

## ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУЧНОЇ ЗЕМЛЕРИЙНОЇ МАШИНИ

Лютенко В.Є., Будяник П.О.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

У більшості країн світу землерийна техніка займає ведуче місце серед самохідної і причіпної техніки різного призначення, починаючи від підводних пристроїв і закінчуючи космічними.

Науково-технічні принципи створення такої техніки полягають в використанні передових високошвидкісних низькоенергоємних технологій і мобільної техніки для руйнування природних та штучних середовищ (грунтів, порід, мулів, залізобетонів, цегли тощо) в різних умовах (наземних – дорожніх, оброблення сільськогосподарських земель, інженерно-військові і аварійно-рятувальні роботи, очистка ґрунтів від забруднень, меліорація, іригація, створення траншей, каналів, котлованів, окопів, сховищ тощо; підземних – видобування корисних копалин та інших видів зайнятості).

При розробленні міцних ґрунтів одним із основних напрямів є удосконалення машин безперервної дії побудованих на принципах динамічного руйнування та хвильової теорії деформації ґрунтів.

При розробленні математичної моделі для дослідження динаміки ручної землерийної машини, в роботі розглядаються механічні коливальні системи у тісному взаємозв'язку з електромагнітними процесами в електроприводі. В результаті розроблена математична модель динамічних процесів, з використанням математичного застосунку MathCAD, яка включає як диференціальні рівняння руху привідної системи землерийної машини так і диференціальне рівняння електромагнітних явищ в електродвигуні.

Метою роботи є висвітлення результатів математичного моделювання коливальних процесів, з використанням застосунку MathCAD, при роботі ручної землерийної машини та визначення динамічних навантажень на її елементи.

В результаті розв'язання диференціальних рівнянь створеної математичної моделі одержано значення моменту електродвигуна, кутові переміщення і швидкості його ротора та обертаючих мас приводу, а також їх кутові прискорення. Для розглянутих перехідних процесів характерне коливання електромагнітного моменту, кутової швидкості і прискорень робочого органу. Тому розрахунки робочих режимів ручної землерийної машини необхідно виконувати на основі рівнянь електромеханічного стану системи.

В роботі теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, динаміку механізму приводу ручної землерийної машини. Отримані результати дослідження механізму приводу ручної землерийної машини, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, можуть бути використані при проектуванні, розрахунку та визначенні динамічних навантажень подібних землерийних машин.

**Ключові слова:** вібрація, ручна землерийна машини, робочий орган, машина безперервної дії, продуктивність.

**Вступ.** При роботі існуючих типових металників безперервної дії їх робочі органи, при розробленні ґрунтів, здійснюють перемішування їх частинок з різним зарядом енергії, в результаті чого здійснюється непродуктивне додаткове перемішування ґрунту. Тому, створення машин робочі органи яких будуть розділяти

потоки зруйнованого ґрунту і видаляти його з вибою ґрунтовиносними елементами окремо є досить актуальним.

Дана робота і направлена на розроблення та дослідження ручної землерийної машини з робочим органом, який міг би здійснювати процес руйнування ґрунту з розділенням його на потоки і подальше транспортувати його із вибою ґрунтовиносними елементами роздільно.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В машинах безперервної дії, на протязі всього часу роботи в вибої, робочий орган безпосередньо взаємодіє з ґрунтом і всі технологічні операції виконуються водночас. Машини безперервної дії при роботі виконують два процеси: процес різання ґрунту в вибої та процес екскавації (видалення) ґрунту з зони його руйнування і викиданням з вибою. На даний час, ще не існує теорії яка б об'єднувала ці два процеси разом – сучасні теорії розглядають їх окремо.

Дослідженню процесів розроблення ґрунтів машинами циклічної і безперервної дії присвячені наступні роботи Ю.А. Ветрова [1], В.Л. Баладінського [2,3], А.М. Зеленіна [4], В.П. Горячкіна [5], М.Г. Домбровського [6], В.В. Нічке [7], В.К. Руднева [8], В.І. Баловнева [9, 10, 11], А.М. Холодова [12], Л.Є. Пелевіна [13], Л.А. Хмари [11], О.М. Гаркавенка [14], Є.В. Горбатюка [13]. Із іноземних робіт необхідно відмітити Н.Бернакса [15].

