



Свірень М. О.

Кіровоградський
національний
технічний
університет

УДК 631.356.2

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЗАХВАТУ КОРЕНЕПЛОДУ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ ВИКОПУВАННІ

Аналитически определены основные условия захвата и извлечения корнеплода из почвы, осуществляемого под действием вертикальной возмущающей силы и тягового усилия, которые передаются ему от вибрационного выкапывающего рабочего органа. Получена системы дифференциальных уравнений, решение которых дало возможность определить закон движения корнеплода в процессе его непосредственного вибрационного извлечения.

Ключевые слова: корнеплод, вибрационный выкапывающий рабочий орган, почва, упругая среда, дифференциальные уравнения движения, колебания, амплитуда, частота.

The new mathematical model which describes process of a beet root crop direct extraction from soil, realized under act of a vertical disturbing force and a tractive force which are transmitted a root crop from a vibrational digging out end-effector is developed. The system of the differential equations which solution has enabled to determine the law of a root crop movement during its direct vibrational extraction is received.

Keywords: root crop, vibrational digging out end-effector, soil, elastic medium, differential equations of movement, oscillation, amplitude, frequency.

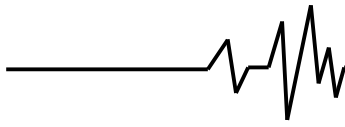
Вступ. Вібраційне викопування коренеплодів з ґрунту має ряд суттєвих переваг в порівнянні з іншими способами. Воно характеризується меншим пошкодженням коренеплодів, зниженням втрат врожаю при збиранні, більш інтенсивним очищенням коренеплодів від налиплого ґрунту, меншим захаращенням робочого русла копача ґрунтом та залишками бур'янів. Тому саме цей технологічний процес потребує докладного аналітичного дослідження та подальшої розробки і широкого впровадження вдосконалених вібраційних викопуючих органів.

Постановка проблеми. Теоретичні дослідження технологічного процесу вібраційного викопування коренеплодів цукрового буряку з ґрунту дають можливість науково обґрунтувати конструктивні і кінематичні параметри вібраційних викопуючих робочих органів. Такі дослідження необхідні у першу чергу для теоретичного аналізу роботи вібраційних викопуючих органів у несприятливих умовах, на важких і твердих ґрунтах, де надійність роботи бурякозбиральних машин суттєво знижується.

В свою чергу глибокий теоретичний аналіз будь-якого технологічного процесу можливий лише за наявності адекватних математичних моделей, що описують даний процес.

Аналіз досліджень і публікацій. Як було встановлено ґрунтовні теоретичні і експериментальні дослідження вібраційного викопування коренеплодів були достатньо широко висвітлені у працях [1–6].

Так, у праці [6] процес вилучення коренеплоду з ґрунту розглядається у найбільш загальному випадку – при несиметричному захваті коренеплоду вібраційним викопуючим робочим органом. Даний процес описується за допомогою кінематичних і динамічних рівнянь Ейлера. Отримана у праці [6] система диференціальних рівнянь описує просторовий коливальний процес закріпленого у ґрунті коренеплоду, як у пружному середовищі, з однією точкою закріплення. У даній роботі процес вібраційного вилучення коренеплоду з ґрунту розглядається при симетричному захваті коренеплоду обома лемешами вібраційного викопуючого органу.



Саме при такому захваті коренеплоду викопуючими лемешами і можливий процес подальшого повного вилучення коренеплоду з ґрунту. Тому дослідимо процес безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту при симетричному захваті його вібраційним викопуючим робочим органом.

Мета дослідження. Розробити основні положення теорії вилучення коренеплоду з ґрунту, яке здійснюється під дією вертикальної збуруючої сили, що надається коренеплоду від вібраційного викопуючого робочого органу, та тягового зусилля внаслідок поступального руху копача.

