

**ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ**

УДК 629.735.015:681.3

**АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ НА ЗОВНІШНІЙ ПІДВІСЦІ ГЕЛІКОПТЕРА ПРІ ЙОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ПОЛЬОТІ З ПОСТІЙНОЮ ШВИДКІСТЮ****В.С. Ловейкін, професор, д.т.н., Ю.В. Човнюк, доцент, к.т.н.,****Ю.Ю. Сердюченко, асистент,****Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ****М.Г. Діктерук, доцент, к.т.н.,****Київський національний університет будівництва і архітектури**

*Анотація.* Поведінка системи «гелікоптер – вантаж» аналізується за допомогою моделі двоточкового математичного маятника, коливання якого відбуваються у потоці повітря. Визначаються основні кінематичні та динамічні характеристики руху системи залежно від швидкості переміщення точки підвісу, маси вантажу і довжини підвісу.

*Ключові слова:* гелікоптер, вантаж, маятник, коливання, аналіз.

**АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА НА ВНЕШНЕЙ ПОДВЕСКЕ ВЕРТОЛЁТА ПРІ ЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОЛЁТЕ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ****В.С. Ловейкин, профессор, д.т.н., Ю.В. Човнюк, доцент, к.т.н.,****Ю.Ю. Сердюченко, асистент, Национальный университет биоресурсов****и природоиспользования Украины, г. Киев,****М.Г. Диктерук, доцент, к.т.н.,****Киевский национальный университет строительства и архитектуры**

*Аннотация.* Поведение системы «вертолёт – груз» анализируется с помощью модели двухточечного математического маятника, колебания которого происходят в потоке воздуха. Определяются основные кинематические и динамические характеристики движения системы в зависимости от скорости перемещения точки подвеса, массы груза и длины подвеса.

*Ключевые слова:* вертолет, груз, маятник, колебания, анализ.

**ANALYSING LOAD OSCILLATIONS ON HELICOPTER EXTERNAL SUSPENSIONS ARISING DURING ITS LEVEL FLIGHT AT CONSTANT SPEED****V. Loveykin, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Yu. Chovnyuk,****Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences,****Yu. Serdyuchenko, teaching assistant,****National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv****M. Dikteruk, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences,****Kyiv National University of Construction and Architecture**

*Abstract.* The behavior of the helicopter – load system has been analyzed using the point-to-point mathematical pendulum which moves in the air stream. Main kinematical and dynamic characteristics of system motion versus suspension center motion speed, lading weight and suspension length have been determined.

*Key words:* helicopter, load, pendulum, oscillations, analysis.

## Вступ

Транспортування вантажів на зовнішній підвісці гелікоптера супроводжується коливаннями, які мають складний характер. Систему двох тіл – гелікоптер і вантаж на зовнішній підвісці (ЗП) – можна подати як математичний маятник (ММ), де гелікоптер є несучим тілом, а вантаж – тілом, яке переноситься. Дану систему буде відрізняти величезне розмаїття фізичних явищ, характерних для ММ, у якого точка підвісу може переміщатись у різних напрямках із різними прискореннями.

Колівання вантажу можна подати як результат складання поздовжніх, поперечних та крутих коливань. На різних етапах польоту переважають ті чи інші типи коливань. Так, при злеті й польоті гелікоптера з вантажем до моменту досягнення останнім певної швидкості горизонтального польоту переважають поздовжні коливання; при польоті на маршруті і при різноманітних маневрах у горизонтальній площині більшою мірою спостерігаються поперечні коливання. Насправді важко виділити й точно назвати якийсь один тип коливань. Колівання вантажу перш за все залежать від довжини підвіски, яка визначає близькість вантажу до несучого гвинта (НГ) гелікоптера, який створює неоднорідний повітряний потік. Тип коливань та їх амплітуда залежать від аеродинамічної конфігурації вантажу та його стабілізації. На характер коливань справляють вплив: швидкість, напрямок і тривалість поривів вітру. Від дій пілота при пілотуванні гелікоптера залежить траєкторія руху точки підвісу маятника. У даній роботі розглядається кілька питань – визначаються основні кінематичні та динамічні характеристики системи «гелікоптер – канат – вантаж» за наявності опору повітря, а також досліджений (та кількісно визначений) закон зміни у часі логарифмічного декременту коливань вантажу залежно від швидкості горизонтального польоту гелікоптера, співвідношення мас гелікоптера й вантажу, а також довжини підвісу вантажу (каната).

