

УДК 629.4.027



В. П. Пісарєв

## РОБОЧИ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС РУХУ МАШИНИ НА КОСОГОРІ З ОЦІНЮВАННЯМ МОЖЛИВОСТІ СПОВЗАННЯ І ПЕРЕВЕРТАННЯ У ДИНАМІЦІ

*Запропоновано математичну модель БКМ з виходом на параметри сповзання і перевертання на косогорі у динаміці. Наведені алгоритм та приклад розрахунку для колісної машини з параметрами, близькими до сучасних БКМ.*

*К л ю ч о в і с л о в а: стійкість, режими руху, параметри оцінювання.*

**Постановка проблеми.** На сьогодні немає загальноприйнятої системи показників оцінювання стійкості руху і положення транспортного засобу [1, 2]. Це пов'язано зі складністю теоретичних досліджень та досліджень на натурних зразках, особливо у динаміці. У зв'язку з цим потрібний подальший розвиток інструментарію для рішення задачі у практичній площині в межах теорії та практики прикладного оптимального проектування складних технічних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Не зважаючи на те, що питання стійкості руху і положення розглянуті в багатьох публікаціях, теоретична частина їх переважної частини обмежується, як правило, аналітичними рішеннями, а оцінювання стійкості до перевертання за результатами натурних експериментів обмежується суб'єктивними висновками дослідника [1–4]. У працях [6, 7, 8] застосовані сучасні підходи і наведені результати теоретичних досліджень робочих процесів транспортних засобів із застосуванням чисельних методів розв'язування систем диференціальних рівнянь другого порядку.

**Метою статті** є доведення до наукової спільноти результатів розроблення математичної моделі об'єкта дослідження на основі авторських праць [6, 7, 8] та результатів розрахунків на прикладі колісної машини з параметрами, близькими до сучасних БКМ, з оцінюванням можливості сповзання та перевертання при русі на косогорі у динаміці.

**Виклад основного матеріалу.** В технічних характеристиках транспортних засобів високої прохідності, у тому числі БКМ, наводяться значення максимальних кутів підйомів і допустимих кутів крену.

Відомо [3], що згідно з тактико-технічними характеристиками передбачено подолання підйому  $30^\circ$  ( $0,523$  рад) і допустимий крен  $25^\circ$  ( $0,436$  рад) бойових колісних машин БТР60П, БТР60ПА, БТР60ПБ, БРДМ-2. Для БТР70 і БТР80 ці параметри такі самі.

Наведені параметри пов'язані з особливостями робочих процесів взаємодії транспортного засобу з опорною поверхнею при русі по косогору, які полягають, за певних умов, у негативних проявах щодо зміни руху машини (явища сповзання або перевертання).

У підручнику [2] зазначено, що загальноприйнятої системи оцінювання показників стійкості щодо сповзання і перевертання машини не існує.

Відомо також, що під поняттям “стійкість” розуміють сукупність якостей, які визначають критичні параметри щодо стійкості руху і положення транспортного засобу. При цьому іноді граничні умови стійкості і нестійкості визначають не параметрами руху, а положенням транспортного засобу у просторі (стійкість положення). Зокрема при розгляді робочих процесів, які формують цю якість, застосовують основні показники стійкості положення: критичні кути косогору по боковому ковзанню  $\beta_{kr\psi}$  і по боковому перевертанням  $\beta_{kropr}$ .

Поняття “критичні параметри” пов'язане з незбуреним рухом, за яким визначається границя між стійким і нестійким станами.

$\beta kr\psi = \text{arctg}(\psi_{SC})$ , де  $\psi_{SC}$  – коефіцієнт зчеплення (його приймають у межах 0,7...0,9 [2]). За даними праці [4], для сухої ґрунтової дороги максимальне значення  $\psi_{SC} = 0,68$  (для мокрої 0,55), а з праці [5]  $\psi_{SC} = 0,5...0,7$  для сухої ґрунтової дороги і  $\psi_{SC} = 0,35...0,5$  для дороги після дощу.

$$\beta kropsr = \text{arctg}\left(\frac{Lkol}{2 \cdot h_{CV}}\right), \text{ де } Lkol \text{ колія машини.}$$

За вихідними даними щодо об'єкта дослідження  $\beta kropsr = 0,671$  рад,  $\beta kr\psi = 0,611$  рад (для  $\psi_{SC} = 0,7$ ) і  $\beta kr\psi = 0,733$  рад (для  $\psi_{SC} = 0,9$ ).

