

УДК 621– 868: 621.151

*Лютенко В.С., Бондал І. І. «Дослідження віброударного способу заглиблення паль»*

Палі для будівництва фундаментів використовувалися ще в далекій давнині. Спочатку палі використовувалися при ущільненні ґрунтів з метою значного підвищення несучої здатності основ фундаментів, а потім – в якості несучих елементів, які можуть передавати навантаження від плити фундаментів на ґрунт. Палі спочатку виготовляли із лісоматеріалів і забивали ручними молотами. Голови паль зрізали нижче рівня води, захищаючи, тим самим, їх від дотикання із повітрям. В даний час в фундаментобудуванні використовується більш ніж 100 типів паль, які класифікуються по трьом найбільш суттєвими признаками: це по особливості передачі навантаження на ґрунт (палі-стійки, висячі, ущільнення, тертя); – по способу заглиблення або вбудуванні палі в ґрунт (що виготовляються раніше і заглиблюються в готовому вигляді; виготовлені в проектному положенні; комбіновані); – по матеріалу: дерев'яні, бетонні, залізобетонні, комбіновані.

По особливостям передачі навантаження на ґрунт найбільше розповсюджені палі -стійки і висячі палі. Палі-стійки передають навантаження на ґрунти в основному нижнім кінцем на малостиснутих ґрунтах (скалісті, пісчані, тверді глини). Висячі палі передають навантаження на любі ґрунти нижнім кінцем, а також за рахунок сил тертя по боковій поверхні.

З кожним роком все більше набуває використання віброударного обладнання, так названих вібромолотів. Ця техніка успішно використовується при спорудженні надійних фундаментів під різні споруди.

Здійснення сказаного вимагає вивчення і дослідження процесу віброударного заглиблення паль. а також створення найбільш продуктивних способів його виконання.

Одним із перспективних напрямків є впровадження фундаментів із паль при будівництві споруд при щільній забудові в містах і селищах.

Також необхідно відмітити, що спорудження фундаментів із паль дає можливість впроваджувати комплексну механізацію і автоматизацію технологічних процесів, що значно підвищує продуктивність робіт.

Віброударне заглиблення паль є одним із найбільш продуктивних способів побудови надійного фундаменту під різні споруди. Віброударне заглиблення, котре широко впроваджується на будівництві, належить до ударної технології заглиблення паль. Метод віброударного заглиблення паль полягає в тому, що при вібрації суттєво зменшуються сили виникаючого тертя і сили зчеплення між палею і ґрунтом, а в результаті значно зменшуються сили опору заглибленню палі.

В даний час, при проектуванні вібромолотів динамічні фактори при їх експлуатації не враховуються. Тому надійність можна підвищити, якщо на стадії їх проектування враховувати хвильовий характер навантажень віброударної техніки.

Віброударне заглиблення паль нами розглядалося у взаємодії механічних і електромагнітних процесів і в результаті була отримана математична модель динамічних процесів при роботі вібромолота, котра включала нелінійні диференціальні рівняння руху мас вібромолота і лінійне диференціальне рівняння електромагнітних явищ в двигуні приводу.

Аналізуючи отриману інформацію можна акцентувати, що віброударному методу заглиблення паль мало приділено уваги і широка інформація практично відсутня. Тому являється актуальним створення продуктивних зразків вібромолотів, методик їх розрахунків і проведення наукових досліджень динаміки робочих процесів цих машин на що і направлена дана магістерська робота.

В даній роботі нами теоретично досліджено, з використанням математичного застосування MathCAD, динаміку вібромолота і отримано результати котрі можуть бути використані при проектуванні та визначенні динамічних навантажень подібних віброударних машин.

При розрахунку вібромолотів на статичну й утомлену міцність коливальні процеси конструкцій та їх динамічні навантаження, в цей час, не враховуються. Однак їх несучу здатність можна значно підвищити, якщо у розрахунках при їх проектуванні враховувати їхні амплітудно-частотні характеристики. Відсутність ж уточненої методики розрахунку сучасних вібраційних машин, в тому числі і вібромолотів, для здійснення ефективного занурення різноманітних паль ускладнює їхнє проектування і експлуатацію.

Метою статті є висвітлення результатів математичного моделювання коливальних процесів при заглибленні паль вібромолотом та визначення динамічних навантажень на його елементи.

В роботі теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, динаміку механізму приводу вібромолота і отримано результати які можуть бути використані при проектуванні, розрахунку та визначенні динамічних навантажень подібних вібраційних машин.

**Ключові слова:** математична модель, динаміка, коливання, вібрація, вібромолот, віброударний спосіб, заглиблення паль.

*Liutenko V.Ye., Bondal I.I. «Investigation of the vibration impact method of pile deepening»*

*Piles for the construction of foundations have been used since ancient times. The piles were first used in soil compaction in order to significantly increase the load-bearing capacity of the foundation bases, and then as supporting elements that can transfer the load from the foundation plate to the soil. The piles were originally made of timber and hammered. The pile heads were cut below the water level, thus protecting them from contact with air. At present, more than 100 types of piles are used in the foundation, which are classified by the three most important features: this is a feature of the transfer of load to the soil (piles, hanging, sealing, friction); - by the method of deepening or embedding piles in the soil (previously produced and deepened in finished form; made in the design position; combined); - by material: wooden, concrete, reinforced concrete, combined.*

*The most widespread piles - pillars and hanging piles - are the most widespread. Piles are used to transfer soil loads mainly to the lower end on low-compressed soils (rocky, sandy, hard clays). Hanging piles transfer the load to any soil at the lower end, as well as due to the friction forces on the side surface.*

*With each passing year, the use of vibration impact equipment, the so-called vibrating hammer, is increasingly beginning. This technique is successfully used in the construction of reliable foundations for various structures. The implementation of the above requires a thorough study and study of the process of vibration shock piles. and creating the most productive ways to accomplish it.*