Результати дослідження. Зробимо спочатку необхідну формалізацію технологічного процесу, який буде розглядатись. Незважаючи на те, що процес вилучення з ґрунту коренеплоду відбудеться за дуже короткий проміжок часу (оскільки поступальна швидкість коренезбиральних машин може досягати 2 м/с) весь технологічний процес можна умовно поділити на окремі взаємопов'язані, послідовні операції. Оскільки, як зазначалось вище, вилучення можливе лише при симетричному захваті коренеплоду робочим органом, то одночасно з поступальними коливаннями коренеплоду відбувається кутові коливання коренеплоду навколо умовної точки закріплення на деякий кут.

На першому етапі вилучення, а особливо при перших коливаннях, відновлююча сила при кутових коливаннях, а отже, і її момент відносно умовної точки закріплення, будуть максимальними. Тому кут нахилу коренеплоду буде досить незначний і можливе повне (або часткове) відновлення його вертикального положення внаслідок поступального руху копача. Проте, завдяки дії поступальних коливань коренеплоду разом з оточуючим його ґрунтом, ущільненість зазначеного ґрунту буде зменшуватись, а тому відновлююча сила при кутових коливаннях також буде зменшуватись. Отже, з кожним наступним коливанням кут нахилу коренеплоду буде збільшуватись, а відновлення попереднього положення – зменшуватись. Коренеплід буде розхитуватись навколо умовної точки закріплення з поступовим збільшення кута нахилу коренеплоду уперед по ходу копача. Це буде призводити до розриву зв'язків коренеплоду з ґрунтом у напрямку руху копача, починаючи з верхньої частини конічної поверхні знаходження коренеплоду у нерозпушеному ґрунті, поступово наближаючись до умовної точки його закріплення. Отже, з вище сказаного випливає, що руйнування зв'язків коренеплоду

з ґрунтом одночасно відбувається у двох напрямках – вздовж поступального руху копача і у напрямку перпендикулярно до вказаного (по глибині розташування коренеплоду у ґрунті). При цьому сили зв'язку коренеплоду з ґрунтом і сили пружності ґрунту будуть поступово зменшуватись до такої мінімальної величини, коли коливальні процеси перейдуть у процеси неперервного переміщення коренеплоду вгору і уперед – вздовж поступального руху копача, а також неперервного повороту коренеплоду навколо його центра мас на деякий кут до повного вилучення коренеплоду з ґрунту. Сили ж пружності ґрунту просто перейдуть у сили опору розпушеного ґрунту при русі коренеплоду у робочому руслі копача. Після цього настає етап безпосереднього вилучення коренеплоду цукрового буряку з ґрунту.

Для розробки основних положень теорії вібраційного викопування коренеплоду з ґрунту насамперед складемо силову схему взаємодії коренеплоду з робочими поверхнями вібраційного викопуючого робочого органу (рис.). Для цього представимо вібраційний викопуючий робочий орган у вигляді двох спарених викопуючих поверхонь (клинів) $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$, кожний з яких у просторі має нахил під кутами α , β , γ і які встановлено таким чином один до одного, що утворюється робоче русло, задня частина якого звужується. Вказані клини здійснюють коливальні рухи в повздовжньо-вертикальній площині (механізм приводу лемешів у коливальний рух не показано), з відповідними амплітудою і частотою. Напрямок поступального руху вібраційного викопуючого робочого органу показано стрілкою. Проекції точок B_1 і B_2 на вісь O_1y_1 позначені точками D_1 і D_2 відповідно.

Вважаємо, що з поверхнями клинів $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$ у відповідних точках взаємодіє коренеплід, який апроксимується тілом конусоподібної форми, причому захват коренеплоду робочим органом відбувається симетрично з обох його боків.

Припускаємо далі, що робоча поверхня клина $A_1B_1C_1$ здійснює безпосередній контакт з коренеплодом у точці K_1 , а поверхня $A_2B_2C_2$ – у точці K_2 . Прямі, проведені через точки контакту коренеплоду K_1 і K_2 і точки B_1 і B_2 утворюють на перетині зі сторонами



клинів A_1C_1 і A_2C_2 відповідні точки M_1 і M_2 . Таким чином, δ – це двохгранний кут ($\angle B_1M_1D_1$) між нижньою основою $A_1D_1C_1$ та робочою поверхнею клина $A_1B_1C_1$ або відповідно двогранний кут ($\angle B_2M_2D_2$) між нижньою основою $A_2D_2C_2$ та робочою поверхнею клина $A_2B_2C_2$.