Разом з тим у публікаціях недостатньо інформації стосовно теоретичних досліджень початку і продовження процесу перевертання у часі, тобто у динаміці. Мається на увазі робочий процес руху на косогорі з певною швидкістю, із зміною кута крену за опорною поверхнею від нульового значення до заданого, починаючи з досягнення величини якого кут крену опорної поверхні приймають постійним.

Відомо, що за таких умов змінюється орієнтація машини щодо напрямку сил гравітації і відбувається зміна величини і перерозподіл навантажень на опорну поверхню. При цьому можливе як сповзання машини у поперечному напрямку (по косогору вниз), так і можливий стан, коли машина перевертається у цьому ж напрямку. Можливий також стан, коли і перше і друге явище відбуваються одночасно. З такими станами у теорії і практиці цих робочих процесів пов'язані поняття стійкості і нестійкості.

Для вирішення задачі у такій постановці необхідно у математичній моделі об'єкта дослідження врахувати його основні особливості і параметри, що впливають на його поведінку у динаміці за зазначеним режимом експлуатації.

Як основа розробленої математичної моделі взяті апробовані напрацювання з математичних моделей [6, 7, 8]. Після необхідних змін система диференціальних рівнянь за математичною моделлю набирає такого вигляду:

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{z} &= \sum_{i=1}^4 P_{zpi} - \sum_{i=1}^4 NP_{zpi} - G \cdot \cos(\beta kost(t)); \\ I_y \cdot \ddot{\alpha} &= \left( \sum_{i=1}^4 P_{zpi} + \sum_{i=1}^4 NP_{zpi} \right) \cdot l_i; \\ m_1 \cdot \ddot{z}_1 &= P_{zn1} - G_1 \cdot \cos(\beta kost(t)) - P_{zp1}; \\ m_2 \cdot \ddot{z}_2 &= P_{zn2} - G_2 \cdot \cos(\beta kost(t)) - P_{zp2}; \\ m_3 \cdot \ddot{z}_3 &= P_{zn3} - G_3 \cdot \cos(\beta kost(t)) - P_{zp3}; \\ m_4 \cdot \ddot{z}_4 &= P_{zn4} - G_4 \cdot \cos(\beta kost(t)) - P_{zp4}; \\ Nm_1 \cdot N\ddot{z}_1 &= NP_{zn1} - NG_1 \cdot \cos(\beta kost(t)) - NP_{zp1}; \\ Nm_2 \cdot N\ddot{z}_2 &= NP_{zn2} - NG_2 \cdot \cos(\beta kost(t)) - NP_{zp1}; \\ Nm_3 \cdot N\ddot{z}_3 &= NP_{zn3} - NG_3 \cdot \cos(\beta kost(t)) - NP_{zp1}; \\ Nm_4 \cdot N\ddot{z}_4 &= NP_{zn4} - NG_4 \cdot \cos(\beta kost(t)) - NP_{zp1}; \\ I_x \cdot \ddot{\psi} &= \left( \sum_{i=1}^4 P_{zpi} + \sum_{i=1}^4 NP_{zpi} \right) \cdot L_i - G \cdot \sin(\beta kost(t)) \cdot h_{CV}, \end{aligned}$$

де  $M, G, I_y, I_x$  – маса, вага та моменти інерції підресореного корпусу відносно поперечної  $OY$  і повздовжньої  $OX$  осей системи координат  $OXYZ$  з началом  $O$  у центрі мас;

$\ddot{z}, \ddot{z}_1 \dots \ddot{z}_4$  – лінійні прискорення в напрямку осі  $OZ$  центра мас корпусу та коліс 1, 2, 3, 4 по ходу машини;

$\ddot{\alpha}, \ddot{\psi}$  – кутові прискорення корпусу машини відносно поперечної  $OY$  і повздовжньої  $OX$  осей відповідно;

$P_{zpi}$  – зусилля між колесом і корпусом машини, обумовлене дією пружних і демпфуючих сил підвіски;

$l_i$  – відстані в напрямку осі  $OX$  від центра маси підресореного корпусу до осі  $i$ -го колеса (вздовж машини);

$L_i$  – відстані в напрямку осі  $OY$  від центра маси підресореного корпусу до  $i$ -го колеса (поперек машини);

$m_i, G_i$  – маса та вага непідресорених частин підвіски;

$P_{zni}$  – зусилля між опорною поверхнею і колесом  $i$ -ї підвіски;

$h_{cv}$  – відстань центра мас машини від опорної поверхні;

$\beta_{kost}(t)$  – поточне значення кута нахилу опорної поверхні косогіру.

