінювання, подовжені заряди, динаміка реактивного двигуна, реактивна сила.

© П.П. Ткачук, І.В. Горчинський, Л.Д. Величко, М.І. Сорокати́й

Постановка проблеми

Триваюча російсько-українська війна активізувала питання мінно-вибухових загороджень на полі бою. Противник використовує мінні поля, скеровані проти рухомої військової техніки та особового складу. Мінні поля встановлюють на дорогах та обабіч їх, на напрямках, де очікується рух бронетехніки, та в інших місцях. Мінні протитанкові поля, переважно бувають до 1000 метрів у ширину і до 100 метрів у глибину. Подолання протитанкового мінного загородження бронетехнікою супроводжується значними втратами. Коефіцієнт ймовірності ураження танків, БТР, БМП на мінному полі складає 0,65–0,75, що приводить до значного зменшення атакуючого потенціалу військ. Тому суттєвою необхідністю є повне або хоча б часткове знешкодження мін і саморобних вибухових пристроїв на мінному полі.

Аналіз досліджень і публікацій

З метою запобігання втратам від дії мін і саморобних вибухових пристроїв у [1] вказані правила поведінки військовослужбовців на мінно-небезпечених територіях. У підрозділах інженерних військ використовують як механізовані (коткові, бойкові та ножові мінні трали) засоби, так і ручні пристрої для виявлення та подальшого знешкодження вибухонебезпечних пристроїв. Ймовірність знешкодження мін з використанням ножових тралів досягає 90%, а коткових – 95%. Переважно моделі, які експлуатуються сьогодні для розмінування, є значної маси та значних габаритів. Їхні тактико-технічні характеристики неповною мірою відповідають вимогам. Тому відбувається науковий пошук і розробка нових моделей, здатних здійснювати розмінування територій.

У роботах [2-5] описані методи виявлення мінних полів та їх знешкодження з допомогою механізованих засобів. Один із методів знешкодження мінних полів полягає у використанні тральних засобів. У роботі [4] запропонована модель трала у вигляді U-подібного коромисла з двома прикріпленими дисками. Останні продукують тиск на верхню частину міни, чим спричиняють її підрив (знешкодження). У статті [5] розглядаються можливі способи знешкодження акустичної міни, яка реагує на механічні коливання ґрунту.

Для здійснення проходів у мінних полях використовують подовжені заряди. Ймовірність знешкодження мін з використанням подовжених зарядів досягає 90%. Подовжені заряди подаються на мінне поле повітрям або по землі. Ізраїльська система POMINS-II, KM 456 (Portable Mine Neutralization System) створює прохід довжиною до 40 метрів і шириною 50 сантиметрів [6]. Американська M58

MICLIC (Mine Clearing Line Charge) має лінійний заряд довжиною 107 метрів і його один метр довжини містить 7,45 кг вибухівки. Ця система створює прохід довжиною 100 метрів і шириною до 8 метрів [7]. Російська система розмінування УРП-01 здійснює розмінування в смугі довжиною 115 метрів і шириною 6 метрів [7].

У роботі [8] пропонується математична модель руху трального елемента в повітрі, який закидається на мінне поле. Після приземлення трального елемента його підтягують і він, рухаючись, знешкоджує натяжні датчики. У статті не враховується вплив маси гальмівного канату на рух трального елемента.

Формулювання мети статті

Подовжені заряди подаються на мінне поле з допомогою одного або двох реактивних двигунів. Метою статті є дослідження руху реактивного двигуна, подовженого заряду та гальмівного канату від точки запуску двигуна до точки його приземлення.

Виклад основного матеріалу

Розглядається механічна система, яка складається з реактивного двигуна, реактивного палива, кабельного заряду і гальмівного канату. Введено наступні позначення: маса реактивного двигуна (rocket) – m_r ; маса реактивного палива (rocketfuel) змінюється згідно із законом – $m_{rf}(t) = m_{rf0} - k_{rf}(t)$, де m_{rf0} – початкова маса реактивного палива, $k_{rf}(t)$ – закон витрати маси палива і розмірність $[k_{rf}] = \kappa z$; маса кабельного заряду (cablecharge) – $m_{cc} = \rho_{cc} l_{cc}$, де ρ_{cc} – його погонна маса і розмірність $[\rho_{cc}] = \kappa z / M$, l_{cc} – довжина кабельного заряду; $m_{bc} = \rho_{bc} l_{bc}$ – маса гальмівного канату (brakecable), де ρ_{bc} – його погонна маса і розмірність $[\rho_{bc}] = \kappa z / M$, l_{bc} – довжина гальмівного канату.