Покажемо сили, які виникають внаслідок взаємодії коренеплоду з вібраційним робочим органом.

Нехай від вібраційного викопуючого робочого органу діє вертикальна збурююча сила $\bar{Q}_{зб.}$, яка змінюється за гармонійним законом такого вигляду:

$$\bar{Q}_{зб.} = H \sin \omega t, \quad (1)$$

де H – амплітуда збурюючої сили; ω – частота збурюючої сили.

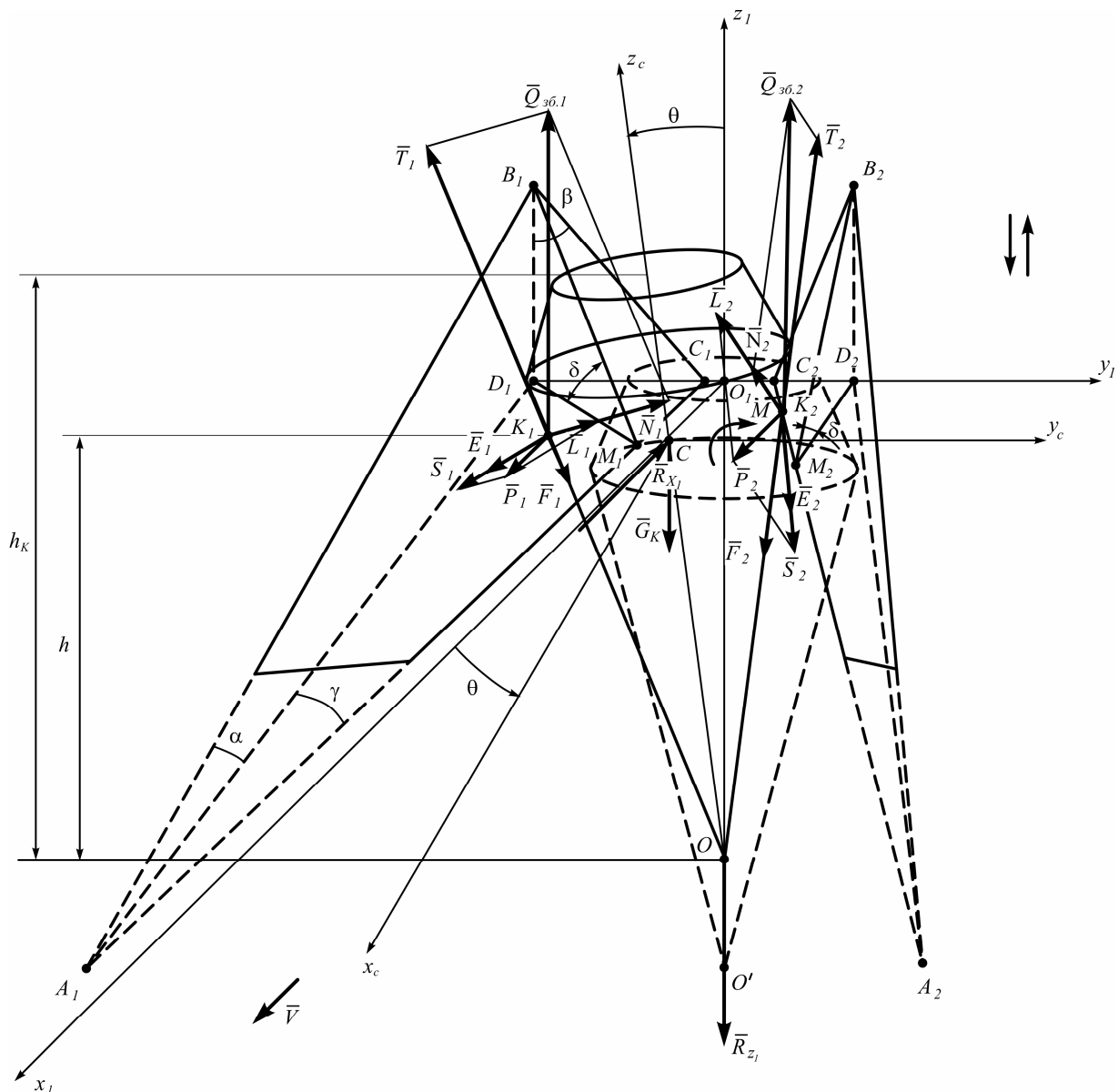
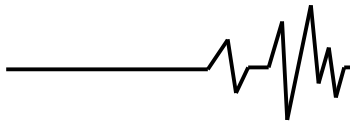