Літерою  $N$  у диференціальних рівняннях позначені сили на правому по ходу руху борту машини.

Отримані за результатами розрахунків осцилограми зміни деяких параметрів у часі (основних у межах поставленої задачі) наведені у табл. 1 за варіантами 1, 2 та 3. Результати обробки осцилограм представлені в табл. 2.

У таблицях введені такі позначення.

$\Delta M_{kost}(t)$  – різниця між моментом  $M_{kosvost}(t)$ , який утримує машину від поперечного перевертання, і моментом  $M_{kosopr}(t)$ , який сприяє перевертанням.

$$M_{kosvost}(t) = G \cdot \cos \left[ \beta_{kost}(t) \cdot \frac{L_{kol}}{2} + ((G_1 + G_2 + G_3 + G_4) \cdot \cos(\beta_{kost}(t))) \right] \cdot L_{kol},$$

$$M_{kosopr}(t) = G \cdot \sin(\beta_{kost}(t)) \cdot h_{cv},$$

де  $L_{kol}$  – колія машини.

$$\Delta M_{kost}(t) = M_{kosvost}(t) - M_{kosopr}(t).$$

Якщо  $\Delta M_{kost}(t)$  від'ємна величина – машина перебуває у стані, який призводить до її перевертання з більшим або меншим кутовим прискоренням відносно лінії контактів коліс з опорною поверхнею того борту машини, колеса якого не втратили контакту з опорною поверхнею.

Перевертання можливе, якщо не має зсуву машини за умовою зчеплення з опорною поверхнею.

$\Delta P_{y\beta Spk}(t)$  – різниця між сумою сил зчеплення усіх коліс обох бортів  $Spkossc(t)$  і поперечною силою  $PSpkossc(t)$ .

$$Spkossc(t) = (Pz_{ni}(t) + NPz_{ni}(t)) \psi_{SC},$$

$$PSpkossc(t) = Gn \cdot \sin(\beta_{kost}(t)),$$

де  $Gn$  – повна вага машини;  $\psi_{SC}$  – коефіцієнт зчеплення.

$$\Delta P_{y\beta Spk}(t) = Spkossc(t) - PSpkossc(t).$$

Якщо  $\Delta P_{y\beta Spk}(t)$  від'ємна величина – машина перебуває у стані сповзання.

$s11(t)$  – поточне значення поперечного кута нахилу машини відносно опорної поверхні, рад.

$\beta_{sk11}(t)$ ,  $\beta_m$  – відповідно поточне і максимальне значення поперечного кута нахилу машини відносно горизонтальної поверхні, рад.

$\alpha_{Jxm}(t)$  – кутові прискорення машини відносно поздовжньої осі машини, рад/с<sup>2</sup>.

За закладеним алгоритмом розрахунків наїзд на косогір починається на другій і закінчується на десятій секунді. З другої по п'яту секунди (протягом  $t_{ZMK} = 3$  с) машина рухається по поверхні із змінним кутом  $\beta$  нахилу поверхні ( $\beta$  у межах  $0 \dots \beta_m$ ). Починаючи з п'ятої секунди кут поперечного нахилу постійний і дорівнює  $\beta_m$ . За умови, що за час  $t_{ZMK}$  машина пройде шлях, рівний базі машини

$$L_{baz}, \text{ середня швидкість машини } V_{CP} = \frac{3,6 \cdot L_{baz}}{t_{ZMK}} = 5,28 \text{ км/год.}$$