*One of the promising areas is the introduction of pile foundations in the construction of buildings with dense construction in cities and towns.*

*It should also be noted that the construction of pile foundations makes it possible to implement complex mechanization and automation of technological processes, which significantly increases the productivity of work.*

*Vibrating piles is one of the most productive ways to build a solid foundation for a variety of structures. The vibration shock absorption, which is widely implemented in construction, is a percussion technology for deepening piles. The method of vibration-shocking deepening of piles is that the vibration significantly reduces the forces of emerging friction and the adhesion force between the pile and the soil, and as a result, the resistance to the deepening of the pile is significantly reduced.*

*The vibration impact of the piles was considered by us in the interaction of mechanical and electromagnetic processes and the result was a mathematical model of dynamic processes in the operation of the hammer, which included nonlinear differential equations of motion of the mass of the vibrating hammer and a linear differential equation of electromagnetic phenomena in the drive motor. Implemented the created mathematical model, we built graphs that characterize the process.*

*The vibration impact of the piles was considered by us in the interaction of mechanical and electromagnetic processes and the result was a mathematical model of dynamic processes in the operation of the hammer, which included nonlinear differential equations of motion of the mass of the vibrating hammer and a linear differential equation of electromagnetic phenomena in the drive motor. Implemented the created mathematical model, we built graphs that characterize the process.*

*Analyzing the information obtained, it can be emphasized that the vibration-shock method of pile-driving has received little attention and broad information is practically absent.*

*Therefore, it is important to create productive samples of vibratory hammers, methods of their calculations and to conduct scientific studies of the dynamics of the working processes of these machines, which is what this master's work is aimed at.*

*In this work, we theoretically investigated, using a mathematical application MathCAD, the dynamics of a hammer and obtained the results that can be used in the design and determination of the dynamic loads of such vibration impact machines.*

*When calculating the hammers for static and fatigue strength, the oscillatory processes of structures and their dynamic loads are not taken into account at this time. However, their load-bearing capacity can be significantly increased if their amplitude-frequency characteristics are taken into account in their design calculations. The lack of a refined methodology for calculating modern vibrating machines, including vibratory hammers, for the effective immersion of various piles complicates their design and operation.*

*The purpose of the article is to elucidate the results of mathematical modeling of oscillatory processes in deepening piles with a hammer and to determine the dynamic loads on its elements.*

*In the work, the dynamics of the mechanism of vibrating hammer drive was theoretically investigated, using mathematical software environment MathCAD, and results were obtained that can be used in the design, calculation and determination of dynamic loads of such vibrating machines.*

**Keywords:** *mathematical model, dynamics, oscillations, vibration, vibrating hammer, vibration impact method, deepening of piles.*

## Вступ

Коли не має можливості споруджувати звичайні стрічкові фундаменти в випадку недостатньої несучої спроможності верхніх шарів ґрунту використовують фундаменти із паль – комплекс паль які об'єднані в єдину конструкцію, що передає навантаження на основу, підшву фундаменту. Фундамент із паль включає палі різних конструкцій і ростверк. Найбільш поширений ударний метод заглиблення паль використовують для заглиблення паль в усі види ґрунтів (крім скальних) вібромолотами.

## Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нами уже наголошувалось на те, що багато уваги приділяється, в наш час, вібраційній техніці при спорудженні фундаментів із паль. Значна увага також приділяється використанню віброударного способу заглиблення паль при побудові раціональних фундаментів, мостів та інших споруд. Для виконання цього треба постійно вивчати віброударне заглиблення паль і здійснювати найбільш раціональні способи його виконання.

Теоретичне підґрунтя для створення вібраційних машин було закладено ще у колишньому Радянському Союзі, в тому числі пост-радянському просторі та сучасній Україні. Цими питаннями займалися наступні видатні науковці та провідні інженери, такі як І.І. Артоболевський, А.П. Бабічев, І.І. Блехман, І.І. Биховський, І.Ф. Гончаревич, Б.І.Крюков, Є.Є Лавендел, О.С. Ланець, В.П. Надутий, І.І. Назаренко, А.О. Співаковський, Л.П. Стрельников, Я.Г. Пановко, В.О. Повідайло, В.М. Потураєв, В.Н. Франчук, П.А. Сергєєв та ін.

В періоді 50-х роках першість в області вібраційної техніки було за науковцями Західної Європи та Північної Америки. Але пізніше, за деякий час, за основними напрямками вітчизняні науковці уже випереджали зарубіжних вчених.

Вагомий вклад в розроблення дебалансних приводів внесли науковці Національного гірничого університету та Інституту геотехнічної механіки (м. Дніпро) Б.І.Крюков, В.П. Франчук, В.П. Надутий, в тому числі і їх науковий керівник академік В.М. Потураєв [1]. Коло їх діяльності концентрувалось на дебалансному приводу, що вимагало створення значно простих конструкцій зі значними збурювальними силами для громіздких вібромашин гірничодобувної галузі.

Удосконалення методик та методів розрахунків, а також створення експериментальних зразків виконували науковці Київської школи вібротехніки Ю.Ф. Чубук, І.І. Назаренко, В.Б. Яковенко [2] та ін. Розроблена їхня вібраційна техніка успішно впроваджувалася для ущільнення бетонних сумішей в будівельній галузі.

Розроблення тримасових вібраційних машин виконували науковці та провідні інженери Львівської політехніки В.О. Повідайло, Р.І. Сілін, В.А. Щигель, В.Д. Уфімцев, О.В. Гаврильченко, Ю.П. Шоловій, А.Л. Беспалов [3]. Вони створили та дослідили цілий ряд мало – та середньогабаритних вібраційних машин для різних напрямів, де були застосовані динамічні гасники. Оригінальні конструкції розроблених цих вібромашин були тримасовими, але в остаточних розрахункових схемах вони розглядалися переважно як дво – одномасові.