Рис. Силова схема вібраційного викопування коренеплоду з ґрунту

Дана сила відіграє основну роль у процесі розпушування ґрунту в зоні робочого русла копача та вилучення коренеплоду. Зазначена збурююча сила $\bar{Q}_{зб.}$ прикладається

до коренеплоду з двох його боків, а тому на схемі вона представлена двома складовими $\bar{Q}_{зб.1}$ та $\bar{Q}_{зб.2}$. Дані сили прикладені



відповідно у точках K_1 і K_2 на відстані h від умовної точки закріплення O і саме вони викликають коливання коренеплоду в повздовжньо-вертикальній площині, які руйнують зв'язки коренеплоду з ґрунтом і створюють для останнього умови вилучення з ґрунту.

Оскільки захват коренеплоду симетричний, то очевидно, що буде мати місце наступне співвідношення:

$$Q_{зб.1} = Q_{зб.2} = \frac{1}{2} H \sin \omega t.$$

Розкладемо дані сили на нормальні \bar{N}_1 і \bar{N}_2 і дотичні складові \bar{T}_1 і \bar{T}_2 , як це показано на рис. Оскільки вібраційний копач рухається поступально у напрямку осі O_1x_1 відносно коренеплоду, який закріплений у ґрунті, то в момент захвату коренеплоду робочим органом у напрямку осі O_1x_1 діють також рушійні сили \bar{P}_1 і \bar{P}_2 . Також розкладемо сили \bar{P}_1 і \bar{P}_2 на дві складові: нормальні \bar{L}_1 і \bar{L}_2 і дотичні \bar{S}_1 і \bar{S}_2 до поверхонь $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$ відповідно.

Крім того, у точках контакту K_1 і K_2 діють сили тертя \bar{F}_{K1} і \bar{F}_{K2} відповідно, які протидіють проковзуванню коренеплоду по робочій поверхні клинів $A_1B_1C_1$ і $A_2B_2C_2$ під час його захвату вібраційним робочим органом. Вектори цих сил напрямлені протилежно вектору відносної швидкості проковзування коренеплоду по поверхні клинів.

Проковзування коренеплоду по поверхні клинів може відбуватися у напрямку дії сил \bar{T}_1 , \bar{T}_2 (паралельно лініям B_1M_1 та B_2M_2) та у напрямку, протилежному дії сил \bar{S}_1 , \bar{S}_2 , за рахунок сил опору ґрунту.

Тому вектор відносної швидкості проковзування коренеплоду по поверхні клинів можна розкласти на складові у зазначених вище напрямках. Отже, силу тертя \bar{F}_{K1} також можна розкласти на дві складові: \bar{F}_1 – у напрямку, протилежному вектору \bar{T}_1 , та \bar{E}_1 – у напрямку вектора \bar{S}_1 .

Аналогічно, силу тертя \bar{F}_{K2} також можна розкласти на дві складові: \bar{F}_2 – у напрямку, протилежному вектору \bar{T}_2 , та \bar{E}_2 – у напрямку вектора \bar{S}_2 .

Очевидно, що $F_1 = F_2$, $E_1 = E_2$.