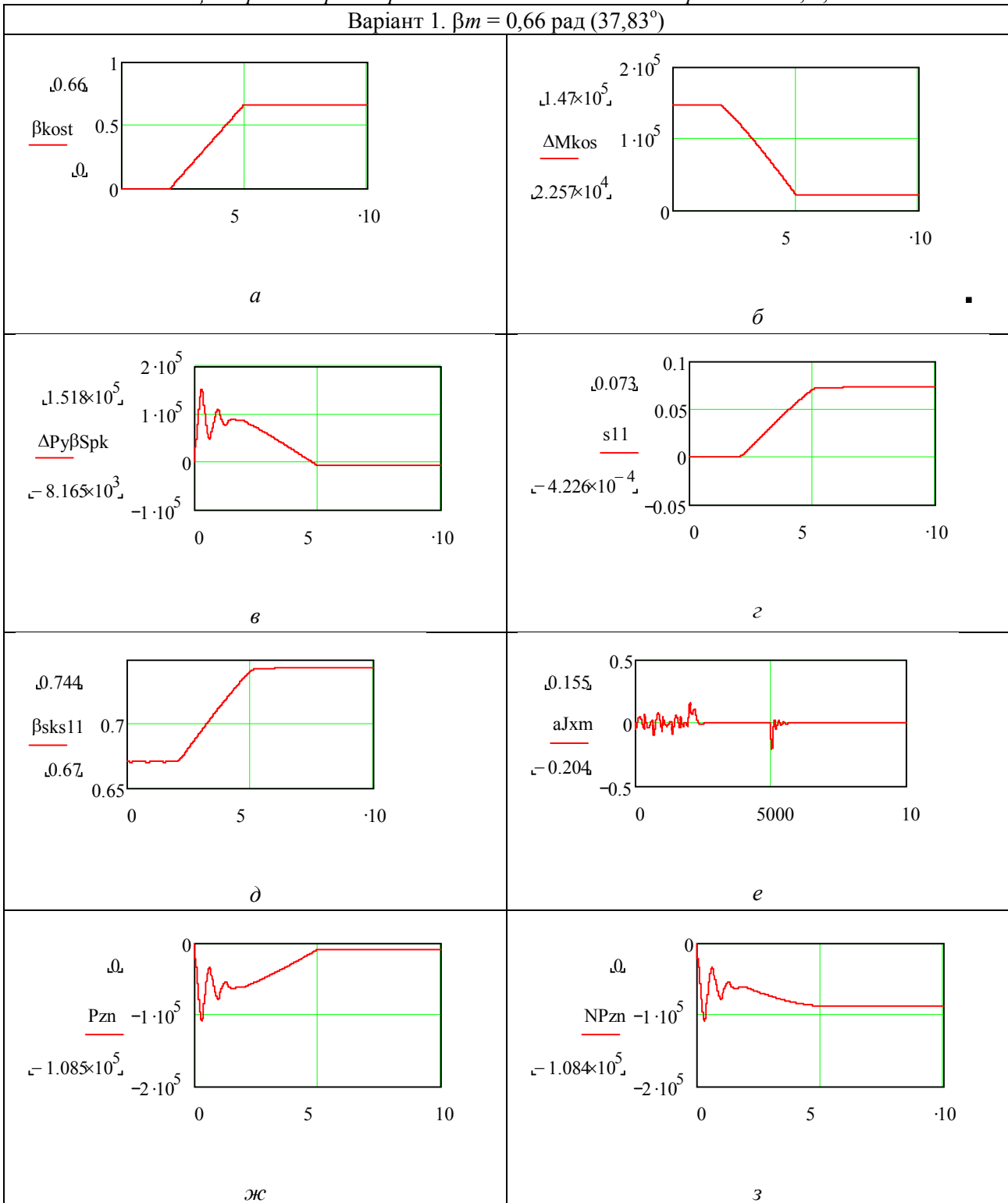
Розрахунки виконані для машини з параметрами, близькими до параметрів БТР70, БТР80.

Коефіцієнт зчеплення  $\psi_{SC}$  прийнятий 0,7.