## Аналіз публікацій

У роботах [4, 5] методами [1 – 3, 6] проведено дослідження поведінки вантажу на зовнішній підвісці гелікоптера, спосіб його стабілізації у польоті, дано кількісну оцінку згасання коливань вантажу при горизонталь-

льному польоті гелікоптера з постійною швидкістю, проте, на думку авторів даної роботи, повною мірою проаналізовано основні характеристики можливих рухів таких систем за наявності сил опору повітря, особливо для випадку, коли маса гелікоптера одного порядку з масою вантажу. Кількісний аналіз задачі у такому випадку вимагає ще й якісного дослідження руху, наприклад, методом фазових портретів.

## Мета роботи

Полягас у встановленні основних закономірностей поведінки та оцінці згасання коливань вантажу при горизонтальному польоті гелікоптера з постійною швидкістю за наявності сил аеродинамічного опору.

## Аналіз дослідження

Динамічний аналіз поведінки системи «гелікоптер – вантаж» при горизонтальному польоті з постійною швидкістю за наявності аеродинамічного опору.

Модель двоточкового математичного маятника, яка дозволяє проводити послідовний аналіз поведінки системи «гелікоптер – вантаж» при горизонтальному польоті з постійною швидкістю за наявності аеродинамічного опору, наведено у [5]. Система диференціальних рівнянь руху для вказаної моделі має такий вигляд

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + \frac{B_1}{2} \dot{\theta} + D \sin \theta = \frac{B_1 V_1}{2L_p}; \\ \ddot{\alpha} + \frac{B_1}{2} \dot{\alpha} + D \sin \alpha = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де перше рівняння системи (1) описує поздовжні коливання, а друге – поперечні коливання. У (1) введено такі позначення:  $\theta$  і  $\alpha$  – кути відхилення каната (з вантажем) від вертикалі у поздовжній і поперечній площинах відповідно (відносно руху гелікоптера);  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $L_p = 67 \text{ м}$  – довжина каната;  $D = g / L_p = 0,146 \text{ с}^{-2}$ ;  $C_x = 0,12$ ;  $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$  – густина повітря;  $M_2 = 10^4 \text{ кг}$  – маса гелікоптера;  $S_{mid} = 30 \text{ м}^2$  – найбільша площа поперечного перерізу вантажу;  $B_1 = C_x \rho S_{mid} \bar{V} / M_2$ ;  $\bar{V}$  – середня загальна

швидкість руху системи, яка визначається зі співвідношення

$$\bar{V} = \sqrt{(V_1 - L_p \dot{\theta})^2 + L_p^2 (\dot{\alpha})^2}, \quad (2)$$

де  $V_1 = 10 \text{ м/с}$  – швидкість горизонтального (відносно землі) руху гелікоптера у поздовжній площині.

Оскільки  $(L_p \dot{\theta}) = V_1$ , то можемо вважати  $\bar{V} \approx V_1$ . В цьому випадку  $B_1 \approx 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Початкові умови для розв'язку системи (1) обрано такими

$$\begin{aligned} \theta(0) &= 10^\circ = \pi/18 \text{ рад}; & \dot{\theta}(0) &= 0; \\ \alpha(0) &= 30^\circ = \pi/6 \text{ рад}; & \dot{\alpha}(0) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для обчислення логарифмічного декременту коливань обрано таку залежність [5]:

– у поздовжній площині (для  $\theta$  – кутів)

$$\lambda_\theta = \frac{1}{100} \cdot \frac{\max|\theta(T)|}{\max|\theta(t+100T)|}; \quad (4)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L_p}{g}} \approx 16,4 \text{ с};$$

– у поперечній площині (для  $\alpha$  – кутів)

$$\lambda_\alpha = \frac{1}{100} \cdot \frac{\max|\alpha(T)|}{\max|\alpha(t+100T)|}. \quad (5)$$

У табл. 1 наведено значення  $\lambda_\theta$  і  $\lambda_\alpha$  для різних значень  $t$  при  $\bar{V} = 10 \text{ м/с}$ .