У центрі ваги коренеплоду (точка C) діє сила ваги коренеплоду \bar{G}_k . Сили опору розпушеного ґрунту при русі коренеплоду у робочому руслі копача у напрямку осей O_1x_1 та O_1z_1 позначені через \bar{R}_{x1} та \bar{R}_{z1} відповідно.

При безпосередньому вилученні коренеплоду з ґрунту буде здійснюватись поворот коренеплоду навколо його центра мас C під дією пари сил опору розпушеного ґрунту. Позначимо момент цієї пари сил через M .

Сили опору розпушеного ґрунту при безпосередньому вилученні коренеплоду можна вважати залежними від швидкості руху коренеплоду у розпушеному ґрунті, або, у першому наближенні, – просто постійними величинами. Тому для спрощення математичної моделі будемо сили \bar{R}_{x1} , R_{z1} та момент пари M вважати постійними величинами.

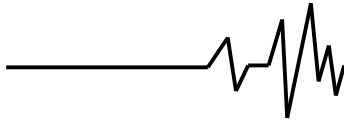
Складемо спочатку диференціальні рівняння руху центра мас коренеплоду (точка C), тобто поступального руху коренеплоду вздовж осей O_1x_1 і O_1z_1 . Враховуючи вище приведену схему сил, диференціальне рівняння руху центра мас коренеплоду у векторній формі при його безпосередньому вилученні буде мати наступний вигляд:

$$m_k \bar{a} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{L}_1 + \bar{L}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \bar{G}_k + \bar{R}_{z1} + \bar{R}_{x1}, \quad (3)$$

де \bar{a} – прискорення руху центра мас коренеплоду.

Оскільки процес вилучення, як було зазначено вище, відбувається при симетричному захваті коренеплоду робочим органом, то рух коренеплоду вздовж робочого русла копача відбувається фактично у повздовжньо-вертикальній площині (площині $x_1O_1z_1$), а тому векторне рівняння (3) зводиться до системи двох рівнянь у проекціях на осі Ox_1 і Oz_1 .

Після визначення значень усіх сил, що входять у векторне рівняння (3), та їх проекцій на осі Ox_1 і Oz_1 отримаємо дві наступні системи диференціальних рівнянь:



$$\left. \begin{aligned}
 \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_k} & \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \cos^2 \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \gamma + \right. \\
 & \left. + f \cos \delta \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \gamma \right] H \sin \omega t + \frac{2}{m_k} \times \\
 & \times \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \sin^2 \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \delta + \right. \\
 & \left. + f \sin \gamma \cos \gamma \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \right] P_1 - \frac{R_{x1}}{m_k}, \\
 \ddot{z}_1 = \frac{1}{m_k} & \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \cos \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] H \sin \omega t + \\
 \frac{2}{m_k} & \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \sin \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] P_1 - \frac{R_{z1}}{m_k} - g,
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$\omega t \in [2k\pi, 2(k+1)\pi], k = 0, 1, 2, \dots$

i

$$\left. \begin{aligned}
 m_k \ddot{x}_1 & = \frac{2P_1 \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + 2f P_1 \sin^3 \gamma \cos \delta + f P_1 \sin 2\gamma \cos \gamma - R_{x1}, \\
 m_k \ddot{z}_1 & = \frac{2P_1 \sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - 2f P_1 \sin^2 \gamma \sin \delta - G_k - R_{z1},
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], k = 1, 2, \dots$

При цьому система диференціальних рівнянь (4) описує процес безпосередньо вібраційного вилучення коренеплоду цукрового буряку з ґрунту (тобто відрізок, на якому на коренеплід діє періодична збуруюча сила), а система диференціальних рівнянь (5) описує процес вилучення коренеплоду з ґрунту, коли на нього не діє збуруюча сила. Тобто один і той же вібраційний викопуючий робочий орган у різні проміжки часу може здійснювати процес викопування коренеплоду як звичайний лемішний копач.