Після запуску реактивного двигуна він під дією реактивної тяги сходить з напрямної установки і тягне за собою кабельний заряд. Вважаємо, що на першому етапі перебувають в русі реактивний двигун, реактивне паливо і частина кабельного заряду.

Для дослідження їх динаміки використаємо теорему про зміну кількості руху механічної системи: зміна кількості руху механічної системи, за довільний проміжок часу, дорівнює векторній сумі імпульсу всіх зовнішніх сил, діючих на систему, за цей же проміжок часу [9]

$$\vec{K}(t+\Delta t) - \vec{K}(t) = \sum \vec{F}_i^e(t) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де $\vec{K}(t)$ – кількість руху механічної системи в момент часу t , $\vec{K}(t+\Delta t)$ – кількість руху механічної системи в момент часу $t+\Delta t$, $\vec{F}_i^e(t)$ – зовнішні сили, що діють на механічну систему, Δt – елементарний приріст часу.

Вибираємо початок системи координат $Oxyz$ в точці розташування установки. Вісь Ox скеровується в напрямку мінного поля. Вісь Oz – вертикально вгору і вісь Oy в той бік, щоб система координат $Oxyz$ була правою.

У довільний момент часу маса механічної системи дорівнює

$$m(t) = m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t), \quad (2)$$

де $l(t)$ – змінна довжина кабельного заряду, один кінець якого під'єднаний до реактивного двигуна, а інший – розташований в точці його запуску.

Вважаємо, що кабельний заряд і реактивний двигун мають однакову швидкість. Кількість руху механічної системи в довільний момент часу t дорівнює

$$\vec{K}(t) = (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \vec{V}(t), \quad (3)$$

де $\vec{V}(t)$ – швидкість реактивного двигуна з паливом і кабельного заряду, який прикріплений до двигуна.

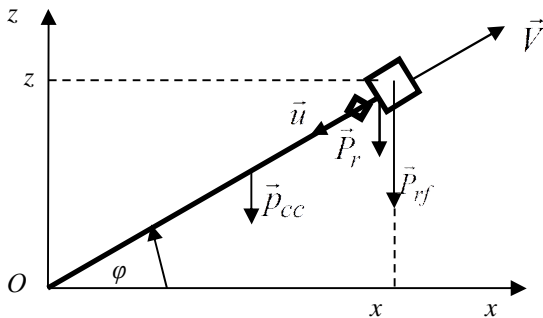


Рис. 1. Схема руху механічної системи на початковій стадії

Кількість руху механічної системи в момент часу $t+\Delta t$ дорівнює

$$\vec{K}(t+\Delta t) = (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t+\Delta t) + \rho_{cc} \cdot l(t+\Delta t)) \vec{V}(t+\Delta t) + \Delta k_{rf}(t) \cdot \vec{u}(t+\Delta t). \quad (4)$$

де $\Delta k_{rf}(t)$ – маса реактивного палива, яка згорає за проміжок часу Δt і виходить з реактивного двигуна у вигляді продуктів згорання. $\vec{u}(t)$ – швидкість продуктів згорання реактивного палива відносно нерухомої системи координат (поверхні землі).

Залежність (4) перепишемо в наступному вигляді

$$\vec{K}(t+\Delta t) = \left(\begin{array}{l} m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) - \Delta k_{rf}(t) + \\ + \rho_{cc} \cdot (l(t) + \Delta l(t)) \end{array} \right) (\vec{V}(t) + \Delta \vec{V}(t)) + \Delta k_{rf}(t) (\vec{u}(t) + \Delta \vec{u}(t)).$$

