

ДО ПИТАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОПІРІВ АВТОМАТА ВОДІННЯ З КОРЕНЕПЛОДАМИ

Розглянуто взаємодію копирів автомата водіння коренезбиральної машини з коренеплодами, виведені диференційні рівняння руху копіра і на їх основі встановлені аналітичні залежності зусилля контакту копіра з коренеплодом, раціональні параметри автомата водіння при достатній точності відслідковування траєкторії посадки коренеплодів.

Умовні позначення

- φ - усереднений кут повороту коліс передньої осі;
 z - зміщення копіра від його середнього положення;
 K - коефіцієнт пропорційності;
 J - зведений момент інерції копіра;
 F_1 - сила опору зі сторони ґрунту на копір в напрямку, протилежному руху комбайна;
 F_2 - сумарна сила опору ґрунту та сила опору в системі кріплення копіра до рами в напрямку, перпендикулярному до напрямку руху комбайна;
 F_3 - сила тиску на копір при його взаємодії з коренеплодом;
 a - довжина важеля, який несе контактний орган копіра;
 β - коефіцієнт в'язкого тертя;
 m - маса копіра;
 v - швидкість руху комбайна;
 R_3 - радіус, по якому рухається копір при повороті комбайна;
 C_k - зведена жорсткість щупа копіра в місці контакту з буряком;
 x - координата точки кріплення копіра до рами;
 Δ - зазор між копіром та коренеплодом при нормальному русі комбайна;
 A_1, B_1, A_2, B_2 - сталі інтегрування;
 γ_i - кут повороту копіра без врахування повороту корпусу комбайна;
 γ_{i+1} - кут повороту копіра з врахуванням повороту корпусу комбайна, який обертається з швидкістю $\dot{\psi}$ за час Δt .

Проблема підвищення технічного рівня бурякозбиральних машин, основними критеріями оцінки яких є відношення втрат, забрудненості та пошкоджень коренеплодів цукрових буряків до їх загальної маси, залишається особливо актуальною в плані подальшого розвитку вітчизняної коренезбиральної техніки.

Одним із шляхів удосконалення бурякозбиральних комбайнів є використання автомата водіння машини по рядках. Існуючі конструкції мають ряд недоліків [1,2].

Автомат керування бурякозбиральним комбайном представляє собою гідромеханічну слідкуючу систему, яка забезпечує необхідну точність направлення руху машини вздовж збираних рядків коренів цукрових буряків.

Проте існуючі конструкції автоматів водіння мають складну конструкцію і велику кількість регульованих параметрів, що знижує їх ефективність при використанні [3, 4].

Процес руху бурякозбирального комбайна, що керується гідрооб'ємним автоматом водіння, можна розділити на 2 етапи. Перший – рух копіра без контакту із коренеплодом, другий – контакт копіра із коренеплодом. Дослідження руху на першому етапі має за мету визначити стійкість прямолінійного руху комбайна при випадкових збуреннях. На другому етапі руху особливий інтерес становить дослідження відслідкову-

вання комбайном траєкторії посадки буряків та визначення зусиль в контакті копір – коренеплід.

Приймаємо, що процес зміщення копіра z забезпечує поворот керованих коліс комбайна за законом

$$\varphi = Kz. \quad (1)$$

При цьому рух комбайна залежить від зміни положення копіра внаслідок дії сил тертя копіра об ґрунт та тертя у механізмі керування, контакту копіра з коренеплодом, сили різання ґрунту при наявності копіра культиваторного типу, відцентрових сил інерції, а також зміщення копіра відносно комбайна при його повороті.

Вважаємо, що комбайн рухається з постійною лінійною швидкістю по траєкторії, яка повністю описується кутом повороту коліс φ (1), тобто нехтуємо інерційними параметрами приводу та проковзуванням коліс по ґрунту.

Розглянемо зусилля, що діють на контактний орган копіра (рис. 1).