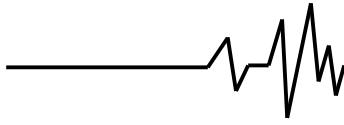
Розв'яжемо отримані системи диференціальних рівнянь.

Для даних систем диференціальних рівнянь (4), (5) початкові умови будуть мати наступний вигляд:

при $t = 0$:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 & = 0, & \dot{z}_1 & = 0, \\
 x_1 & = x_{10}, & z_1 & = -\frac{1}{3} h_k.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Система диференціальних рівнянь (4) є системою лінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Як відомо, вона розв'язується в квадратурах. Для спрощення запису системи диференціальних рівнянь (4) введемо наступні позначення.



$$\frac{1}{m_k} \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \cos^2 \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \gamma + f \cos \delta \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \gamma \right] = \phi_1, \quad (7)$$

$$\frac{2}{m_k} \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + f \sin^2 \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \cos \delta + f \sin \gamma \cos \gamma \cos \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \right] = \psi_1, \quad (8)$$

$$\frac{1}{m_k} \left[\frac{\cos \delta \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \cos \delta \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] = \phi_2, \quad (9)$$

$$\frac{2}{m_k} \left[\frac{\sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - f \sin \gamma \sin \left(\gamma + \frac{\alpha_{K1 \max}}{2} \right) \sin \delta \right] = \psi_2. \quad (10)$$

Враховуючи вирази (7)–(10), система диференціальних рівнянь (4) набуде наступного вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \phi_1 H \sin \omega t + \psi_1 P_1 - \frac{R_{x1}}{m_k}, \\ \ddot{z}_1 &= \phi_2 H \sin \omega t + \psi_2 P_1 - \frac{R_{z1}}{m_k} - g. \end{aligned} \right\} (11)$$

Проінтегруємо систему диференціальних рівнянь (11). Після двохкратного інтегрування і

знаходження довільних сталих отримуємо наступні розв'язки системи диференціальних рівнянь (4) у остаточному вигляді:

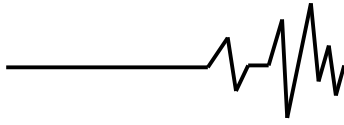
$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{\phi_1 H}{\omega} \cos \omega t + \psi_1 P_1 t - \frac{R_{x1} t}{m_k} + \frac{\phi_1 H}{\omega}, \\ \dot{z}_1 &= -\frac{\phi_2 H}{\omega} \cos \omega t + \psi_2 P_1 t - \frac{R_{z1} t}{m_k} - g t + \frac{\phi_2 H}{\omega}. \end{aligned} \right\} (12)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -\frac{\phi_1 H}{\omega^2} \sin \omega t + \frac{\psi_1 P_1 t^2}{2} - \frac{R_{x1} t^2}{2m_k} + \frac{\phi_1 H t}{\omega} + x_{10}, \\ z_1 &= -\frac{\phi_2 H}{\omega^2} \sin \omega t + \frac{\psi_2 P_1 t^2}{2} - \frac{R_{z1} t^2}{2m_k} - \frac{g t^2}{2} + \frac{\phi_2 H t}{\omega} - \frac{1}{3} h_k. \end{aligned} \right\} (13)$$

Системи рівнянь (12) і (13) відповідно описують закони зміни швидкості і переміщення центра мас коренеплоду у процесі його безпосереднього вилучення з ґрунту. З другого рівняння системи (13) можна визначити час t безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту. Для цього необхідно у ліву частину зазначеного рівняння підставити значення $z_1 = 0$ і розв'язати отримане рівняння відносно t . Оскільки рівняння є трансцендентним, то отримати аналітичний вираз для визначення t

неможливо, проте його можна розв'язати на ПЕОМ за допомогою відомих чисельних методів. Обчислене значення t_1 можна застосувати для визначення продуктивності агрегату для викопування коренеплодів вібраційними викопуючими робочими органами.