В свою чергу, необхідно також відмітити вагомий вклад в вивчення коливальних процесів механічних систем наступних зарубіжних вчених Коллаца Л.[4], Тондла А. [5], Йагадіша Н.[8], Каплана Д. [9].

Заглиблення паль віброударним способом є однією із основних операцій при спорудженні різних фундаментів під різні будови. В свою чергу слід відмітити, що від якості побудови фундаменту залежать надійність, міцність, стійкість, а також термін служби будови.

Віброударне заглиблення паль є одним із найбільш раціональних способів спорудження надійного і економічного фундаменту під різні споруди. Віброударне

заглиблення палі, яке широко впроваджується в будівництво належить до віброударного способу занурення палі. Заглиблення палі здійснюють різні вібромолоти. Цими установками занурюють легкі, важкі палі, оболонки великого діаметра у різних ґрунтах, в тому числі міцних. Робота всіх видів віброударних заглиблювачів базується на значному зменшенні коефіцієнта тертя між ґрунтом і поверхнею палі під взаємодією зусиль і їх коливань.

### Постановка проблеми

Метою статті є висвітлення результатів математичного моделювання коливальних процесів при заглибленні палі вібромолотом та визначення динамічних навантажень на його елементи.

### Результати дослідження

Як уже нами відзначалось те, що сучасні вібромолоти мають складну будову, котра може віброударним способом якісно заглиблювати палі при спорудженні різноманітних фундаментів .

Також можемо константувати про вібромолот як про електромеханічну машину. В процесі роботи вона виконує віброударну дію на палю. Вібраційну дію на палю викликають дебаланси, в результаті чого виникають вертикальні відцентрові сили. Нами прийнятий для дослідження спроектований віброударний заглиблювач палі.

Враховуючи те, що в віброударний заглиблювач палі входять пружні елементи, це металеві конструкції і вібратор, діючі сили яких мають змінний характер, то можемо константувати , що при роботі машини при віброударному заглибленні палі пружні ланки коливаються і створюють допоміжні навантаження.

Щоби спростити розрахунки застосовуємо математичну прикладну програму MathCAD.

Віброударні заглиблювачі палі представляють собою коливальну масову систему з великою кількістю вільностей. Пружні ланки характеризуються різними масовими показниками.

Так як уже відзначалось, сучасні віброударні заглиблюючі машини представляють собою пружну багатомасову систему, що володіє нескінченним числом ступенів вільності. Однак можна виділити найбільш характерні елементи віброударної заглиблюючої системи цих машин. Це паля з оголовком і наковальнею, корпус вібромолота, електродвигун і ударна частина віброударного заглиблювача, а також його привід.

При врахуванні податливості нерухомої частини ( наковальні, оголовка палі і самої палі) віброударного заглиблювача, хоча вона складає значно велику жорсткість, в даному випадку розрахункову схему машини із приводом, палею з оголовком і наковальнею можна представити у вигляді тримасової пружної системи (рис.1).

На схемі (рис.1) віброударне заглиблення палі передбачається здійснювати за допомогою електропривода. Елементи обертових частин привода, паля з оголовком, наковальня, які володіють значними жорсткостями й невеликими довжинами, приймаємо як ланки із зосередженими масами.

Розглянемо, нами спроектований, віброударний заглиблювач як тримасову систему (рис.1). Приведення всіх мас системи, жорсткостей пружних ланок, а також сил та моментів робимо до осі обертання ротора електродвигуна.

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

$J_1$  – момент інерції ротора електродвигуна ;

$m_1$  – приведена маса дебалансів ;

$m_2$  – приведена маса корпусу вібромолота, електродвигуна і його ударної частини;

$m_3$  – приведена маса наковальні, оголовка палі і самої палі;

$c_1$  – приведена жорсткість зубчастої передачі;

$c_2$  – приведена жорсткість пружин;

$\varphi_1, x_2, x_3$  – кут повороту, лінійні переміщення відповідно першої, другої і третьої мас;

$x = 0,0174r\varphi$  – залежність між кутовими і лінійними переміщеннями мас;

$r = e = 300\text{мм}$  – ексцентриситет дебалансів;

$M_{CD}$  – приведений момент сил опору переміщення (обертання) дебалансів;

$M_{СП}$  – приведений момент сил опору переміщення палі;

$M(t)$  – момент електродвигуна привода;  $\nu$  – властивий коефіцієнт дисипації.

Для складання рівнянь руху та електромагнітного стану електродвигуна привода скористаємося наступними рівняннями у формі (рис.1):

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 - m_1 e x_1 \ddot{\sin \varphi}_1 - c_1 (x_2 - 0,0174 r \varphi_1) = M(t) \cdot i^2 - M_{CD}; \quad (1)$$

$$(m_2 + m_1) \ddot{x}_2 - m_1 e (\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1) - c_2 (x_3 - x_2) = 0; \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + c_2 (x_3 - x_2) = -M_{СП}; \quad (3)$$

Момент привідного електродвигуна виразимо диференціальною залежністю [6 – 7]

$$M(t) = A_0 + A_1 \dot{M}(t) + A_2 x_3(t), \quad (4)$$

де  $A_0, A_1, A_2$  – постійні електродвигуна. Постійні визначаються виразами:

$$A_0 = \frac{2M_k}{S_k}; \quad A_1 = \frac{1}{\omega_0 S_k}; \quad A_2 = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k}, \quad (5)$$

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

Межі використання рівняння (4) обмежуються значеннями моменту [6, 7]

$$-0,8M_k \leq M \leq 0,8M_k. \quad (6)$$

Після перетворення нелінійні диференціальні рівняння (1 – 3) та заміни і пониження їх порядку, для можливості рішення їх на ЕОМ з використанням програми MathCAD, будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{q}(t) &= w(t); \\ \dot{w}(t) &= \frac{c_1(s(t) - 0,0174e q(t)) + M(t) - M_{CD}}{J_1 - 0,0174e \sin(q(t))}; \end{aligned}$$