Із названих робіт необхідно виділити наступні роботи, які найбільшу цікавість представляють. Баладінський В.Л. [2] розробив теорію динамічного руйнування ґрунтів, в якій вивів залежності за допомогою яких можна визначити фізико-механічні властивості ґрунтів для подальшого вирахування сили опору ґрунту руйнуванню.

Баловнев В.І. [10] розробив теоретичні основи фізичного моделювання робочих процесів, які виконують будівельні і дорожні машини. Запропонована методика дає можливість оптимізувати основні параметри машин, а також оцінити перспективність нових рішень за результатами лабораторних випробувань.

Гаркавенко О.М. [14] розробив новий принцип більш продуктивного розроблення ґрунтів швидкісними дисковими робочими органами, який дає можливість зменшити енергозатрати на руйнування середовища за рахунок підрізання вибою та його руйнації.

Для отримання більш достовірних результатів, при розробленні математичних моделей для дослідження динаміки ручної землерийної машини, нами розглядаються механічні коливальні системи у тісному взаємозв'язку з електромагнітними процесами в електроприводі [15 – 16]. Враховуюче сказане, нами розроблена математична модель для дослідження динамічних процесів, з використанням математичного застосунку MathCAD, яка включає як диференціальні рівняння руху привідної системи землерийної машини так і диференціальне рівняння електромагнітних явищ в електродвигуні.

**Постановка проблеми.** Метою статті є висвітлення результатів математичного моделювання коливальних процесів, з використанням застосунку MathCAD, при роботі ручної землерийної машини та визначення динамічних навантажень на її елементи.

**Результати дослідження.** Сучасні землерийні машини являють собою пружну багатомасову систему, що володіє нескінченним числом ступенів вільності. Однак можна виділити найбільш характерні елементи: це рама землерийної машини, робочий орган та його привід.

Розглянемо, нами спроектовану, ручну землерийну машину. Якщо не враховувати податливості нерухомої частини землерийної машини (рами), вважаючи, що вона має велику жорсткість, розрахункову схему землерийної машини з приводом можна представити у вигляді двомасової пружної системи (рис.1).

На схемі (рис. 1) здійснення приводу землерийної машини передбачається за допомогою електродвигуна. Елементи обертових частин привода, робочий орган, які володіють значними жорсткостями й невеликими довжинами, приймаємо як ланки із зосередженими масами.

Розв'язання рівнянь руху зводиться до розгляду коливань пружної системи при певних крайових умовах завдання. Перехідні процеси, що мають місце у роботі приводних механізмів землерийних машин, значною мірою визначають динамічні навантаження в елементах розглянутих систем. На динаміку процесів пуску й зупинення механізму привода землерийної машини істотно впливають інерційні й жорсткісні параметри елементів. При розгляді динамічних явищ, які виникають під час пуску привода землерийної машини, за основний випадок умов навантаження системи приймемо поворот робочого органу з максимальним його навантаженням.

На розрахунковій схемі (див. рис. 1) прийняті наступні позначення:

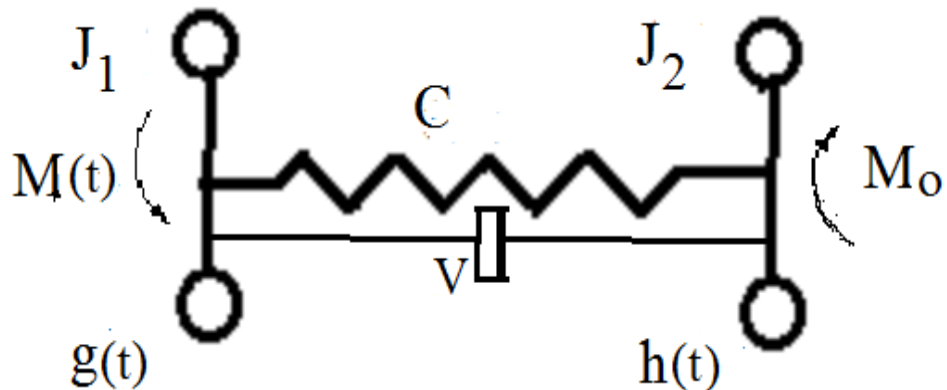


Рис.1. Розрахункова схема навантаження механізму привода землерийної машини під час пуску приводного механізму