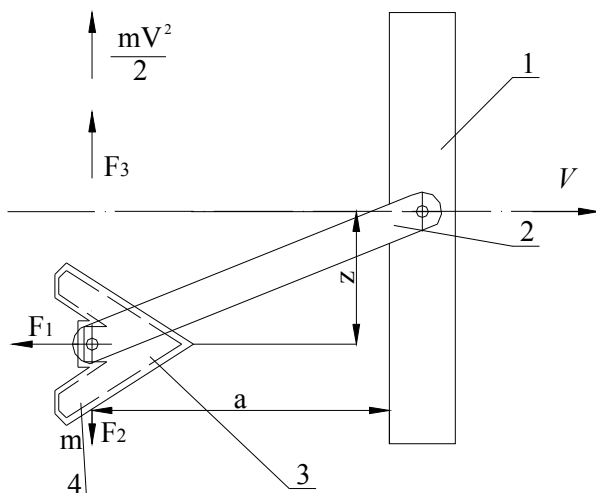


Рис. 1 - Розрахункова схема взаємодії копирів з коренеплодом:
1 – рама, 2 – важіль кріплення копірів,
3 – коренеплід, 4 – копір

Рівняння руху копіра зручно записати через його кут повороту γ відносно точки установки на несучій рамі комбайна у вигляді другого закону Ньютона:

$$J\ddot{\gamma} = -F_1 z \sin \gamma + F_2 a \cos \gamma \operatorname{sgn} \dot{\gamma} - \beta \dot{\gamma} - F_3 a - a \frac{mv^2}{R_3}. \quad (2)$$

У формулі (2) перший доданок характеризує вплив сили опору ґрунту на копір у поздовжньому напрямку руху комбайна, яка складається із сили тертя об ґрунт та сили різання ґрунту у випадку культиваторного копіра. Дане зусилля призводить до стабілізації положення копіра біля його нульового положення. На величину зусилля впливають як параметри ґрунту, так і конструктивні параметри копіра.

Другий та третій доданки описують, відповідно, суху та в'язку складові бокового опору ґрунту і тертя в системі кріплення копіра до рами, направлені проти швидкості зміщення копіра $\dot{\gamma}$.

Четвертий доданок залежить від контакту копіра з коренеплодом і описується такою залежністю:

$$F_3 = \begin{cases} c_k(x+z-\Delta), & \text{при } x+z > \Delta, \\ c_k(x+z+\Delta), & \text{при } x+z < -\Delta, \\ 0, & \text{при } -\Delta \leq x+z \leq \Delta. \end{cases} \quad (3)$$

Останній доданок – сила інерції, яка зміщує копір від нейтрального положення при коловому русі комбайна.

Розв'язок рівняння (2) можна значно спростити, скориставшись тим, що кутове відхилення γ в реальній системі мале, тому можна прийняти $\sin \gamma \approx \gamma$, $\cos \gamma \approx 1$, звідки рівняння (2) прийме вигляд

$$J\ddot{\gamma} + \beta\dot{\gamma} + F_1\gamma = -F_2 \operatorname{sgn} \dot{\gamma} - F_3 a - a \frac{mv^2}{R_3}. \quad (4)$$

Розв'язок рівняння (4) не викликає труднощів, для чого запишемо характеристичне рівняння та знайдемо його корені:

$$Jk^2 + \beta k + F_1 = 0. \quad (5)$$

Корені характеристичного рівняння (5) можуть бути комплексними або дійсними в залежності від значення дискримінанта. Тому розв'язок рівняння (4) в першому випадку отримаємо у вигляді згасаючого коливного процесу:

$$k_{1/2} = r \pm iv,$$

де

$$r = -\frac{\beta}{2J},$$

$$v = \frac{\sqrt{4JF_1 - \beta^2}}{2J}.$$

При великому значенні коефіцієнта β корені характеристичного рівняння стануть дійсними $k_{1/2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J}$.

При цьому матиме місце аперіодичний згасаючий процес.

В першому випадку загальний розв'язок диференціального рівняння руху описується залежністю

$$\gamma_{\text{заг}} = e^{rt} (A_1 \sin vt + B_1 \cos vt).$$

В другому випадку

$$\gamma_{\text{заг}} = A_2 e^{\frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J}t} + B_2 e^{\frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J}t}.$$

Так як права частина рівняння (4) в межах прийнятих припущень є постійною, шукаємо частковий розв'язок у вигляді постійного коефіцієнта. Після перетворень отримаємо

$$\gamma_{\text{част}} = \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right),$$

де знак перед першим доданком протилежний знаку швидкості $\dot{\gamma}$.