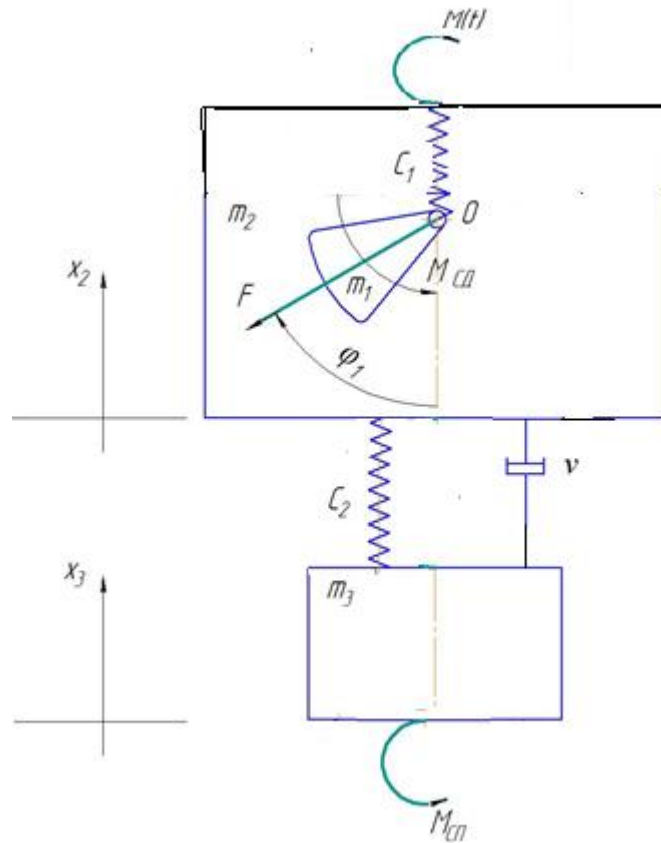


Рис.1. Розрахункова схема навантаження механізму привода віброударного заглиблювача під час пуску привідного механізму

$$\begin{aligned}
 u'(t) &= p(t); \\
 p'(t) &= \frac{m_1 e w^2(t) \cos q(t) + c_2 (s(t) - u(t))}{((m_1 + m_2) - 2831 \sin(q(t)))}; \\
 s'(t) &= k(t); \\
 k'(t) &= -\frac{c_2}{m_3} (s(t) - u(t)) - \frac{M_{сш}}{m_3}; \\
 M'(t) &= \frac{M(t)}{A_1} - \frac{A_2}{A_1 0,0174e} k(t) - \frac{A_0}{A_1}; \\
 o(t) &= \frac{c_1 (s(t) - 0,0174e q(t)) + M(t) - M_{сш}}{J_1 - 0,0174e \sin(q(t))}; \\
 d(t) &= \frac{m_1 e w^2(t) \cos q(t) + c_2 (s(t) - u(t))}{((m_1 + m_2) - 2831 \sin(q(t)))}; \\
 b(t) &= -\frac{c_2}{m_3} (s(t) - u(t)) - \frac{M_{сш}}{m_3}; \\
 F(t) &= m_1 e w^2(t),
 \end{aligned} \tag{7}$$

де  $o(t)$ ,  $d(t)$ ,  $b(t)$  кутові та лінійні прискорення відповідно ротора електродвигуна і мас

$m_2$  та  $m_3$ ;  $F(t)$  – відцентрова сила інерції дебалансів.

Здійснена наступна заміна:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = q(t); \quad \dot{\varphi}_1 = \dot{w}_1(t) = \dot{q}(t); \quad x_2 = u(t); \quad \dot{x}_2 = \dot{p}(t) = \dot{u}(t); \quad x_3 = s(t); \quad \dot{x}_3 = \dot{k}(t) = \\ = \dot{s}(t); \quad o(t) = \dot{w}(t) = \dot{q}(t); \quad d(t) = \dot{p}(t) = \dot{u}(t); \quad b(t) = \dot{k}(t) = \dot{s}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Початкові умови мають вигляд:

$$\begin{aligned} (t = 0); \quad q(0) = 0; \quad w(0) = 0; \quad u(0) = 0; \\ p(0) = 0; \quad s(0) = 0; \quad k(0) = 0; \quad o(0) = 0; \quad d(0) = 0; \\ b(0) = 0; \quad M(0) = 0; \quad F(0) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Розв'язання системи нелінійних рівнянь (7) здійснюємо для приводу віброударного заглиблювача (вібротолота) з електроприводом, що мають параметри, наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Параметри приводу вібротолота

Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення	Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення
$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	1,275	$i$	–	2
$m_2$	кг	11600	$\nu$	Нс / м	25
$m_3$	кг	3500	$c_1$	Нм/рад	$6,05 \cdot 10^5$
$c_2$	Н/м	$2 \cdot 10^5$	$r_1$	м	0,3
$M_{CD}$	Нм	50	$M_{СП}$	Нм	1500

Таблиця 2

Значення постійних електродвигуна приводу вібротолота

Тип електродвигуна	Режим роботи електродвигуна	Кутова швидкість ротора електродвигуна, рад/с	Постійні електродвигуна		
			$A_0$	$A_1$	$A_2$
МТВ 512–8 N = 50 кВт n = 720 об/хв.	Робоча характеристика	75,4	67105	– 0,9471	– 1495

Після рішення системи нелінійних рівнянь (7) з використанням застосунку MathCAD отримуємо величини моменту електродвигуна механізму приводу вібротолота, кутові, лінійні переміщення дебалансів, корпусу віброударного заглиблювача з оголовком палі і палі, ротора електродвигуна і їх швидкості, а також – їх кутові прискорення (рис. 2 – 8).