де  $J_1$  – зведений до робочого органу момент інерції ротора електродвигуна;  $J_2$  – момент інерції робочого органу;  $n_1 = g(t)$ ,  $n_2 = h(t)$  – кути повороту відповідно першої і другої мас (кути відліку);  $C$  – приведений коефіцієнт жорсткості елементів привода.

Приведення всіх мас привода, жорсткостей пружних ланок, а також сил робимо до осі обертання робочого органу.

Рівняння руху запишемо в такому вигляді:

$$J_1 n_1'' + C(n_1 - n_2) + v(n_1' - n_2') = M(t); \quad (1)$$

$$J_2 n_2'' - C(n_1 - n_2) - v(n_1' - n_2') = -M_o, \quad (2)$$

момент електродвигуна виразимо диференціальною залежністю [16]

$$M(t) = A_0 u + A_1 M'(t) + A_2 u^2 g'(t), \quad (3)$$

де  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_1'$ ,  $n_2'$  – кутове переміщення і кутова швидкість мас  $J_1$  і  $J_2$  у напрямку повороту;  $v$  – коефіцієнт, що характеризує загасання;  $M_o$  – момент, який створює сумарна сила опору, що діє на робочий орган і приведений до його осі обертання  $M_o = P_o u = 70 \cdot 2 = 140$  Н·м;  $C = 8658$  Н·м/рад;  $P_o$  – сумарна сила опору;  $u = 2$  – передавальне число привода;  $A_0, A_1, A_2$  – постійні електродвигуна. Значення постійних визначаються виразами:

$$A_0 = \frac{2M_k}{S_k}; A_1 = \frac{1}{\omega_0 S_k}; A_2 = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k}, \quad (4)$$

де  $M_k$  – критичний момент двигуна;  $S_k$  – критичне ковзання ротора;  $\omega_0$  – синхронна кутова швидкість двигуна;  $t$  – час.

Початкові умови представимо у вигляді

$$(t=0) \quad n_{10}=0, \quad n_{20}=0; \quad n_{10}'=0, \quad n_{20}'=0, \quad M_0=0. \quad (5)$$

Для зручності рішення на ЕОМ системи рівнянь, з використанням застосунку MathCAD, приводимо її до такого вигляду із подальшою заміною  $n_1 = g(t)$ ;  $n_2 = h(t)$ ;  $n_1' = o(t)$ ;  $n_2' = b(t)$ :

$$J_2 h''(t) - C [g(t) - h(t)] - v [g'(t) - h'(t)] = -M_0;$$

$$M(t) = A_0 u + A_1 M'(t) + A_2 u^2 g'(t).$$

$$g'(t) = o(t);$$

$$o'(t) = -\frac{C}{J_1} g(t) - \frac{v}{J_1} o(t) + \frac{C}{J_1} h(t) + \frac{v}{J_1} b(t) + \frac{1}{J_1} M(t);$$

$$h'(t) = b(t); \quad (6)$$

$$b'(t) = \frac{C}{J_2} g(t) + \frac{v}{J_2} o(t) - \frac{C}{J_2} h(t) - \frac{v}{J_2} b(t) - \frac{M_0}{J_2};$$

$$M'(t) = -\frac{A_2 u^2}{A_1} g'(t) + \frac{1}{A_1} M(t) - \frac{A_0 u}{A_1}.$$

Після підстановки даних взятих із таблиць 1 і 2 отримаємо

$$g'(t) = o(t);$$

$$o'(t) = 33,3M(t) - 288600g(t) - 27704000o(t) + 288600h(t) + 27704000b(t);$$

$$h'(t) = b(t); \quad (7)$$

$$b'(t) = 1396452g(t) + 129212903o(t) - 1396452h(t) - 129212903b(t) - 22581;$$

$$M'(t) = -182M(t) - 33840o(t) + 1436364.$$

Розв'язання системи рівнянь (7) робимо для механізму привода ручної землерийної машини, що має параметри, наведені в таблиці 1