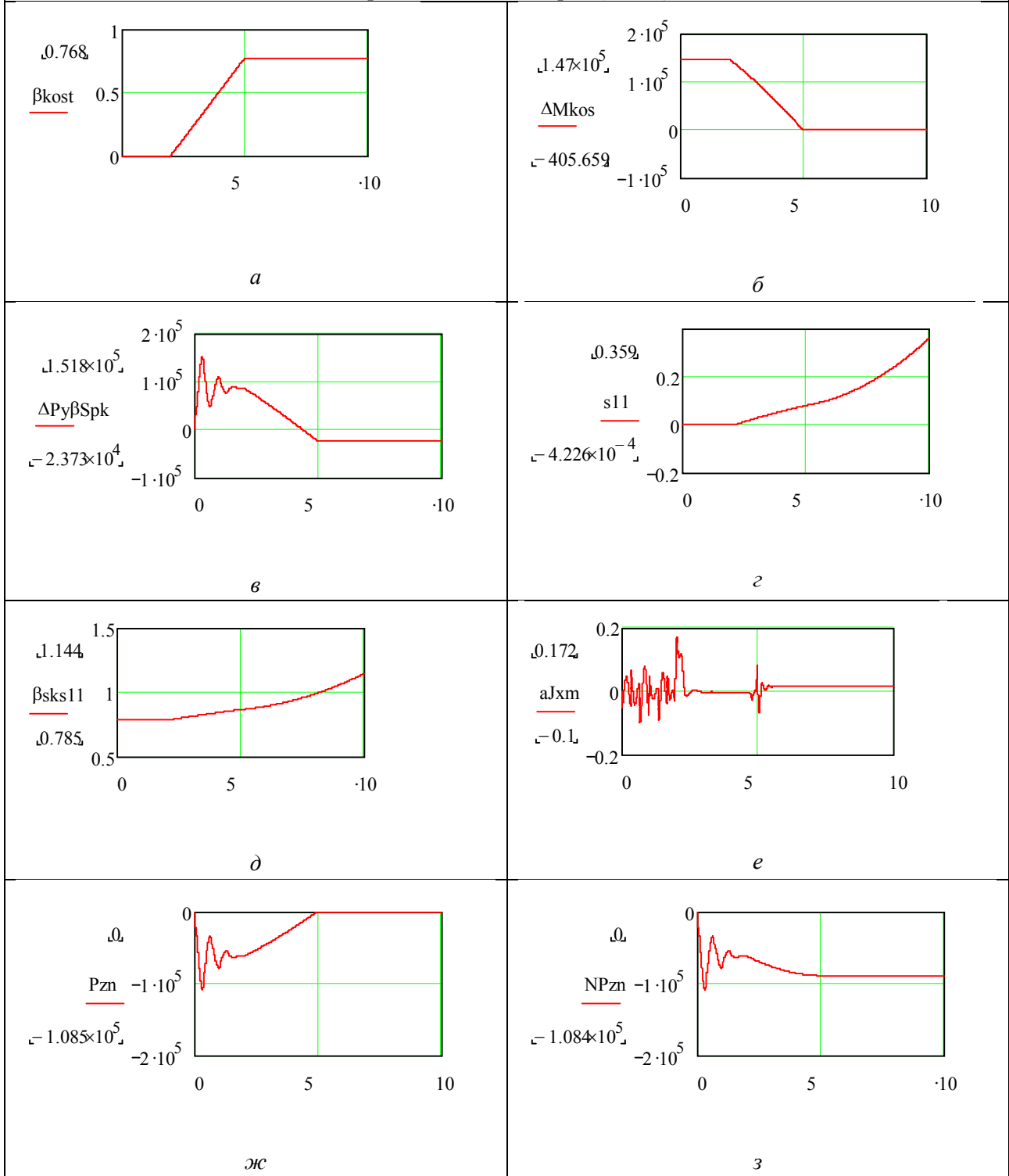
Вихідні дані варіантів 1, 2, 3 відрізняються початковими умовами за максимальним значенням кутів поперечного нахилу опорної поверхні, відповідно  $\beta_m = 37,83^\circ$ ,  $\beta_m = 44,02^\circ$ ,  $\beta_m = 44,71^\circ$ .