Тоді зміна кількості руху механічної системи за проміжок часу Δt дорівнює

$$\begin{aligned} \vec{K}(t+\Delta t) - \vec{K}(t) &= \\ &= \left(\begin{array}{l} m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) - \Delta k_{rf}(t) + \\ + \rho_{cc} \cdot (l(t) + \Delta l(t)) \end{array} \right) (\vec{V}(t) + \Delta \vec{V}(t)) + \\ &+ \Delta k_{rf}(t) \cdot (\vec{u}(t) + \Delta \vec{u}(t)) - \\ &- (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \vec{V}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Враховуючи тільки величини першого порядку малості, рівняння (5) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \vec{K}(t+\Delta t) - \vec{K}(t) &= (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \vec{V}(t) + \\ &+ (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \Delta \vec{V}(t) + \\ &+ (-\Delta k_{rf}(t) + \rho_{cc} \Delta l(t)) \vec{V}(t) + \Delta k_{rf}(t) \cdot \vec{u}(t) - \\ &- (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \vec{V}(t). \end{aligned}$$

Спростуючи вираз, отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta \vec{K}(t) &= (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \Delta \vec{V}(t) + \\ &+ (-\Delta k_{rf}(t) + \rho_{cc} \Delta l(t)) \vec{V}(t) + \Delta k_{rf}(t) \cdot \vec{u}(t). \end{aligned} \quad (6)$$

На механічну систему впродовж її руху діють наступні зовнішні сили: \vec{P}_r – вага реактивного двигуна, $\vec{P}_{rf}(t)$ – вага реактивного палива, $\vec{P}_{cc}(t)$ – вага кабельного заряду. Опором повітря знехтуємо.

Зміна імпульсу всіх зовнішніх сил дорівнює

$$\sum \vec{F}_i^e(t) \cdot \Delta t = (\vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t)) \Delta t. \quad (7)$$

Враховуючи теорему про зміну кількості руху механічної системи і залежності (6) та (7), запишемо

$$\begin{aligned} (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \Delta \vec{V}(t) + \\ + (-\Delta k_{rf}(t) + \rho_{cc} \Delta l(t)) \vec{V}(t) + \Delta k_{rf}(t) \cdot \vec{u}(t) = \\ = (\vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t)) \Delta t. \end{aligned} \quad (8)$$

Поділивши ліву і праву частини на проміжок часу Δt , отримаємо

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{(m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \Delta \vec{V}(t)}{\Delta t} + \right. \\ \left. + \frac{(-\Delta k_{rf}(t) + \rho_{cc} \Delta l(t)) \vec{V}(t) + \Delta k_{rf}(t) \cdot \vec{u}(t)}{\Delta t} \right) = \\ = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t)) \Delta t}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здійснюючи граничний перехід, запишемо

$$\begin{aligned} & (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \frac{d\vec{V}(t)}{dt} + \\ & + \left(-\frac{dk_{rf}(t)}{dt} + \rho_{cc} \frac{dl(t)}{dt} \right) \vec{V}(t) + \frac{dk_{rf}(t)}{dt} \vec{u}(t) = \end{aligned} \quad (10)$$

$$= \vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t).$$

Швидкість продуктів згорання реактивного палива можна записати у вигляді

$$\vec{u}(t) = \vec{V}(t) + \vec{V}_r(t), \quad (11)$$

де $\vec{V}_r(t)$ – швидкість продуктів згорання реактивного палива відносно двигуна.

Підставляючи (11) в (10) і виконуючи арифметичні дії, отримаємо

$$\begin{aligned} & (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \frac{d\vec{V}(t)}{dt} + \\ & + \rho_{cc} \frac{dl(t)}{dt} \vec{V}(t) + \frac{dk_{rf}(t)}{dt} \vec{V}_r(t) = \vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Введемо позначення

$$\vec{F}_r(t) = -\frac{dk_{rf}(t)}{dt} \vec{V}_r(t). \quad (13)$$

Величину $\vec{F}_r(t)$ називають реактивною силою.