Таблиця 1

Параметри ручної землерийної машини

Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення	Параметр	Одиниці вимірювання	Числові значення
$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	0,03	u	–	2
$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	0,0062	C	Н·м/рад	8658
$M_0$	Н·м	140	v	–	801120

Обчислені значення постійних  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  для робочої характеристика електродвигуна наведені в таблиці 2.

В результаті розв'язання одержуємо значення моменту електродвигуна, кутові переміщення, швидкості, а також прискорення його ротора та обертаючих мас привода.

Побудований за виконаними розрахунками графік зміни моменту електродвигуна у функції часу (рис. 2) показує, що розгін привода землерийної машини триває близько 2 с від моменту його включення. Максимального значення момент досягає при  $t = 0,8$  с від початку пуску.

Таблиця 2

Значення постійних електродвигуна					
Тип електродвигуна	Режим роботи електродвигуна	Кутова швидкість ротора електродвигуна, рад/с	Постійні електродвигуна		
			$A_0$	$A_1$	$A_2$
МТК 012-6 N=2,7 кВт n = 760 об/хв	робоча характеристика	79,55	3950	-0,055	-46,53

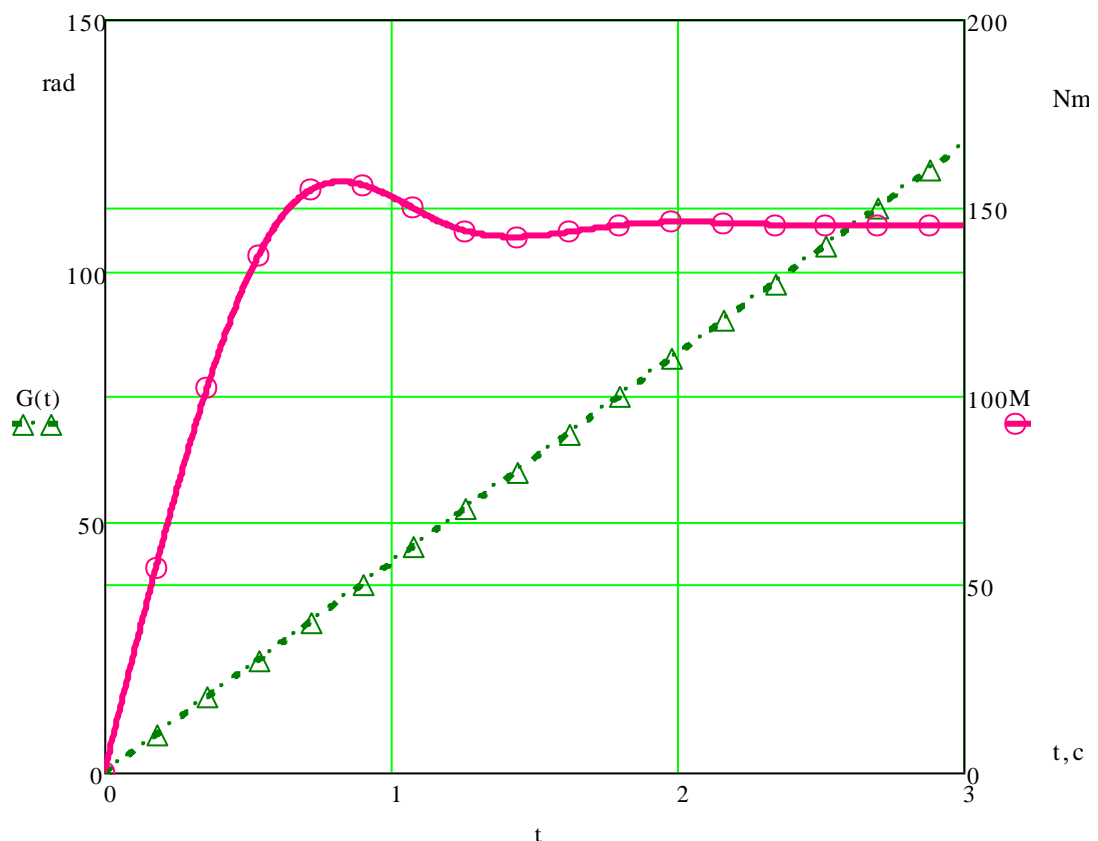


Рис.2. Кутове переміщення маси  $G(t) = \varphi_1$  та зміна моменту електродвигуна механізму привода ручної землерийної машини  $M(t)$