Таблиця 1 Значення кутів  $\lambda_\theta$  і  $\lambda_\alpha$  для різних  $t$

$t, \text{ с}$	$\lambda_\theta$	$\lambda_\alpha$
0	0,001938	0,00198
100	0,001933	0,00183
200	0,001928	0,00173
300	0,001924	0,00163
400	0,001920	0,00152
500	0,001910	0,00143

Аналіз результатів, наведених у табл. 1, свідчить про зменшення декрементів  $\lambda_\theta$  і  $\lambda_\alpha$  з плином часу  $t$ .

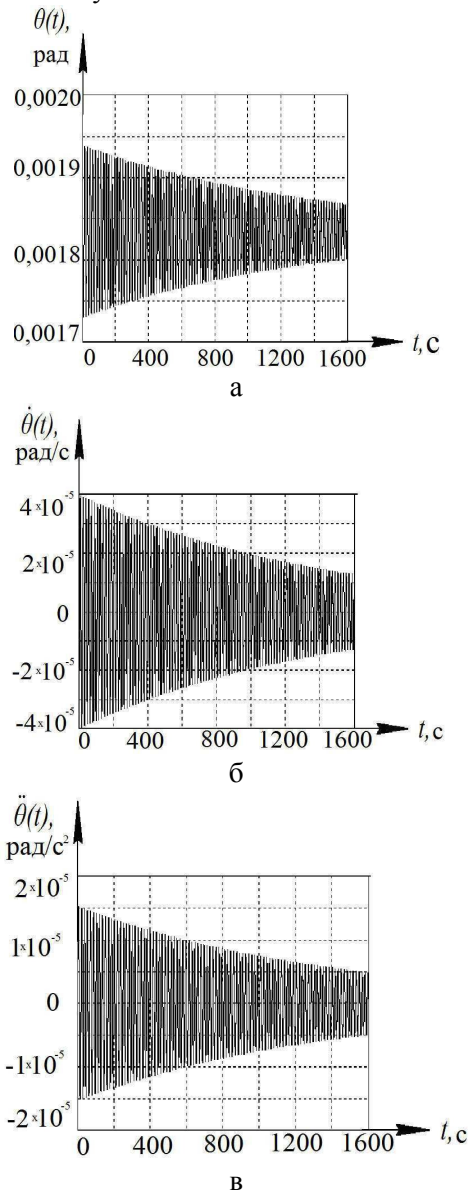


Рис. 1. Коливання каната в поздовжній площині: а – зміна кута відхилення  $\theta$ ; зміна кутової швидкості  $\dot{\theta}$ ; зміна кутового прискорення  $\ddot{\theta}$

Аналіз графіків дозволяє стверджувати таке:

- коливання за кутами  $\theta$  і  $\alpha$  є затухаючими;
- коливання вантажу маятника у поперечній площині є симетричними відносно середньої площини, тоді як коливання вантажу за кутом  $\theta$  є асиметричними, і це пояснюється впливом діючої аеродинамічної сили;

– класичні фазові траєкторії мають вигляд спіралей, які згортаються; одна з них – за кутом  $\theta$  – асиметрична;

– характер класичних фазових траєкторій свідчить про затухання коливань; це цілком зрозуміло й відповідає тому, що диференціальні рівняння, які описують коливання за змінними  $\theta$  і  $\alpha$ , мають члени  $B_1\dot{\theta}$  і  $B_1\dot{\alpha}$ , котрі визначають аеродинамічний опір вантажу;

– фазові портрети вищих порядків характеризують сутність зв'язності (кореляції) фазової координати  $(\theta, \alpha)$  з похідними другого порядку  $(\dot{\theta}, \dot{\alpha})$ , а також  $(\ddot{\theta}, \ddot{\alpha})$  із вказаними похідними.