Враховуючи (13), залежність (12) набуде вигляду

$$\begin{aligned} & (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) \frac{d\vec{V}(t)}{dt} + \rho_{cc} \frac{dl(t)}{dt} \vec{V}(t) = \\ & = \vec{F}_r(t) + \vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Швидкість реактивного двигуна в декартовій системі координат описується залежністю

$$\vec{V}(t) = \dot{x}(t)\vec{i} + \dot{z}(t)\vec{k}. \quad (15)$$

Вважаємо, що довжина кабельного заряду змінюється відповідно до закону

$$l(t) = \sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}. \quad (16)$$

Враховуючи (15) і (16), залежність (14) набуде вигляду

$$\begin{aligned} & (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l(t)) (\dot{x}(t)\vec{i} + \dot{z}(t)\vec{k}) + \\ & + \rho_{cc} \frac{dl(t)}{dt} (\dot{x}(t)\vec{i} + \dot{z}(t)\vec{k}) = \\ & = \vec{F}_r(t) + \vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc}(t). \end{aligned}$$

Проектуючи це рівняння на осі координат і здійснюючи диференціювання, отримаємо

$$\begin{aligned} & (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot \sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}) \ddot{x}(t) + \\ & + \rho_{cc} \frac{\dot{x}(t)x(t) + \dot{z}(t)z(t)}{\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}} \dot{x}(t) = F_r(t) \frac{\dot{x}(t)}{\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{z}(t)^2}}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$(m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot \sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}) \ddot{z}(t) +$$

$$\begin{aligned} & + \rho_{cc} \frac{\dot{x}(t)x(t) + \dot{z}(t)z(t)}{\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}} \dot{z}(t) = \\ & = F_r(t) \frac{\dot{z}(t)}{\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{z}(t)^2}} - m_r g - (m_{rf0} - k_{rf}(t))g - \\ & - \rho_{cc} \sqrt{x(t)^2 + z(t)^2} g, \end{aligned} \quad (18)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – пришвидшення вільного падіння тіла.

Отже, рух механічної системи описується нелінійною системою диференціальних рівнянь другого порядку [10]. Початкові умови для системи (17) і (18) матимуть вигляд

$$x(0) = 0, \quad z(0) = 0,$$

$$\dot{x}(0) = V_0 \cos \theta_0 \quad \text{і} \quad \dot{z}(0) = V_0 \sin \theta_0, \quad (19)$$

де θ_0 – кут нахилу напрямних, V_0 – початкова швидкість реактивного двигуна.

Вважаємо, що $m_r = 43 \text{ кг}$, $m_{rf0} = 27 \text{ кг}$,

$$k_{rf} = \frac{27}{7} \text{ кг/с}, \quad m_{rf}(t) = 27 \left(1 - \frac{t}{7} \right), \quad \rho_{cc} = 9,677 \text{ кг/м},$$

$$l_{cc} = 93 \text{ м}, \quad \rho_{bc} = 0,219 \text{ кг/м}, \quad F_r = 13300 \text{ н},$$

$$V_0 = 0,01 \text{ м/с} \quad \text{і} \quad \theta_0 = 60^\circ.$$

Рух цієї механічної системи складається з двох етапів. На першому етапі в русі перебувають реактивний двигун, реактивне паливо і частина кабельного заряду. Час завершення першого етапу руху системи t_{k1} визначається з умови, що весь кабельний заряд перебуває в русі, тобто з умови

$$\sqrt{x(t_{k1})^2 + z(t_{k1})^2} = l_{cc}. \quad (20)$$

Використовуючи програмне забезпечення, отримаємо, що $t_{k1} = 2,82 \text{ с}$. Кінематичні параметри руху реактивного двигуна в цей момент часу наступні:

$$x(t_{k1}) = 85,59 \text{ м}, \quad z(t_{k1}) = 31,17 \text{ м}, \quad V_x(t_{k1}) = 38,90 \text{ м/с},$$

$$V_z(t_{k1}) = -0,32 \text{ м/с} \quad \text{і} \quad V(t_{k1}) = 35,90 \text{ м/с}. \quad (21)$$

Після моменту часу t_{k1} вся маса кабельного заряду опиняється в русі, тоді починається другий етап руху механічної системи. На другому етапі реактивний двигун починає рухати ще додатково і гальмівний канат, який прикріплений до кабельного заряду.