Для визначення прискорень у систему диференціальних рівнянь (7) додаємо два рівняння прискорень  $L(t)$  маси  $G(t) = \varphi_1$  та  $E(t)$  маси  $H(t) = \varphi_2$ .

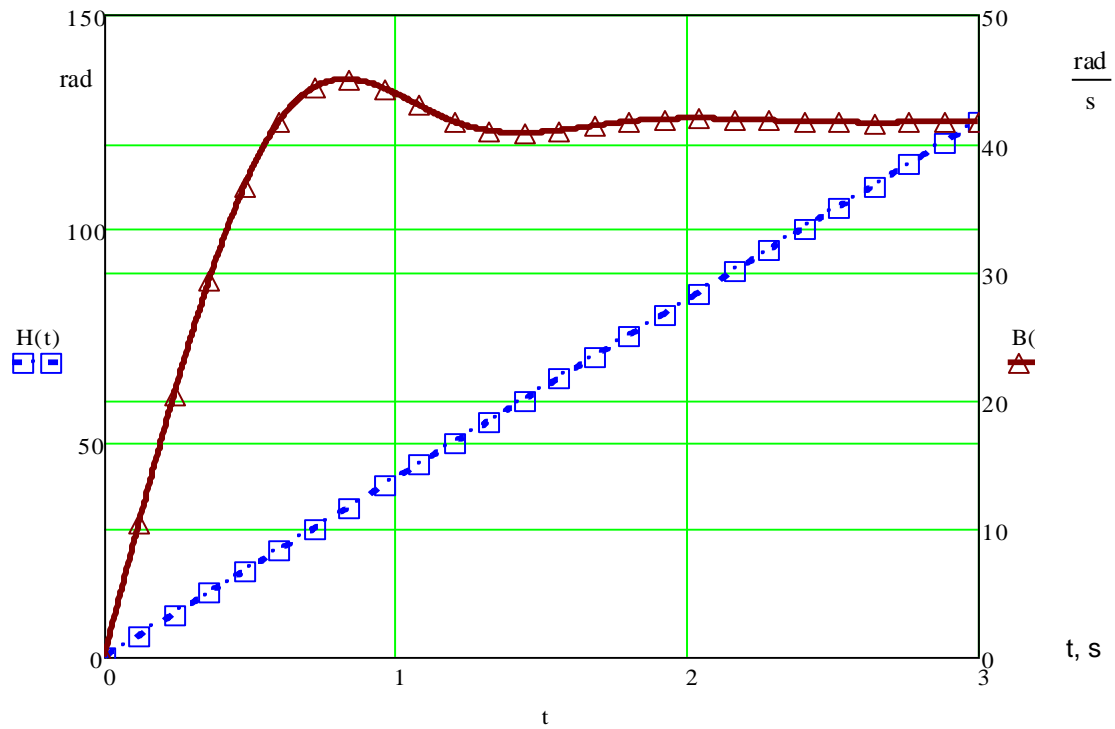


Рис.3. Зміна кутового переміщення маси  $H(t) = \varphi_2$  та кутової швидкості  $B(t) = H'(t) = \varphi'_2$