Розв'яжемо далі систему диференціальних рівнянь (5). Для спрощення запису даної системи також введемо наступні позначення:



$$\frac{1}{m_k} \left(\frac{2 \sin \gamma \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} + 2f \sin^3 \gamma \cos \delta + f \sin 2\gamma \cos \gamma \right) = \psi'_1, \quad (14)$$

$$\frac{1}{m_k} \left(\frac{2 \sin \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + 1 + \operatorname{tg}^2 \beta}} - 2f \sin^2 \gamma \sin \delta \right) = \psi'_2. \quad (15)$$

З урахуванням виразів (14), (15) система диференціальних рівнянь (5) набуде вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \psi'_1 P_1 - \frac{R_{x_1}}{m_k}, \\ \ddot{z}_1 &= \psi'_2 P_1 - \frac{G_k}{m_k} - \frac{R_{z_1}}{m_k}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots$$

Після двохкратного інтегрування системи рівнянь (17) і знаходження довільних сталих отримаємо розв'язки системи диференціальних рівнянь (5) у остаточному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \psi'_1 P_1 t - \frac{R_{x_1}}{m_k} t, \\ \dot{z}_1 &= \psi'_2 P_1 t - \frac{G_k}{m_k} t - \frac{R_{z_1}}{m_k} t, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \psi'_1 P_1 \frac{t^2}{2} - \frac{R_{x_1} t^2}{2m_k} + x_{10}, \\ z_1 &= \psi'_2 P_1 \frac{t^2}{2} - \frac{G_k t^2}{2m_k} - \frac{R_{z_1} t^2}{2m_k} - \frac{1}{3} h_k, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots$$

$$\begin{aligned} &\left(\frac{3}{80} + \frac{3}{20} \operatorname{tg}^2 \varepsilon \right) m_k h_k^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -H(-h_k + h - z_1) \sin \theta \sin \omega t + 2P_1 \cos \theta (-h_k + h - z_1) + \\ &+ 2 \left(\frac{1}{2} f H \cos \delta \sin \omega t + f P_1 \sin \gamma \right) \sin(\gamma + \alpha_{K1 \max} \sin \omega t) \cos \varepsilon (-h_k + h - z_1) \sin \theta + \\ &+ 2 \left(\frac{1}{2} f H \cos \delta \sin \omega t + f P_1 \sin \gamma \right) \cos(\gamma + \alpha_{K1 \max} \sin \omega t) \cos \gamma (-h_k + h - z_1) \cos \theta - \end{aligned} \quad (22)$$

-M,

$$\omega t \in [2k\pi, (2k+1)\pi], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Системи рівнянь (18) та (19) відповідно описують закони зміни швидкості і переміщення центра мас коренеплоду у процесі його безпосереднього вилучення з ґрунту при відсутності дії збурюючої сили.

Складемо далі диференціальне рівняння повороту коренеплоду навколо його центра мас, або навколо умовної осі S_{yc} , яка проходить через центр мас (точку С) паралельно осі $O_1 y_1$. Згідно [8], зазначене рівняння у загальному вигляді буде мати такий вигляд:

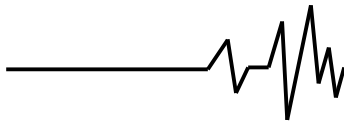
$$I_{yc} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M_{yc}^e, \quad (20)$$

де θ – кут повороту коренеплоду навколо осі S_{yc} ; I_{yc} – момент інерції коренеплоду відносно осі S_{yc} ; M_{yc}^e – обертальний момент навколо осі S_{yc} (сума моментів усіх зовнішніх сил, що діють на коренеплід, відносно осі S_{yc}).