Осцилограми параметрів об'єкта дослідження за варіантами 1, 2, 3

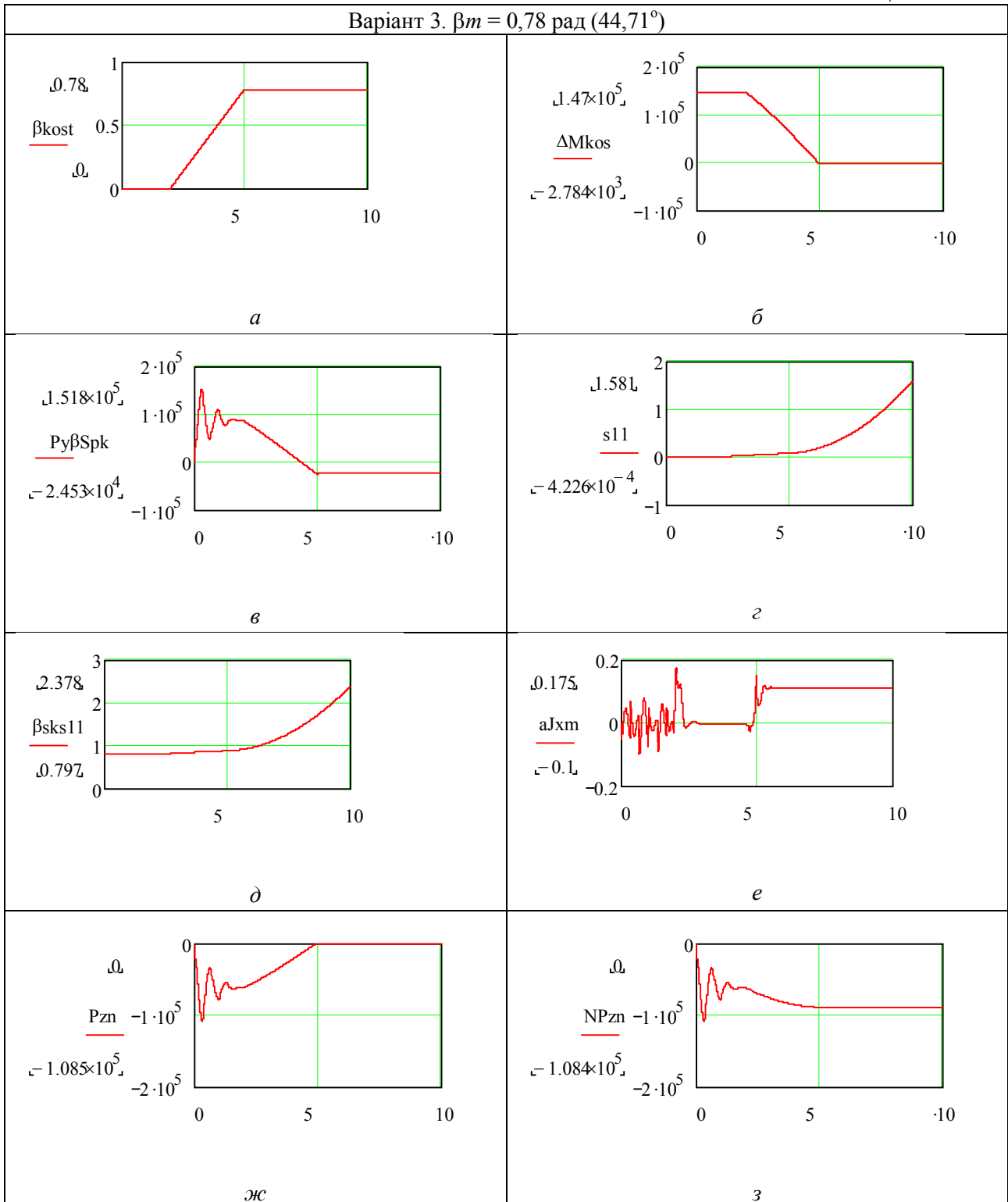
Варіант 1.  $\beta m = 0,66$  рад ( $37,83^\circ$ )



Варіант 2.  $\beta m = 0,768$  рад ( $44,02^\circ$ )



Варіант 3.  $\beta m = 0,78$  рад ( $44,71^\circ$ )



Оцінювання об'єкта дослідження за станами перевертання та сповзання при русі по косягору з постійним кутом нахилу  $\beta m = \text{const}$ , починаючи з  $t = 5,28$  с