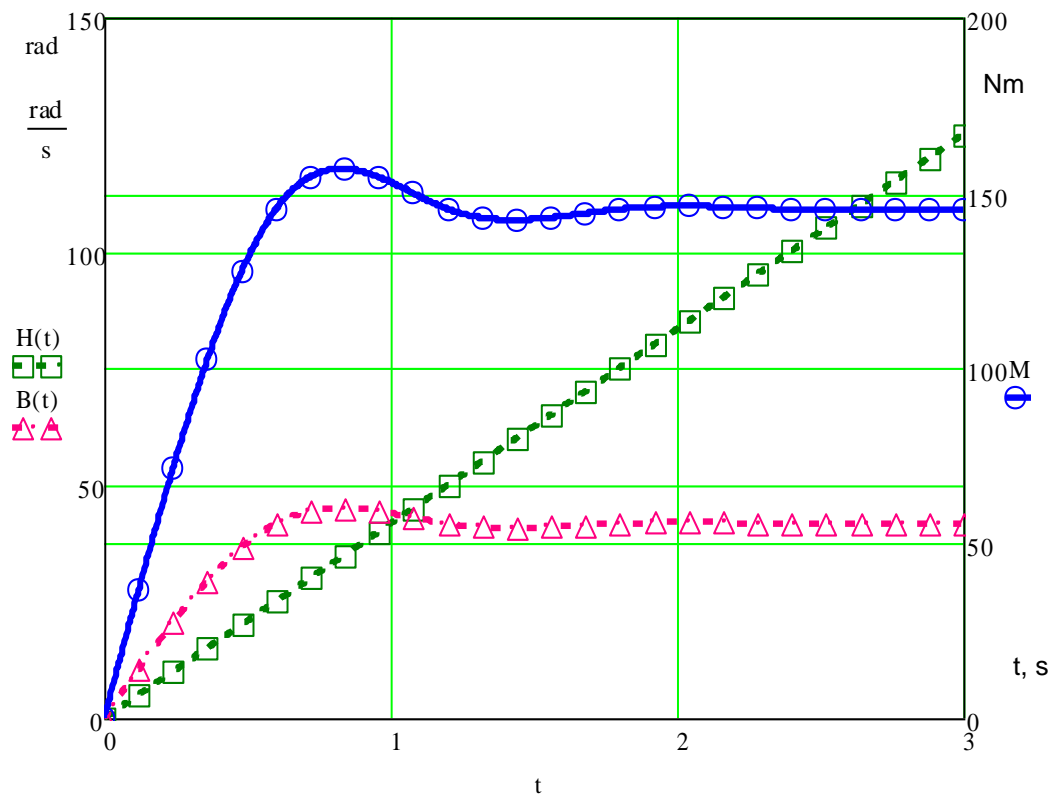


Рис.4. Зміна кутового переміщення маси  $H(t) = \varphi_2$ , кутової швидкості  $B(t) = H'(t) = \varphi'_2$  та моменту електродвигуна ручної землерийної машини  $M(t)$