Відповідно, два можливих розв'язки рівняння руху матимуть вигляд

$$\gamma_1 = e^{rt} (A_1 \sin vt + B_1 \cos vt) + \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right); \quad (6)$$

$$\gamma_2 = A_2 e^{\frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J}t} + B_2 e^{\frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J}t} + \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right). \quad (7)$$

Визначимо кутове зміщення та його швидкість у початковий момент руху:

$$\gamma(0) = \gamma_0,$$

$$\dot{\gamma}(0) = \dot{\gamma}_0 \quad (8)$$

Підставивши значення (8) у рівняння (6) та (7), отримаємо значення сталих інтегрування:

$$B_1 = \gamma_0 - \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right);$$

$$A_1 = \frac{\dot{\gamma}_0 - B_1 r}{v};$$

$$B_2 = \frac{\dot{\gamma}_0 - k_1 \left(\gamma_0 - \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right) \right)}{k_2 - k_1};$$

$$A_2 = \frac{k_2 \left(\gamma_0 - \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right) \right) - \dot{\gamma}_0}{k_2 - k_1}.$$

Підставимо розрахункове значення кута відхилення γ , обчислене за формулами (6) або (7), у залежність (1), врахувавши, що при малих кутах відхилення $z = a\gamma$:

$$\varphi = Ka \left[e^{rt} (A_1 \sin vt + B_1 \cos vt) + \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right) \right] \quad (9)$$

або

$$\varphi = Ka \left[A_2 e^{\frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J} t} + B_2 e^{\frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4JF_1}}{2J} t} + \frac{a}{F_1} \left(\mp F_2 - F_3 - \frac{mv^2}{R_3} \right) \right] \quad (10)$$

Наведений вище розв'язок рівняння руху не враховує повороту корпусу комбайна внаслідок його руху по дузі кола. Тому необхідне додаткове рівняння, яке зв'яже кутове відхилення копіра γ із відповідним поворотом корпусу комбайна. Його можна записати у такому вигляді:

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i - \dot{\psi} \cdot \Delta t, \quad (11)$$

Розв'язок рівняння (11) зручно провести чисельним методом, який поєднує переваги аналітичного розв'язку (9, 10) та дає можливість на кожному кроці інтегрування визначати знак сили F_2 і величину сили F_3 із формули (3).

Для аналізу отриманого розв'язку створена програма та побудовано графічні залежності основних кінематичних і силових параметрів для певних умов роботи.

На рис. 2 показані результати розрахунку відносного зміщення копіра, зміщення рами комбайна та повороту його корпусу під час руху з відслідковуванням по траєкторії посадки коренеплодів, яка описується синусоїдальною залежністю. Для цього ж випадку на рис. 3 показані відповідні швидкості, а на рис. 4 – зусилля тиску копіра на коренеплід.

Графіки (рис. 2, 3, 4) розраховані для таких значень величин: $K = 1$, $F_1 = 400$ Н, $F_2 = 200$ Н, $\beta = 10$ 1/сек, $m = 50$ кг, $v = 2$ м/сек, $c_k = 10000$ Н/м, $\Delta = 0,05$ м, $a = 0,3$ м, $J = ma^2 = 40,5$ кг м², траєкторія посадки коренеплодів описується залежністю $y = 0,1 \sin(\frac{2\pi vt}{20})$.

Як видно із наведених графіків, комбайн відслідковує нерівномірності траєкторії посадки коренеплодів з необхідною точністю, що не перевищує кількох сантиметрів, при цьому швидкості руху комбайна та сила тиску на буряк не виходять за межі допустимих значень.

Цікавим є дослідження впливу окремих параметрів процесу на точність відслідковування та зусилля контакту копіра з коренеплодом. З цією метою були проведені неодноразові експерименти та знайдені максимальні розрахункові відхилення робочого органу від ідеальної траєкторії і зусилля контакту копіра з коренеплодом при наведених вище параметрах, які залишались постійними при зміні певного з них. Результати розрахунків наведені на графіках (рис. 2, 3, 4, 5).