Осцилограма	Параметр	Варіанти		
		1	2	3
<i>a</i>	$\beta_{kost}(t)$ рад (град)	$\beta m = 0,66$ (37,83)	$\beta m = 0,768$ (44,02)	$\beta m = 0,78$ (44,71)
<i>б</i>	$\Delta M_{kost}(t)$ Н·м	$2,257 \cdot 10^4$ перевертання немає	$-0,04056 \cdot 10^4$ умови перевертання сформовані	$-27,84 \cdot 10^4$ умови перевертання сформовані
<i>в</i>	$\Delta P_{\gamma \beta Spk}(t)$ Н	$-8,165 \cdot 10^3$ умови ковзання сформовані	$-22,73 \cdot 10^3$ умови ковзання сформовані	$-24,53 \cdot 10^3$ умови ковзання сформовані
<i>г</i>	$s_{11}(t)$ рад (град)	0,073 (4,18)	0,08 (4,58) 0,359 (20,57) – при $t = 10$ с	0,1 (5,73) 1,581 (90,63) – при $t = 10$ с
<i>д</i>	$\beta_{sk s_{11}}(t)$ рад (град)	0,744 (42,64)	0,966 (55,37) 1,144 (65,57) – при $t = 10$ с	0,903 (53,31) 2,378 (138,31) – при $t = 10$ с
<i>е</i>	$\alpha J_{xm}(t)$ рад/с <sup>2</sup>	0	0,022	0,106
<i>ж</i>	$P_{zn_i}(t)$ Н	$9,6 \cdot 10^3$ відривів немає	0 відриви є	0 відриви є
<i>з</i>	$NP_{zn_i}(t)$ Н	$87 \cdot 10^3$ відривів немає	$93 \cdot 10^3$ відривів немає	$87 \cdot 10^3$ відривів немає

За оцінками (табл. 2) за варіантом 1 ( $\beta m = 37,83^\circ$ ), якщо коефіцієнт зчеплення буде таким, що ковзання не буде (резерв за максимальним коефіцієнтом зчеплення маємо в межах  $0,7 \dots 0,9$  [2]), то перевертання не відбудеться. За варіантом 2 ( $\beta m = 44,02^\circ$ ) і варіантом 3 ( $\beta m = 44,71^\circ$ ) має місце початок і продовження перевертання, також за умови відсутності ковзання.

Суттєву роль при цьому відіграє величина кута  $\beta m$ , незначне збільшення якого (лише на  $0,69^\circ$ ), призводить до збільшення фактора  $\Delta M_{kost}(t)$ , що збурює приблизно у 7 разів, а на десятій секунді – кутів  $s_{11}(t)$  та  $\beta_{sk s_{11}}(t)$  відповідно приблизно у 4,5 і 2,0 рази, кутових прискорень  $\alpha J_{xm}(t)$  – приблизно у 5 разів.

За результатами розгляду і порівняння величин критичних параметрів  $\beta_{kropr} = 38,46^\circ$ ,  $\beta_{kr\psi} = 42,01^\circ$  (для  $\psi_{SC} = 0,9$ ) з кутом нахилу  $\beta_{sk s_{11}}(t) = 42,64^\circ$  (табл. 2, варіант 1) можна очікувати, що при  $\psi_{SC} = 0,9$  ковзання і перевертання не буде.

Разом з тим за тактико-технічною характеристикою допустимий крен дорівнює  $25^\circ$ . У зв'язку з цим можна говорити про певний запас у  $13 \dots 17^\circ$  за нахилом опорної поверхні. Його можна трактувати як данину невизначеності.

При цьому треба мати на увазі, що в статті як приклад розглянуто сталий прямолінійний рух машини при наїзді на косяг по поверхні без нерівностей. На практиці, як правило, є відхилення від цих умов. Має місце маневрування, зокрема перестановка, поворот і гальмування на повороті, а також різний стан опорної поверхні.

Також з практики відомо, що перевертання, стійкість до якого визначається за результатами суб'єктивного оцінювання дослідника, більш небезпечно, ніж бокове ковзання. У будь-якому разі наявність оцінки рівня невизначеності за запасом з перевертання, з урахуванням особливостей робочого процесу системи “водій – транспортний засіб – середовище” сприятиме підвищенню середніх швидкостей руху по пересіченій місцевості.