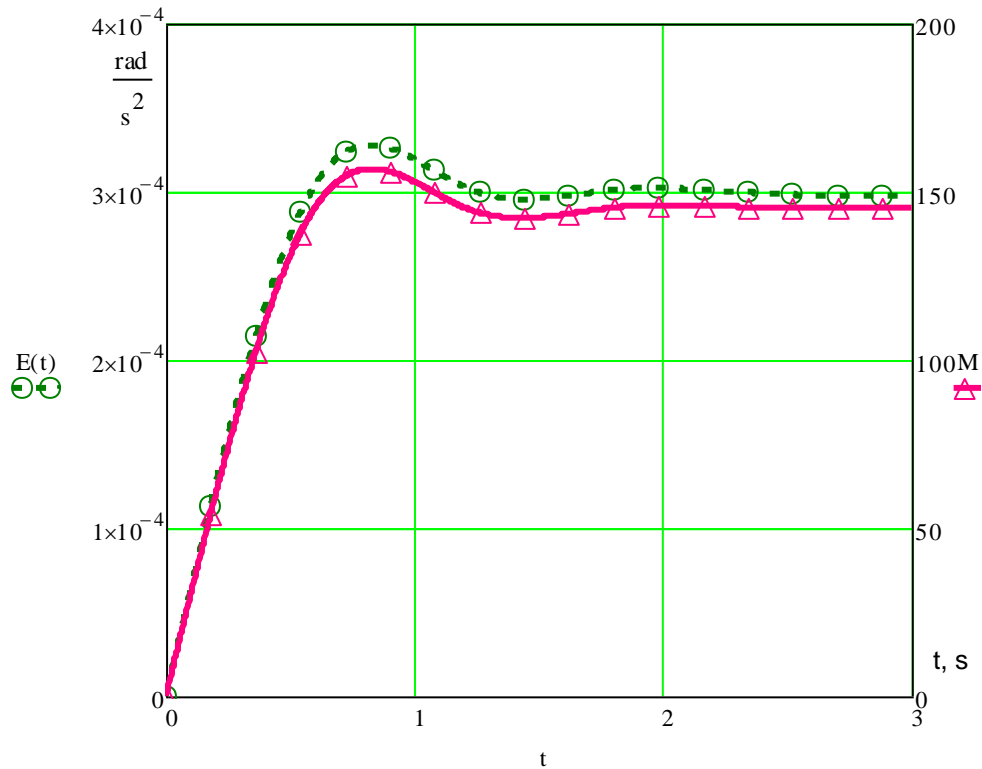


Рис.5. Графік зміни кутового прискорення обертаючих мас  $E(t)$  та моменту електродвигуна механізму привода робочого органу  $M(t)$

$$L(t) = 33,3M(t) - 288600g(t) - 277044000o(t) + 288600h(t) + 27704000b(t);$$

$$E(t) = 1396452g(t) + 129212903o(t) - 1396452h(t) - 129212903b(t) - 22581. \quad (8)$$

Розв'язуючи, з використанням застосунку MathCAD, систему рівнянь (7) з добавленими рівняннями (8) отримаємо значення названих прискорень. У результаті розв'язання одержуємо значення прискорень ротора електродвигуна  $L(t)$  та обертаючих мас приводу  $E(t)$ .

Побудований, за виконаними розрахунками, графік зміни прискорення обертаючих мас приводу  $E(t)$  (рис. 5) показує, що прискорення має коливальний характер. Графік (рис. 5) також показує, що після 1,5 – 2 с момент електродвигуна механізму привода робочого органу  $M(t)$  стає рівним статичному і рух набуває рівномірного характеру.

Наглядно демонструє рис. 4 на якому зображено, що кутова швидкість  $B(t)$  як і момент електродвигуна механізму привода  $M(t)$  також має коливальний характер. По зміні моменту електродвигуна та прискоренню можна визначати характер руху: сталий (статичний) чи коливальний (динамічний).

Порівнюючи побудовані графіки, як з урахуванням загасання  $v$  так і без нього, можна зробити висновок, що загасання не значно впливає на результати обчислень.

Для перехідних процесів, показаних на рис. 2 – 5, характерне коливання електромагнітного моменту, кутової швидкості і прискорень робочого органу. Тому розрахунки робочих режимів ручної землерийної машини необхідно виконувати на основі рівнянь електромеханічного стану системи.

**Висновки.** В роботі теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, динаміку механізму привода ручної землерийної машини.

Отримані результати дослідження механізму привода ручної землерийної машини, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, можуть бути використані при проектуванні, розрахунку та визначенні динамічних навантажень подібних землерийних машин.