Побудований, в результаті реалізації названої програми, графік зміни моменту електродвигуна приводу вібротолота  $M(t)$  та відцентрової сили інерції дебалансів  $F(t)$  rad rad/s

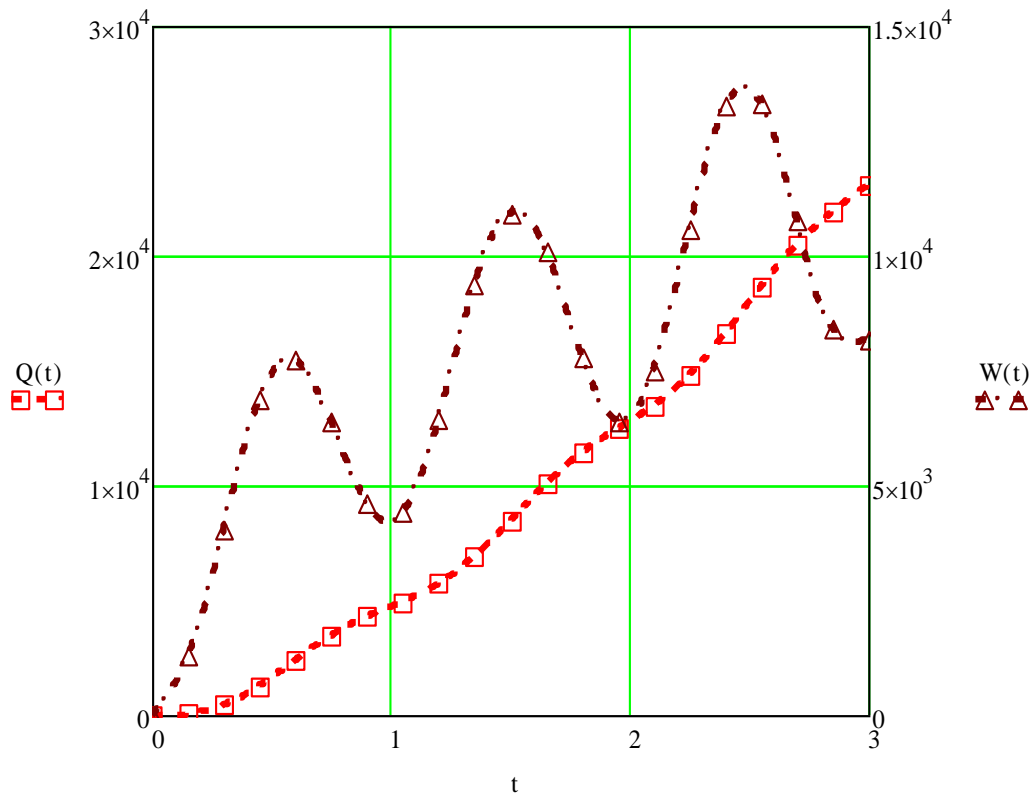


Рис.2. Переміщення маси  $Q(t) = \varphi_1$  та її швидкості  $W(t) = \dot{\varphi}_1 = \dot{Q}(t)$

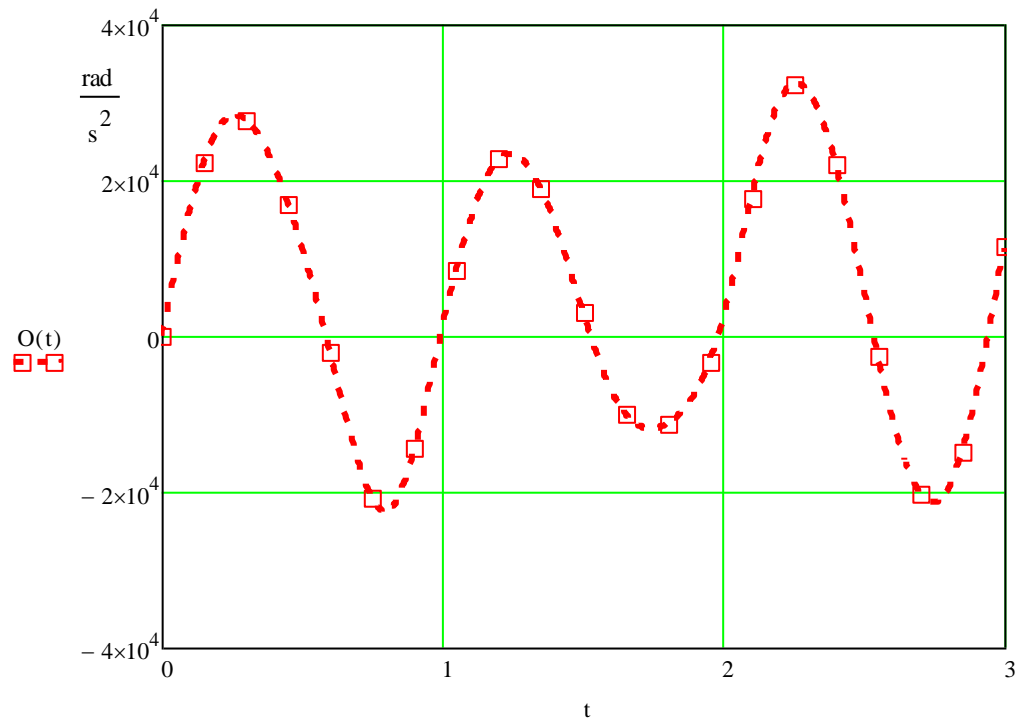


Рис.3. Зміна прискорення  $O(t)$  маси  $Q(t) = \varphi_1$  у функції часу (рис. 8) показує, що зростання сили інерції дебалансів  $F(t)$  триває близько 0,6 с від моменту його включення досягаючи, при цьому, максимального значення  $m$   
 $t, s$