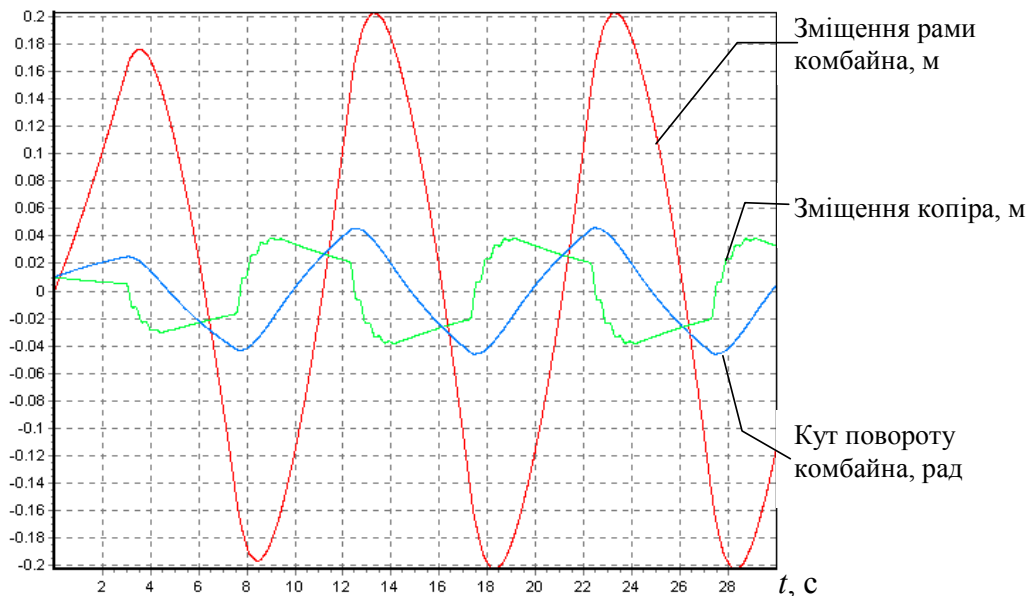


Рис. 2 - Відслідковування комбайна за траєкторією посадки коренеплодів.

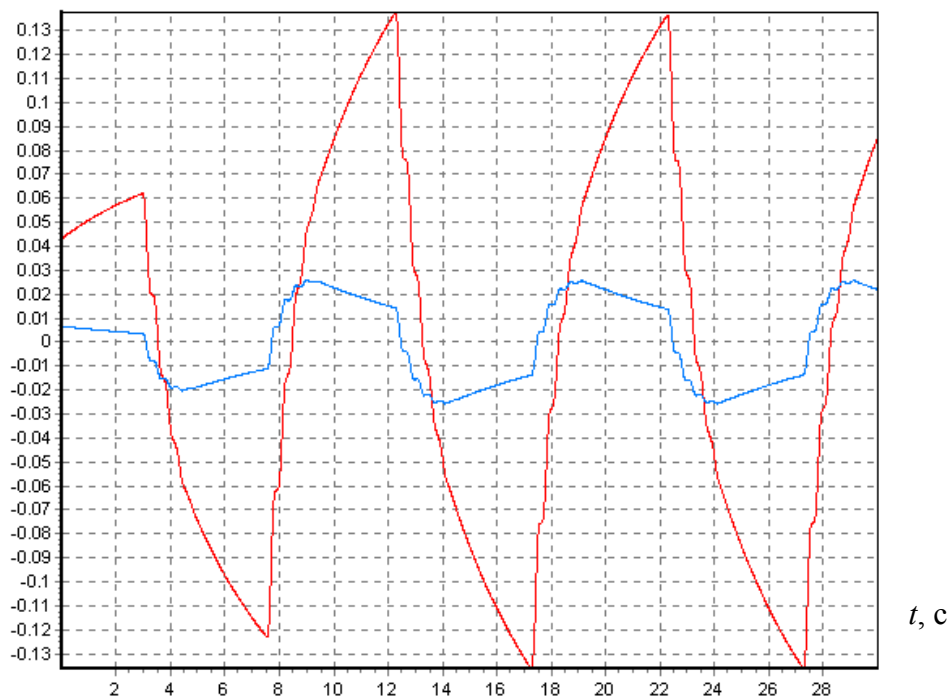


Рис. 3 - Швидкості поперечних коливань комбайна та копіра під час відслідковування.