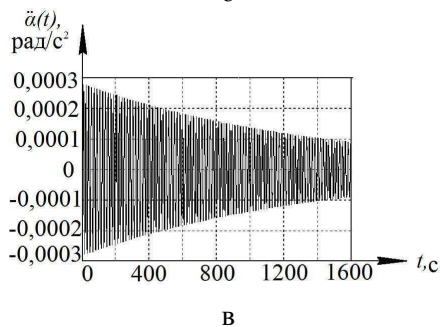
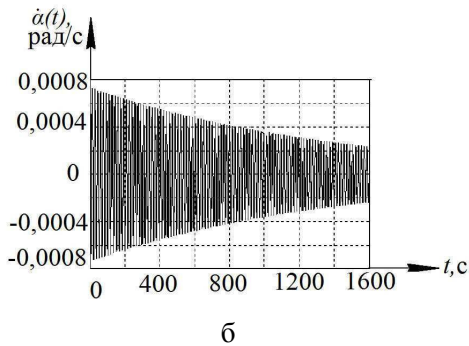
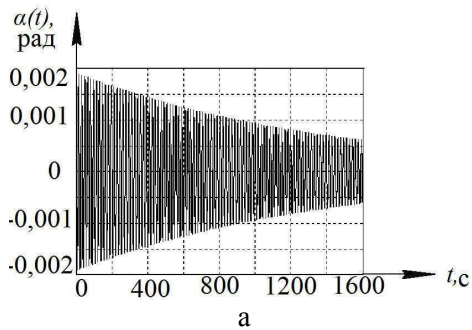


Рис. 2. Коливання каната в поперечній площині: а – зміна кута відхилення  $\alpha$ ; б – зміна кутової швидкості  $\dot{\alpha}$ ; в – зміна кутового прискорення  $\ddot{\alpha}$

На рис. 1–4 наведено залежності:  $\theta(t)$ ,  $\dot{\theta}(t)$ ,  $\ddot{\theta}(t)$ ,  $\alpha(t)$ ,  $\dot{\alpha}(t)$ ,  $\ddot{\alpha}(t)$  та фазові портрети: класичні  $(\theta, \dot{\theta})$  і  $(\alpha, \dot{\alpha})$  та вищих порядків  $(\theta, \ddot{\theta})$ ,  $(\dot{\theta}, \ddot{\theta})$ ,  $(\alpha, \ddot{\alpha})$ ,  $(\dot{\alpha}, \ddot{\alpha})$ .

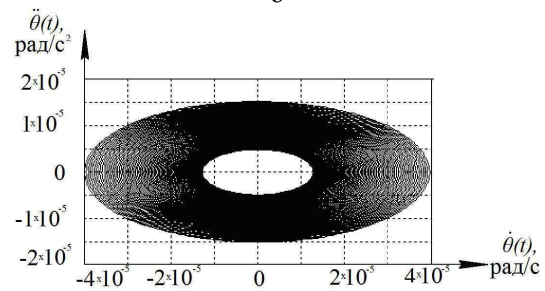
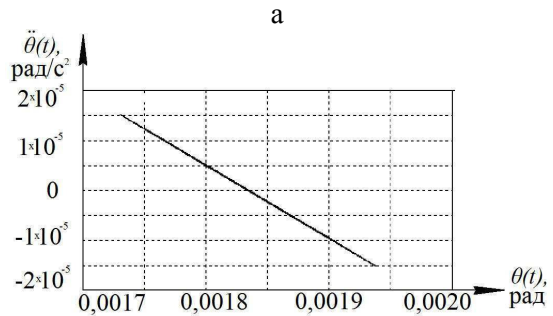
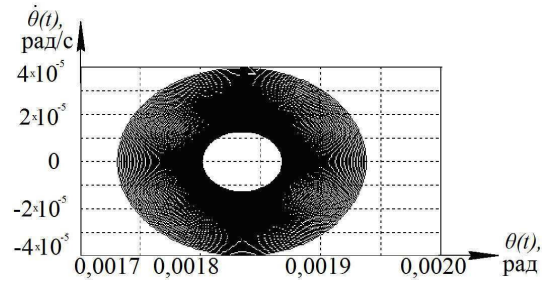
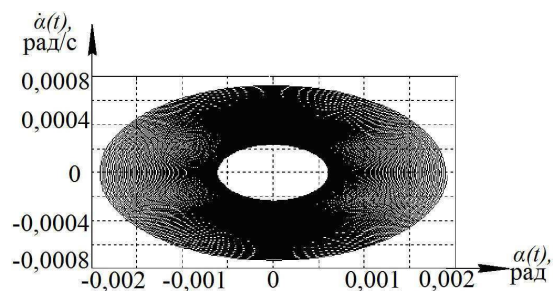


Рис. 3. Фазові портрети коливань каната в поздовжній площині: а – класичний; б, в – некласичні

Фактори, які впливають на затухання коливань системи, зводяться до такого:

- швидкість переміщення точки підвісу  $V_1$ ;
- маса вантажу, який переноситься  $M_2$ ;
- довжина підвісу (каната)  $L_p$ .