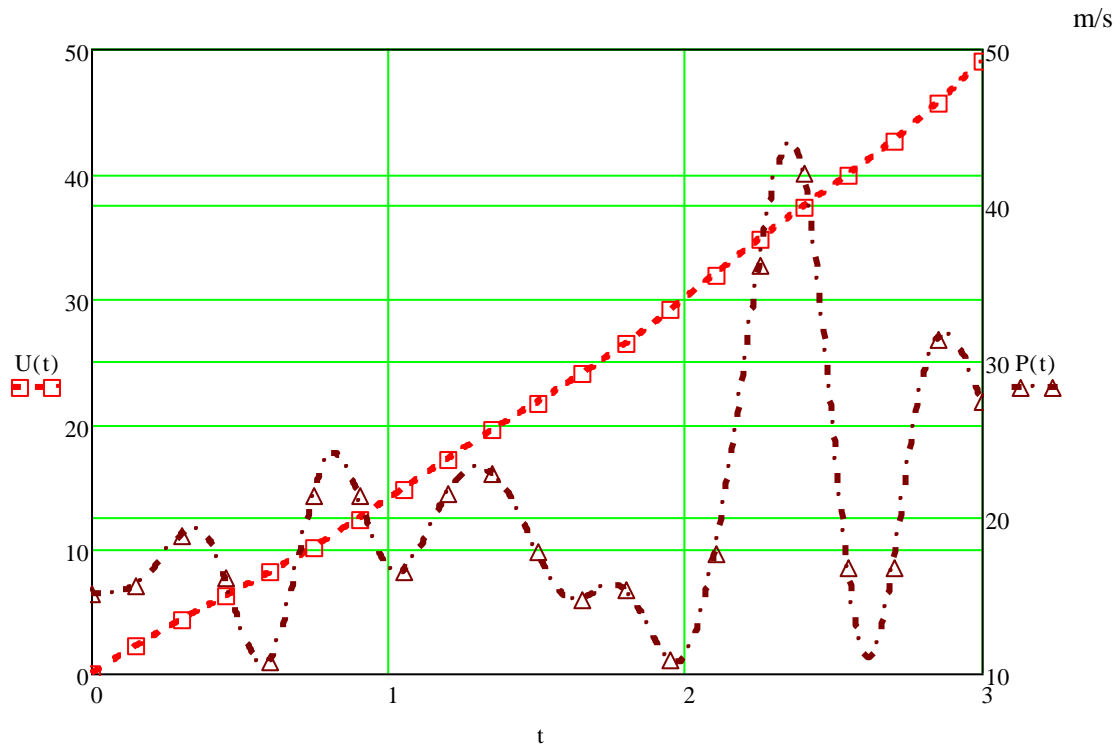


Рис.4. Переміщення маси  $U(t) = m_2$  та її швидкості  $P(t) = \dot{U}(t)$

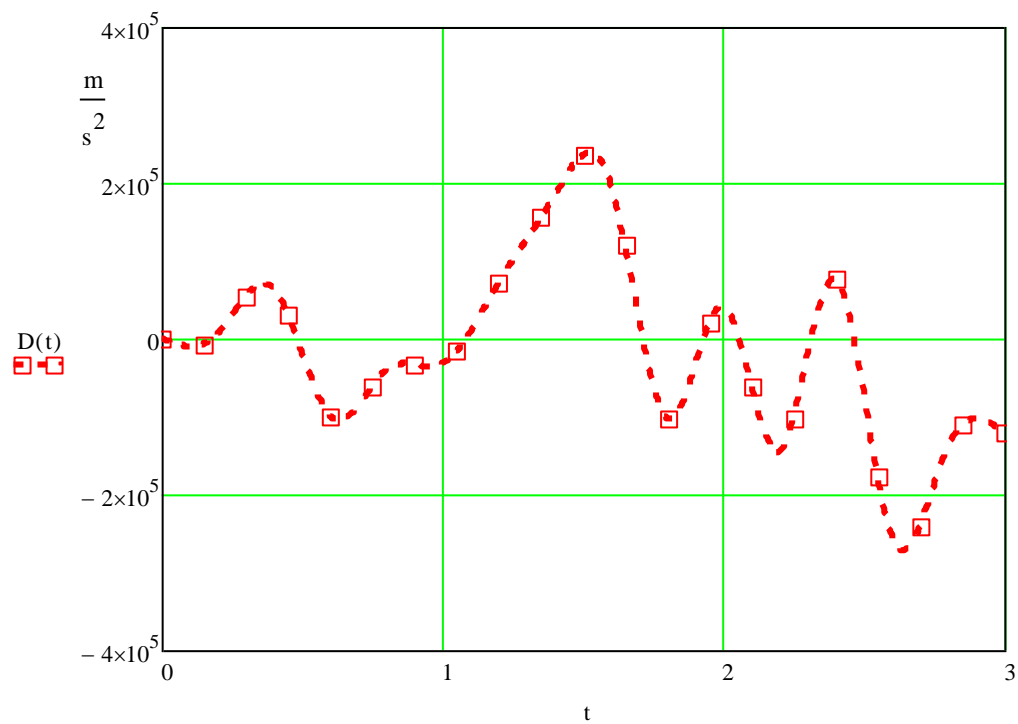


Рис.5. Зміна прискорення  $D(t)$  маси  $U(t) = m_2$

t, s

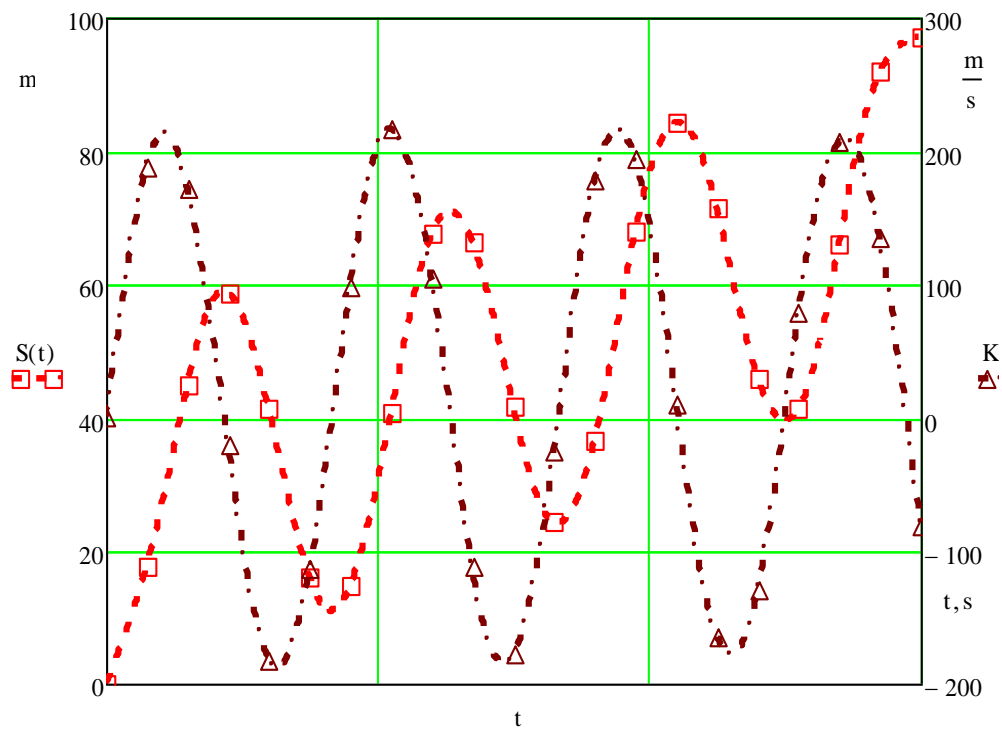


Рис.6. Переміщення маси  $S(t) = m_3$  та її швидкості  $K(t) = \dot{m}_3 = \dot{S}(t)$