Використовуючи вищенаведену методику, отримаємо, що рух реактивного двигуна в цьому випадку буде описуватись рівнянням

$$\begin{aligned} & (m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} \cdot l_{cc} + \rho_{bc} (l(t) - l_{cc})) \times \\ & \times (\ddot{x}(t)\vec{i} + \ddot{z}(t)\vec{k}) + \rho_{bc} \frac{dl(t)}{dt} (\dot{x}(t)\vec{i} + \dot{z}(t)\vec{k}) = \\ & = \vec{F}_r(t) + \vec{P}_r + \vec{P}_{rf}(t) + \vec{P}_{cc} + \vec{P}_{bc}(t), \end{aligned} \quad (22)$$

де $P_{cc} = \rho_{cc} l_{cc} g$ – повна вага кабельного заряду.

У проєкціях на осі декартової системи координат отримаємо

$$\left(m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} l_{cc} + \rho_{bc} \left(\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2} - l_{cc} \right) \right) \times \\ \times \ddot{x}(t) + \rho_{bc} \frac{x(t)\dot{x}(t) + z(t)\dot{z}(t)}{\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}} \dot{x}(t) = \frac{F_r(t)\dot{x}(t)}{\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{z}(t)^2}}, \quad (23)$$

$$\left(m_r + m_{rf0} - k_{rf}(t) + \rho_{cc} l_{cc} + \rho_{bc} \left(\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2} - l_{cc} \right) \right) \times \\ \times \ddot{z}(t) + \rho_{bc} \frac{x(t)\dot{x}(t) + z(t)\dot{z}(t)}{\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2}} \dot{z}(t) = \frac{F_r(t)\dot{z}(t)}{\sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{z}(t)^2}} - \\ - m_r g - m_{rf}(t)g + m_{cc}g - \rho_{bc} \left(\sqrt{x(t)^2 + z(t)^2} - l_{cc} \right) g. \quad (24)$$

Початковими умовами для другого етапу руху механічної системи є параметри руху механічної системи в момент завершення першого етапу, тобто (21).

Момент завершення руху механічної системи визначається з умови, що реактивний двигун торкається поверхні землі, тобто з умови

$$z(t_{2k}) = 0. \quad (25)$$

Розв'язування систем диференціальних рівнянь (17), (18), (23) і (24) здійснювалось чисельним методом з використання відповідного математичного програмного забезпечення комп'ютера.

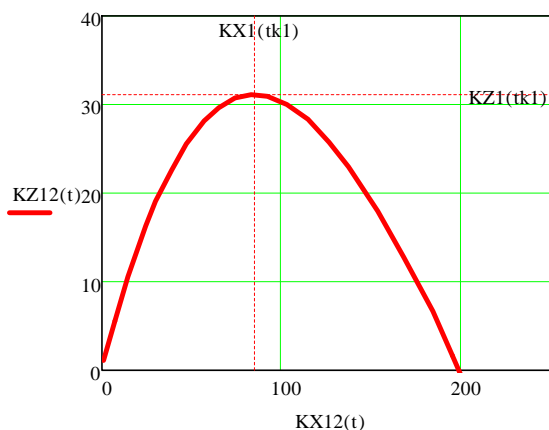


Рис. 2. Траєкторія руху реактивного двигуна

На рис. 2 $KZ12(t)$ – координата руху ракетного двигуна відносно осі Oz і розмірність $[KZ12(t)] = i$, $KX12(t)$ – координата руху ракетного двигуна відносно осі Ox і розмірність $[KX12(t)] = i$.

Траєкторія руху реактивного двигуна при умові, що він тягне за собою тільки частину кабельного заряду, міститься між точками з координатами

$O(0;0)$ і $(KX1(t_{k1}); KZ1(t_{k1}))$. Від точки з координатами $(KX1(t_{k1}); KZ1(t_{k1}))$ до точки приземлення реактивного двигуна $(199,09;0)$ вказана траєкторія його руху при умові, що рухається весь кабельний заряд і ще частина гальмівного канату.