#### **Список використаних джерел**

1. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров – М.: Машиностроение, 1971. – 357 с.
2. Баладинский В.Л. Динамическое разрушение грунтов / В.Л. Баладинский – К.: Изд-во Киевского ун-та, 1974. – 221 с.
3. Баладинський В.Л. Принципи створення швидкісної низькоенергоємної землерийної техніки / В.Л. Баладинський // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини: Республ. між від. науково-техн. зб., - К.: КДТУБА, 1999. – Вип. 53. – С. 86-92.
4. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин – М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.
5. Горячкин В.П. Собрание сочинений / В.П. Горячкин: В 6-ти т. – М.: Сельхозиздат, 1938. – 1948.
6. Домбровский Н.Г. Экскаваторы / Н.Г. Домбровский – М.: Машиностроение, 1969. – 318 с.
7. Ничке В.В. Надежность прицепного и навесного оборудования тракторов / В.В. Ничке – Харьков: Вища школа, 1985. – 152 с.
8. Руднев В.К. О коэффициентах сопротивления грунта, мощности, расходуемой при резании грунта вскрышным роторным экскаватором / В.К. Руднев // Горные, строительные и дорожные машины. Респ. межвед. науч.-техн. Сб. – К.: КИСИ, 1965. – Вып. 1. – С. 27 – 37.
9. Баловнев В.И. Дорожно-строительные машины с рабочими органами интенсифицирующего действия / В.И. Баловнев – М.: Машиностроение, 1981. – 223 с.
10. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев – М.: Высшая школа, 1981. – 336 с.
11. Баловнев В.И. Показатели эффективности и определение основных параметров строительных манипуляторов и машин с многоцелевыми рабочими органами / В.И. Баловнев, Л.А. Хмара, Б.Р. Заславский // Сб. научн. трудов МАДИ, 1986. – С. 24-28.
12. Холодов А.М. Основы динамики землеройно-транспортных машин / А.М. Холодов – М.: Машиностроение, 1981. – 280 с.
13. Пелевін Л.Є. Кінематичні параметри робочого органу з направленими потоками енергії руйнування та виносу ґрунту / Л.Є. Пелевін, Є.В. Горбатюк //Техніка будівництва: Науково-технічний журнал, 1999. – Вип. 6. – С.10 – 13.
14. Гаркавенко О.М. Розробка та створення швидкісних обрушуючих дискових робочих органів землерийних машин безперервної дії: Автореф. дис. канд. техн. наук. / КДТУБА. – К., 1996. – 20 с.
15. Bernacks H. Praca jednostkowa uprawowych mazyń kombinowanych. Biuletyn prac. Naukowo Badaweznych, - Warszawa, 1964, Nr.3.
16. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.



## Abstract

### THEORETICAL PRESENTATION OF THE MANUAL GROUND MACHINE

**Liutenko V. Ye. , Budyanik P.O.**

*Earthmoving machinery in highly developed countries is a leading place among all self-propelled and trailer technology of various uses, ranging from underwater and ending with space.*

*At the core of such technology are the scientific and technical principles of the creation of high-speed low-energy technologies and mobile technology for the destruction of natural and artificial environments (soils, rocks, mules, reinforced concrete, bricks, etc.) under different conditions (ground-road, cultivating agricultural land, engineering-military and rescue works, soil clearing from dirt, melioration, irrigation, trenches, canals, pits, trenches, storages etc. underground mining and other forms of employment) .*

*One of the ways to intensify the development of solid soils is to use machines of continuous action built on the principles of dynamic destruction and wave theory of soil deformation, most often with disk operating organs.*

*In developing a mathematical model for studying the dynamics of a manual earthmoving machine, mechanical vibrational systems are considered in close connection with electromagnetic processes in electric drives. As a result, a mathematical model of dynamic processes has been developed, using the mathematical application MathCAD, which includes both differential equations of motion of the drive system of the earthmover machine and the differential equation of the electromagnetic phenomena in the electric motor.*

*The purpose of the work is to highlight the results of the mathematical modeling of oscillation processes, using the MathCAD application, with the manual earthmoving machine and to determine the dynamic loads on its elements.*

*As a result of the solution of the differential equations of the created mathematical model, the value of the moment of the electric motor, the angular displacement and speed of its rotor and the rotating masses of the drive, as well as their angular accelerations, are obtained. For the considered transients, the oscillation of the electromagnetic moment, angular velocity and acceleration of the working body is characteristic. Therefore, calculations of the working modes of a manual earthmoving machine must be performed on the basis of the equations of the electromechanical state of the system.*

*In the work, the mathematical software environment MathCAD, the dynamics of the mechanism of the drive of a manual earthmoving machine is theoretically investigated.*

*The obtained results of the study of the mechanism of a manual earthmover drive drive, using mathematical software environment MathCAD, can be used for designing, calculating and determining the dynamic loads of similar earthmoving machines.*

**Keywords:** *vibration, manual earthmoving machines, working body, machines of continuous action, productivity.*