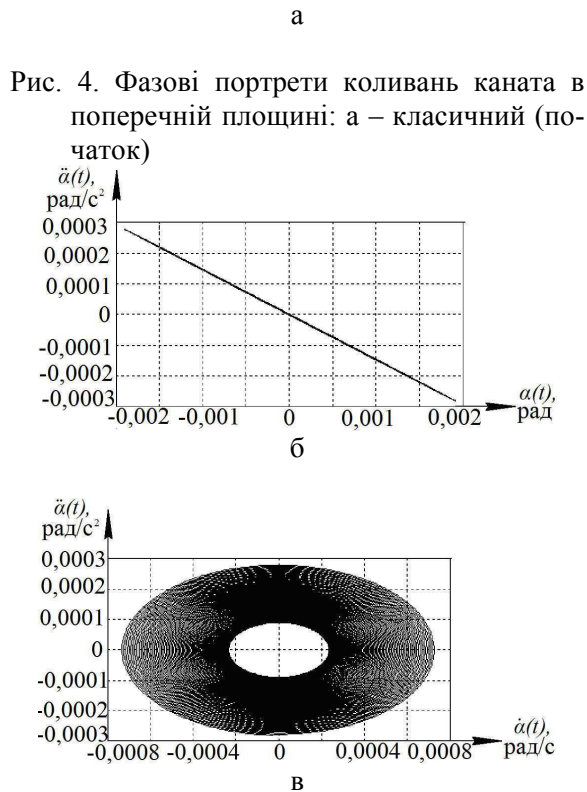


Рис. 4. Фазові портрети коливань каната в поперечній площині: б, в – некласичні (закінчення)

До інших факторів, від котрих залежить амплітуда коливань вантажу, можна віднести форму і розміри вантажу, спосіб пілотування гелікоптером (плавність та своєчасність виконання маневрувань із вантажем), зміну зовнішніх умов при проведенні польоту. Але ці фактори не мають простої кількісної характеристики (як у вищезазначених факторів), і тому моделювання за цими параметрами з використанням вказаної системи рівнянь має значні труднощі.

### Висновки

За збільшення швидкості переміщення гелікоптера спостерігається зростання  $\lambda_\theta$  і спадання  $\lambda_\alpha$ .

Коливання вантажу, який має меншу масу, затухають швидше, у порівнянні з вантажем, маса якого більше.

Збільшення довжини підвісу призводить до збільшення  $\lambda_\theta$  і  $\lambda_\alpha$ , тобто до більш швидкого затухання поздовжніх і поперечних коливань.

Дані висновки не вступають у протиріччя із практичними спостереженнями за поведінкою вантажів при їх транспортуванні.

Моделювання щодо з'ясування впливу різних факторів проводилося із припущенням, що точка підвісу маятника переміщується рівномірно і прямолінійно. Насправді сам гелікоптер (і точка підвісу вантажу) на різних етапах польоту рухається із прискоренням; крім того, фюзеляж гелікоптера знаходиться під впливом коливань, які передаються на вантаж. Джерелом цих коливань є несучий гвинт гелікоптера.

Врахування впливу наведених вище і не врахованих у роботі факторів дозволить у подальшому за більш узагальненої постановки задачі розширити й уточнити базові дані щодо темпів демпфування коливань вантажу на зовнішній підвісці гелікоптера.

### Література

1. Пановко Я.Г. Введение в теорию колебаний / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 360 с.
2. Ландау Л.Д. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1969. – 220 с.
3. Мартынов А.К. Прикладная аэродинамика / А.К. Мартынов. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
4. Козловский В.Б. Исследование поведения груза на внешней подвеске вертолѐта и способы его стабилизации в полѐте / В.Б. Козловский, С.А. Паршенцев // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. «Аэромеханика и прочность». – 2004. – №72. – С. 18–21.
5. Матвеев Ю.И. Оценка затухания колебаний груза при горизонтальном полѐте вертолѐта с постоянной скоростью. / Ю.И. Матвеев, С.С. Павлов // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. «Аэромеханика, прочность, поддержание лѐтной годности ВС». – 2009. – №141. – С. 149–156.
6. Ануфриев И.Е. Matlab 5.3/6.X. / И.Е. Ануфриев. – С.Пб.: БХВ – Петербург, 2002. – 600 с.

Рецензент: О.В. Григоров, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 28 травня 2012 р.