У момент торкання реактивного двигуна поверхні землі його кінематичні параметри мали значення

$$x(t_{k2}) = 199,09 \text{ м}, \quad V_x(t_{k2}) = 64,17 \text{ м/с},$$

$$V_z(t_{k2}) = -29,43 \text{ м/с} \quad \text{і} \quad V(t_{k2}) = 70,06 \text{ м/с}.$$

Тривалість руху механічної системи дорівнює

$$t_{2k} = t_{k1} + t_{k2} = 2,82 \text{ с} + 2,25 \text{ с} = 5,07 \text{ с}.$$

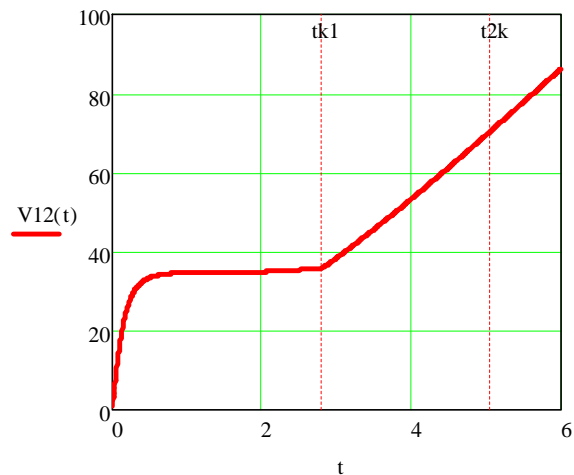


Рис. 3. Зміна швидкості реактивного двигуна

На рис. 3 наведено графік зміни швидкості реактивного двигуна. На проміжку часу $(0 \leq t \leq t_{k1})$ вказана зміна швидкості реактивного двигуна, при умові його руху з кабельним зарядом змінної довжини. Впродовж часу $(t_{k1} \leq t \leq t_{2k})$ вказана зміна швидкості реактивного двигуна, коли в русі перебувають весь кабельний заряд і ще частина гальмівного канату.

Висновки

Запропонована математична модель руху реактивних двигуна і палива, подовженого заряду і гальмівного канату дозволить оцінити впливи кута нахилу напрямних, закону зміни величини реактивної сили та інших чинників на дальність лету реактивного двигуна. Отримані теоретичні результати дозволять покращити технологію розмінування мінних полів з використанням подовжених зарядів.

Список літератури

1. Про затвердження інструкції з правил поведження військовослужбовців на місцевості, на якій є вибухонебезпечні предмети, та дотримання заходів міної безпеки: Наказ Генерального штабу Збройних Сил України від 19.04.2018 року № 161.

2. A Study of Mechanical Application in Demining. – GICHD: Geneva, 2004. 179 p. ISBN 2-88487-023-7.

3. Scientific Contributions to Demining Technology: Beliefs, Perceptions and Realities. *Research, Development and Technology in Mine Action*. Issue 7.3, December 2003.

4. Нанівський Р.А., Смельянов О.В. Дослідження кінематики робочого органа трала під час руху по мінному полі з нерівностями. Військово-технічний збірник. № 21. 2019. С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.24-28>

5. Дерепка А.В., Лейко О.Г., Олійник К.А., Телепа М.В. До питання створення зразків сейсмічних датчиків для мінного озброєння. *Озброєння та військова техніка*. 2022. № 2(34), С. 108–115.

6. POMINS-II, KM456. Електронний ресурс: <https://www.hanwhacorp.co.kr>

7. Саламахин Т.М., Мьякишев Б.А., Ротт О.Е., Франскевич А.А., Целовальников Е.П., Висящев В.Ю. Заграждения, их устройство и преодоление в бою и операции. Издание академии. М., 2013. 464 с.

8. Кривцун В., Агеєв О., Бондаренко О. Математична модель польоту елемента, що тралить натяжні датчики цілі вибухонебезпечних предметів. *Social Development and Security*, 2021. Vol. 11, № 6. С. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.6.9> DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2\(34\).108-115](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2(34).108-115)

9. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

10. Самойленко А.М., Перестюк М.О., Парасюк І.О. Диференціальні рівняння: Підручник – 2-ге вид, перероб. і доп., К.: Либідь, 2003. ISBN 966-06-0249-9.

References

1. (2018), "Pro zatverdzenia instrukcii z pravyl povodzenia viyskovosluzbovciv na miscevosti, na yakiy e vybuhonebezpechni predmeti, ta dotrymannia zahodiv minnoi bezpeky: Nakaz Generalnogo Shtabu Zbroinyh Syl Ukrainy vid 19.04. 2018 roku"

[On the Approval of Instructions on the Rules for Handling Explosive Devices and Adherence to Mine Safety Measures by Military Personnel: Order of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine dated 19.04.2018 No. 161]. [in Ukraine]

2. (2004), A Study of Mechanical Application in Demining. GICHD: Geneva. 179 p. ISBN 2-88487-023-7.