Момент інерції I_{yc} коренеплоду відносно осі S_{yc} визначається згідно [8] з такого виразу:

$$I_{yc} = \left(\frac{3}{80} + \frac{3}{20} \operatorname{tg}^2 \varepsilon \right) m_k h_k^2. \quad (21)$$

Підставляючи вирази (2), (21) у диференціальне рівняння (20) і виконуючи необхідні перетворення отримаємо диференціальне рівняння повороту коренеплоду навколо осі S_{yc} при безпосередньому вібраційному вилученні з ґрунту (тобто при дії на нього збурюючої сили), яке має наступний вигляд:



Диференціальне рівняння повороту коренеплоду навколо осі Sy_c при звичайному вилученні (тобто при відсутності збуруючої сили), має наступний вигляд:

$$\left(\frac{3}{80} + \frac{3}{20}tg^2\varepsilon\right)m_k h_k^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} = 2P_1 \cos\theta(-h_k + h - z_1) + 2fP_1 \sin^2\gamma \times \\ \times \cos\varepsilon(-h_k + h - z_1)\sin\theta + fP_1 \sin 2\gamma \cos\gamma(-h_k + h - z_1)\cos\theta - M, \quad (23)$$

$$\omega t \in [(2k-1)\pi, 2k\pi], \quad k = 1, 2, \dots$$

Проаналізуємо отримані диференціальні рівняння (22) і (23). Диференціальне рівняння (22) є нелінійним. Розв'язати його можна наближеними чисельними методами з застосуванням ПЕОМ, причому для кожного кроку застосування чисельного алгоритму значення z_1 необхідно знаходити з другого рівняння системи (13) для відповідного моменту часу t_k . Диференціальне рівняння (23) через входження в нього величини z_1 , яка є змінною, також є нелінійним, і для кожного моменту часу t_k згадану величину z_1 необхідно визначати з другого рівняння системи (19).

Таким чином, остаточно можна вважати, що розроблені основні положення процесу безпосереднього вилучення коренеплоду з ґрунту при вібраційному його викопуванні. Отримані результати дають можливість визначати кінематичні режими вібраційного викопування коренеплодів з умов їхнього непошкодження та конструктивні параметри вібраційних викопуючих органів.

Висновки

1. Складені дві системи диференціальних рівнянь, що описують плоскопаралельний рух коренеплоду у ґрунті при його безпосередньому захваті і вилученні, який здійснюється під дією вертикальної збуруючої сили, що надається коренеплоду від вібраційного викопуючого органу, та тягового зусилля, що виникає внаслідок поступального руху копача.

2. Розв'язок даних диференціальних рівнянь надає можливість знаходити закон руху коренеплоду у повздовжньо-вертикальній площині при безпосередньому вилученні з ґрунту.

3. Отримані результати дають також можливість визначати кінематичні режими вібраційного викопування коренеплодів з умов їхнього непошкодження та знаходити раціональні конструктивні параметри вібраційних викопуючих робочих органів.

Література

1. Василенко П.М., Погорелый Л.В., Брей В.В. Вибрационный способ уборки корнеплодов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1970, №2. – С.9 – 13.

2. Свеклоуборочные машины (конструирование и расчет) // Л.В. Погорелый, Н.В. Татьяна, В.В. Брей и др.; под общ. ред. Л.В. Погорелого. – К.: Техніка, 1983. – 168 с.

3. Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. Теорія вібраційного викопування коренеплодів. – Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва", 2003, Том XIV. – С. 34 – 86.

4. Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. Теорія поперечних коливань коренеплоду при вібраційному викопуванні. – Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 18. Мелітополь, 2004. – С. 8 – 24.

5. Булгаков В.М., Головач І.В. Про вимушені поперечні коливання тіла коренеплоду при вібраційному викопуванні. – Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Збірник наукових праць. Випуск 39. Харків: ХНТУСГ, 2005. – С. 23 – 39.

6. В. Булгаков, І. Головач. Розробка математичної моделі вилучення коренеплоду з ґрунту // Техніка АПК, 2006, №6-7. – С. 36 – 38; №8. – С. 25-28; №9-10. – С. 47 – 49.

7. Булгаков В.М., Головач І.В. Уточнена теорія викопуючого робочого органу лемішного типу // Вісник аграрної науки Причорномор'я. Спеціальний випуск 4(18). Том I. – Миколаїв: МДАУ, 2002. – С. 37–63.

8. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Том II. Динамика. – М.: Наука, 1985. – 496 с.