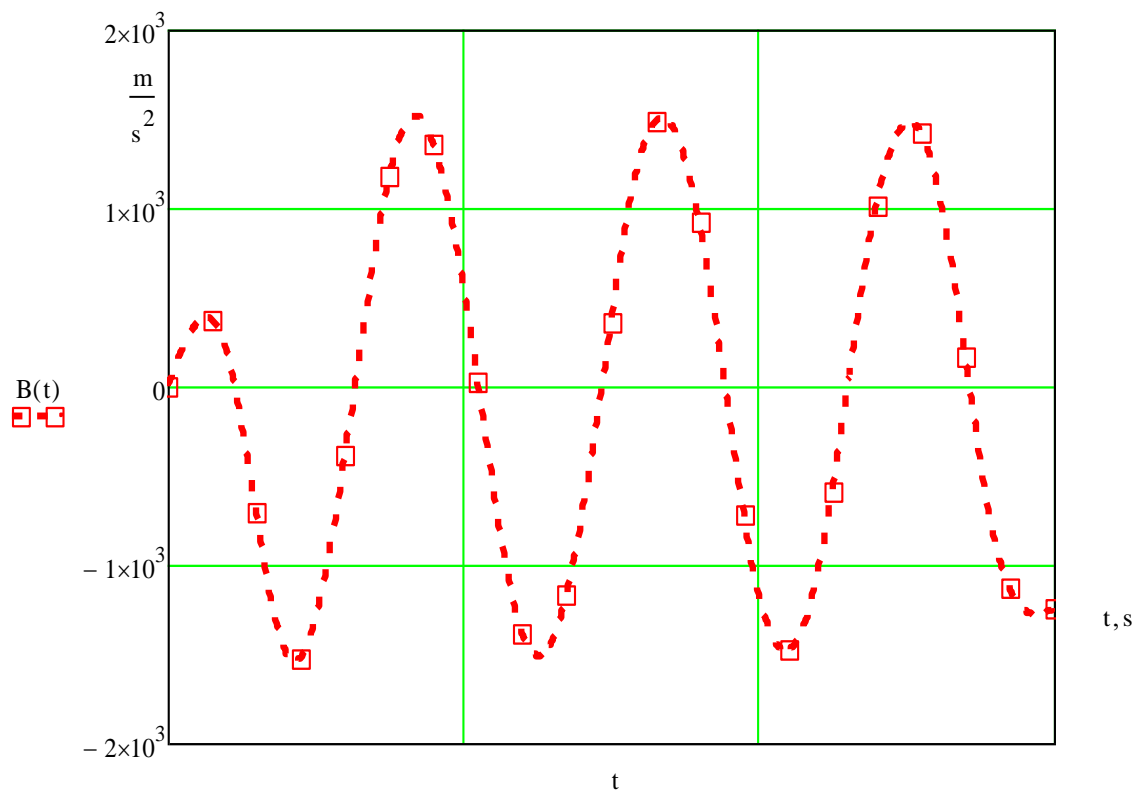


Рис.7. Зміна прискорення  $B(t)$  маси  $S(t) = m_3$

Н

Нм

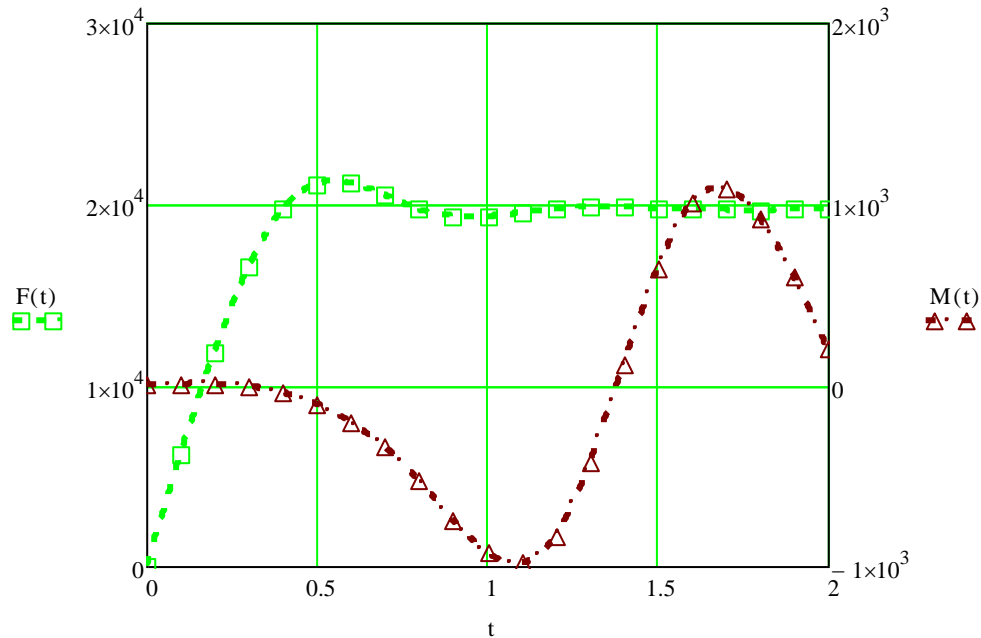


Рис.8. Відцентрова сила інерції дебалансів  $F(t)$  та момент електродвигуна привода вібролота  $M(t)$

Розглянувши побудований графік (рис. 8) можна також константувати, що відцентрова сила інерції дебалансів  $F(t)$  через 1 с набуває сталого значення.

На рисунку 4 показана зміна переміщення маси  $U(t) = m_2$  корпусу вібролота з вібратором, електродвигуна і ударної частини, що моделює процес занурення палі в ґрунт.

Маса  $m_3$  (рис. 6) включає масу наковальні, оголовка палі і самої палі. Зміною маси привантажувальної плити, а також жорсткістю пружин  $c_2$  є можливість суттєво змінювати робочі параметри вібролота і тим самим моделювати процес заглиблення палі, що дозволяє це робити побудована нами математична модель.

Побудовані нами графіки (рис. 2 – 8) свідчать також і про те, що в процесі занурення палі вібролотом відбуваються нелінійні коливальні процеси. Із отриманих нелінійних рівнянь ( 7 ) можна отримати наступну інформацію:

- обертання дебалансів здійснюється нерівномірне;
- коливання корпусу вібролота з оголовком палі і палі відбуваються несинусоїдальні;
- коливання кутової швидкості обертання дебалансів і коливання корпусу вібролота з оголовком палі і палі взаємно впливають один на одного;
- постановка задачі про коливання корпусу вібролота з оголовком палі і палі є нелінійною.

Для перехідних процесів, показаних на рис. 2 – 8 , характерне коливання кутового і лінійних переміщень, швидкостей, а також їх прискорень. Тому розрахунок робочих режимів віброударного заглиблювача необхідно виконувати на основі рівнянь електромеханічного стану системи.

Застосування числових методів інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь руху і електромагнітного стану розширює можливість використання розробленої методики для визначення динамічних навантажень у електромашинній та механічній системах вібролотів.

## Висновки

При використанні створеної математичної моделі є можливість проводити аналіз перехідних процесів при роботі вібромолота з урахуванням нерозривної взаємодії електричної машини і механічної частини приводу.

У роботі теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, динаміку механізму привода вібромолота.

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