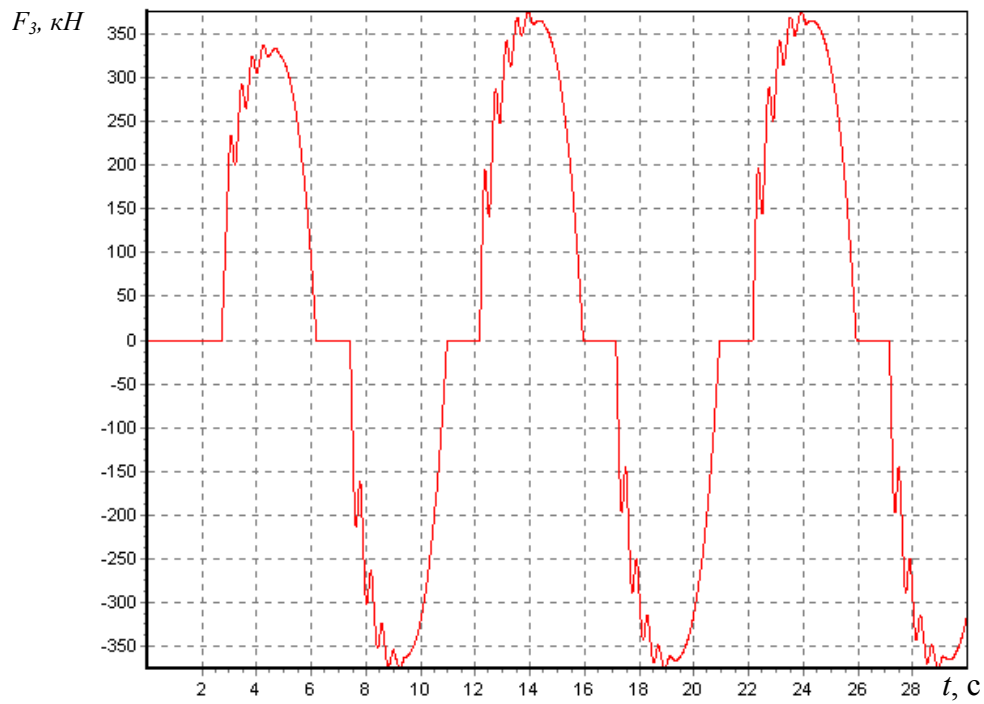


Рис.4 - Величина зусилля між копіром та коренеплодом, Н.