3. (2003), Scientific Contributions to Demining Technology: Beliefs, Perceptions, and Realities. *Research, Development and Technology in Mine Action*. Issue 7.3, December 2003.

4. Nanyivskiy R.A. and Yemelyanov O.V. (2019), "Doslidzhennia kinematyky robochogo organa trala pid chas ruhu po minnimo poli z nerivnostiyami" [Study of the Kinematics of the Mine Plow's Working Body During Movement Over Uneven Mine fields]. *Military-Technical Collection*, No. 21. pp. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.24-28> [in Ukraine]

5. Derepa A.V., Leyko O.H., Oliynyk K.A. and Telepa M.V. (2022), "Do pytannia stvorennia zrazkiv seismichnyh datchykyv minnogo ozbroennia" [On the Issue of Creating Seismic Sensor Models for Mine Armament]. *Armament and Military Equipment*, No. 2(34). Pp. 108–115. [in Ukraine]

6. POMINS-II, KM456. Electronic resource: <https://www.hanwhacorp.co.kr>

7. Salamakhin T.M., Myakishev B.A., Rott O.E., Franskevich A.A., Tselovalnikov E.P. and Visyashchev V.Yu. (2013), "Zagrazhdenia, ih ustroistva i preodoleniye v boyu i operacii" [Obstacles, Their Design and Overcoming in Combat and Operations]. Academy Edition, Moscow. 464 p. [in Russian]

8. Kryvtsun V., Aheiev O. and Bondarenko O. (2021), "Matematychna model piliotu element, zcho tralyt natiazhni datchkyv cili vybuhonebezpechnykh predmetiv" [Mathematical Model of the Flight of an Element That Clears Tension Sensors of Explosive Devices]. *Social Development and Security*, Vol. 11, No. 6. pp. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.6.9> DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2\(34\).108-115](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2(34).108-115) [in Ukraine]

9. Pavlovskiy M.A. (2002), "Teoretychna mehanika" [Theoretical Mechanics: Textbook]. – Kyiv: Tekhnika., 512 p.

10. Samoylenko A.M., Perestyuk M.O. and Parasyuk I.O. (2003), "Dyferenciini rivniannia" [Differential Equations: Textbook] 2nd ed., revised and expanded. Kyiv: Lybid., ISBN 966-06-0249-9. [in Ukraine]

THE IMPACT OF CHANGES IN THE MASS OF AN EXTENDED CHARGE AND A BRAKING CABLE ON THE MOTION OF A ROCKET ENGINE

Tkachyck P., Horchinskiy I., Velychko L., Sorokatyi M.

The ongoing Russian-Ukrainian war has significantly increased the use of mines and improvised explosive devices. In Ukraine, there are hundreds of square kilometers of minefields and numerous group and individual locations containing mines, ammunition, and other explosive materials. To prevent personnel and equipment losses, demining of these areas is essential. This can be done through both mechanized and manual demining. Roller, hammer, and knife mine plows provide up to a 95% probability of neutralizing explosive devices. However, their tactical and technical characteristics are not favorable for use in close proximity to the enemy. In such cases, extended charges are used to create a passage through the minefield, with a probability of mine neutralization reaching 90%. However, the dynamics of the rocket engine, the extended charge, and the braking cable have not been sufficiently studied. This paper proposes a mathematical model for the movement of this mechanical system, taking into account changes in the mass of rocket fuel, the cable charge, and the braking cable. The resulting system of second-order nonlinear differential equations allows for the assessment of the impact of the rocket engine mass, launch angle, fuel consumption laws, and other factors on the flight range of the rocket engine. The study considered the movement of the mechanical system without considering air resistance. The parameters of the rocket engine's motion (flight range, trajectory height, final speed, and flight duration) were determined for cases where the rocket force is constant and the guide angle is 60°. Future research will focus on determining the effects of the guide angle and the law of changing rocket force on the flight range of the rocket engine.

Keywords: demining, extended charges, rocket engine dynamics, rocket force.