## Список використаних джерел

1. Потураев В. Н. Вибрационная техника и технологии энергоемких производств / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый: Монография. – Днепропетровск, 2002. – 190 с.
2. Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів / І.І. Назаренко: Підручник. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.
3. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання / В.О. Повідайло: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 261 с.
4. Коллац Л. Задачи на собственные значения: Монография. – М.: Наука, 1968. – 504 с.
5. Тондл А. Автоколебания механических систем: Монография. – М.: Мир, 1979. – 432 с.
6. Чабан В. Й. Математичне моделювання в електротехніці / В.Й. Чабан. – Львів.: Вид-во Тараса Сороки, 2010. – 508 с.
7. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
8. Jagadish, H. P. Robust Sensorless Speed Control of Induction Motor with DTFC and Fuzzy Speed Regulator / H. P. Jagadish, S. F. Kodad // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2011. – № 5. – P. 17–27.
9. Kaplan, D. Understanding Nonlinear Dynamics / D. Kaplan, L. Glass. – New York: Springer-Verlag, 1995. – 420 p.

## References

1. Poturaev V. N. Vibratsionnaia tekhnika i tekhnologii energoemkikh proizvodstv / V.N. Poturaev, V.P. Franchuk, V.P. Nadutyi: Monografiia. – Dnepropetrovsk, 2002. – 190 s.
2. Nazarenko I.I. Mashini dlia virobnitctva budivelnykh materialiv / I.I. Nazarenko: Pidruchnik. – K.: KNUBA, 1999. – 488 s.
3. Povidailo V.O. Vibratsiini protcesi ta obladdannia / V.O. Povidailo: Navch. posibnik. – Lviv: Vid-vo Natc. un-tu «Lvivska politekhnika», 2004. – 261 s.
4. Kollatc L. Zadachi na sobstvennyie znacheniiia: Monografiia. – M.: Nauka, 1968. – 504 s.
5. Tondl A. Avtokolebaniia mekhanicheskikh sistem: Monografiia. – M.: Mir, 1979. – 432 s.
6. Chaban V. I. Matematichne modeliuvannia v elektrotekhnitci / V.I. Chaban. – Lviv.: Vid-vo Tarasa Soroki, 2010. – 508 s.
7. Kliuchev V.I. Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda / V.I. Kliuchev. – M.: Energiia, 1976. – 320 s.
8. Jagadish, H. P. Robust Sensorless Speed Control of Induction Motor with DTFC and Fuzzy Speed Regulator / H. P. Jagadish, S. F. Kodad // International Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2011. – № 5. – P. 17–27.
9. Kaplan, D. Understanding Nonlinear Dynamics / D. Kaplan, L. Glass. – New York: Springer-Verlag, 1995. – 420 p.