### **Висновки**

1. Розроблена математична модель об'єкта дослідження щодо визначення параметрів за станами перевертання і ковзання дозволяє оцінювати ці параметри у динаміці.
2. Застосований підхід до робочих процесів за розробленою математичною моделлю має перспективу подальшого розвитку з поширення складу факторів збурення з виходом на більш комплексну оцінку за запасом з перевертання.
3. Реалізований підхід до вирішення поставленої задачі розширює можливості розробників нової техніки і її замовників у межах технології прикладного оптимального проектування.

### **Список використаних джерел**

1. Теория, конструкция и расчет боевых колесных машин [Текст] / В. И. Медведков и др. – Москва : Академия БТВ, 1976. – 405 с.
2. Литвинов, А. С. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств [Текст] : учебник / А. С. Литвинов, Я. Е. Фаробин. – Москва : Машиностроение, 1989. – 240 с.
3. Бронетанковая техника, основы теории и конструкции [Текст] / под ред. В. И. Медведкова. – Москва : Воениздат, 1973. – 384 с.
4. Вонг, Дж. Теория наземных транспортных средств [Текст] : пер. с англ. – Москва : Машиностроение, 1982. – 284 с.
5. Скотников, В. А. Проходимость машин [Текст] / В. А. Скотников, А. В. Пономарев, А. В. Климанов. – Минск : Наука и техника, 1982. – 328 с.
6. Пісарев, В. П. Можливості транспортного засобу з гальмування за відсутністю пробую підвіски [Текст] / В. П. Пісарев // Вестник НТУ “ХПИ” : сб. науч. тр. – Харьков : НТУ “ХПИ”, 2011. – № 56. – С. 29–33. – (Тематический вып. “Автомобиле- и тракторостроение”).
7. Пісарев, В. П. Моделювання процесу підриву бойової колісної машини у випадку наїзду на міну [Текст] / В. П. Пісарев // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харьков : Акад. ВВ МВС України, 2013. – Вип. 1 (21). – С. 5–8.
8. Пісарев, В. П. Оцінювання стійкості руху бойової колісної машини за перехідними та сталими станами в режимі повороту [Текст] / В. П. Пісарев // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – Харків : НАНГУ, 2015. – Вип. 2 (26). – С. 15–26.

*Стаття надійшла до редакції 12.02.2018 р.*

**УДК 629.4.027**

**В. П. Пісарев**

### **РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ МАШИНЫ НА КОСОГОРЕ С ОЦЕНКОЙ ВОЗМОЖНОСТИ СПОЛЗАНИЯ И ПЕРЕВОРАЧИВАНИЯ В ДИНАМИКЕ**

*Предложена математическая модель БКМ с выходом на параметры сползания и переворачивания на косогоре в динамике. Приведен алгоритм и пример расчета для колесной машины с параметрами, близкими к современным БКМ.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: устойчивость, режимы движения, параметры оценки.*



UDC 629.4.027

V. P. Pisarev

**WORKING PROCESS BY MACHINE MOVEMENT AT COSOGRAPHY WITH EVALUATION OF POSSIBILITY OF DIVISION AND TRANSMISSION IN DYNAMICS**

*At present, there is no generally accepted system of indicators for assessing the stability of the vehicle and the position of the vehicle. This is due to the complexity of theoretical studies and research on natural samples, especially in dynamics. In connection with this, further development of tools for solving the problem in a practical plane is required within the framework of the theory and practice of applied optimal design of complex technical systems.*

*The purpose of the article is to bring to the scientific community the results of the development of a mathematical model of the object of research and calculation results on an example of a wheeled vehicle with parameters close to modern armored wheel cars, with the estimation of the possibility of slipping and turning over when moving on a slope in dynamics.*

*It is known that under the term "stability" is understood a set of qualities that determine the critical parameters for the stability of the vehicle and the position of the vehicle. In this case, sometimes the boundary conditions of stability and instability are determined not by the parameters of motion, but by the position of the vehicle in space (stability of the position). In particular, when considering the working processes that form this quality, apply the basic indicators of stability of the position: the critical angles of the slope over the side sliding and lateral reversal.*

*The mathematical model of an armored wheel car with the access to the parameters of slip and overturning on a shift in dynamics is proposed. The algorithm and calculation example for a wheeled car with parameters close to modern armored wheel cars are presented.*

*Key words: stability, modes of motion, evaluation parameters.*

**Пісарєв Валерій Петрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України.