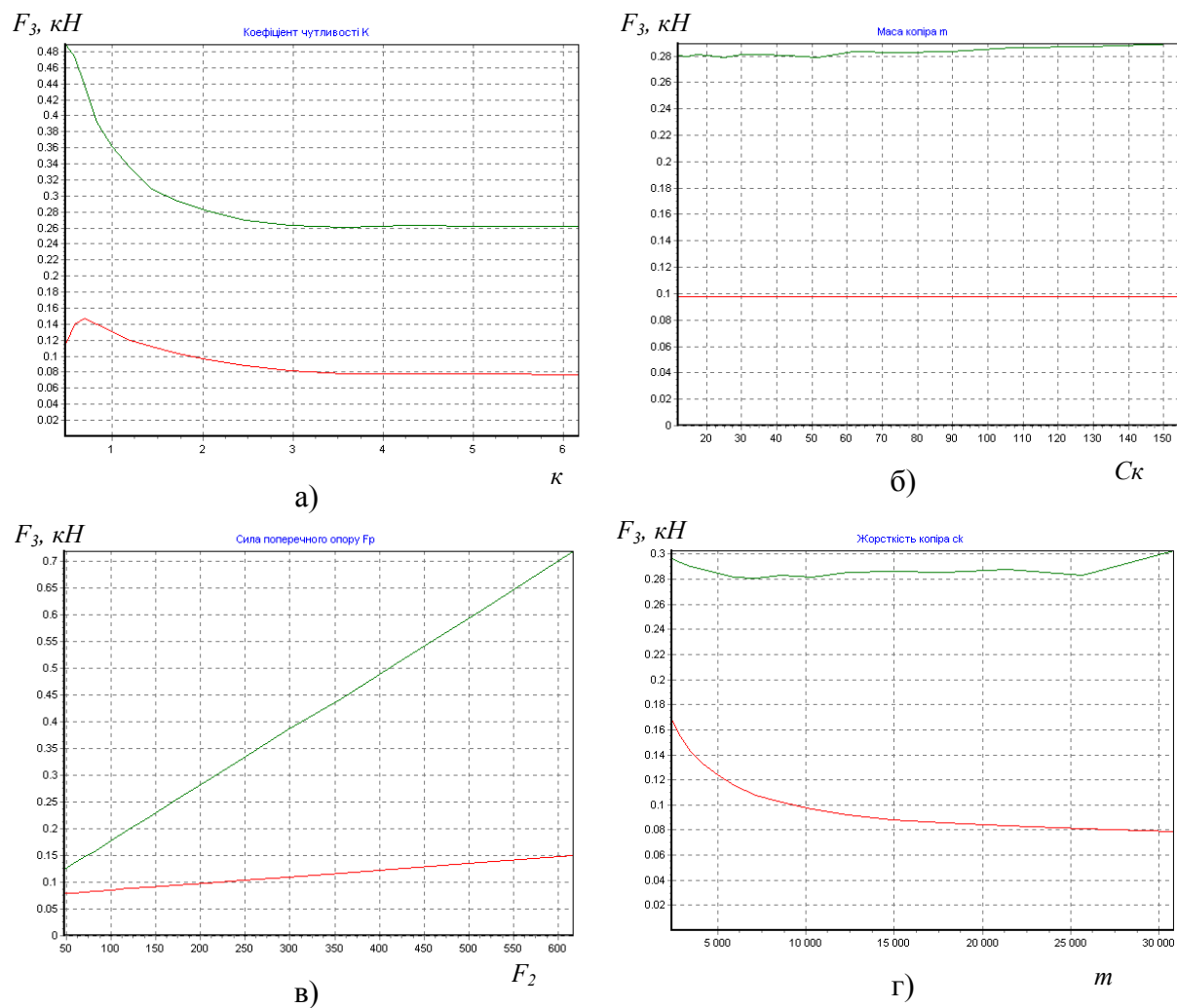


Рис. 5 - Залежність сили тиску на буряк (kH) і відхилення копіра від траєкторії M від:
а – коефіцієнта чутливості автомата керування; б – жорсткості пера копіра,
в – зусилля поперечного опору руху копіра, г – маси копіра.

Як видно із наведених графіків, силу взаємодії копіра з коренеплодом збільшує величина поперечної складової сили опору, маса та жорсткість копіру, в той же час підвищення коефіцієнта чутливості механізму керування поворотом коліс суттєво її знижує, стабілізуючи при певному значенні.

Як видно з графіків, збільшення поперечної складової сили опору суттєво збільшує відхилення від траєкторії слідування, в той же час зростання жорсткості копіра та коефіцієнта чутливості механізму повороту коліс стабілізує траєкторію руху комбайна.

Висновок

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень було встановлено, що силу взаємодії копіра з коренеплодом збільшує величина поперечної складової сили опору, маса та жорсткість копіра, в той же час підвищення коефіцієнта чутливості механізму керування поворотом коліс суттєво її знижує, стабілізуючи при певному значенні.

На основі отриманих теоретичних залежностей і експериментальних досліджень та аналізу графіків можна визначити зусилля в місці контакту копіра з коренеплодом та підібрати оптимальні параметри регулюючого пристрою для забезпечення мінімальних контактних зусиль при достатній точності відслідковування траєкторії посадки коренеплодів.

The interaction of master forms of driving automatic device of the rootharvesting machine with rootcrops was under consideration. The differential equations of master form motion were derivated and on their bases analytical dependences of the master form contact effort with rootcrop, the rational parameters of driving automatic devise of sufficient precision of rootcrops planting trajectory tracing were determined. Practical recommendation dealing with the choice of structural and technological parameters are given.

Література

1. 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.
2. Напрямки вдосконалення бурякозбиральної техніки/ Р.Б. Гевко, І.Г. Ткаченко, С.В. Синій та ін.- Луцьк:ЛДТУ,1999.-168 с.
3. Гевко Б.М., Білик С.Г. До питання керування бурякозбиральним комбайном. Науковий вісник НАУ, №49, К., 2002.
4. А.Б. Свирищевский, С.П. Гельфенбейн Технологические основы автоматизации сельскохозяйственного производства, М.: Колос, 1996.
5. Гичкоріз турбінний ГТК-6. Протокол державних приймальних випробувань №2-25 200 (1071400) від 22 грудня 2000 р. Львівської державної зональної машиновипробувальної станції.

Одержано 21.11.2002 р.