

Погорілий С. П.

Д.Т.Н., С.Н.С.

*Інститут механіки та
автоматики
агропромислового
виробництва Національної
академії аграрних наук
України***Ігнат'єв Є. І.**

К.Т.Н., старший викладач

*Таврійський державний
агротехнологічний
університет ім. Дмитра
Моторного***Ольт Ю.**

Д.Т.Н., професор

*Естонський університет
природничих наук***Pohorilyi S.**Doctor of Technical Sciences, Senior
Research Fellow*Institute of Mechanics and
Automation of Agro-Industrial
Production of the National
Academy of Agrarian
Sciences of Ukraine***Ihnatiev Y.**Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer*Dmytro Motornyj Tavria State
Agrotechnological University***Olt J.**

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Estonian University of Life
Sciences*

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ У МІЖРЯДДЯХ
ПОСІВ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ НА ПОКАЗНИКИ
ПРОЦЕСУ КОПИВАННЯ ПОВЕРХНІ ПОЛЯ
ҐЧКОЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ © 2026
by Погорілий С. П., Ігнат'єв Є. І., Ольт Ю. ліцензовано
згідно з СС BY 4.0

УДК 631.35:531.3:633.63**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-7****ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ВПЛИВУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ
У МІЖРЯДДЯХ ПОСІВІВ
ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ НА
ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ
КОПИВАННЯ ПОВЕРХНІ ПОЛЯ
ҐЧКОЗБИРАЛЬНОЮ МАШИНОЮ**

Теоретично досліджено вплив пружно-демпфувальних властивостей ґрунту на технологічну якість робочого процесу передньоनावішеної гичкозбиральної машини з роторним гичкозрізувальним апаратом. Проблему розглянуто з позицій стабільності копіювання поверхні поля опорно-копіювальними колесами, оскільки вертикальні та кутові коливання рами змінюють положення робочого органу, спричиняють відхилення висоти зрізу, збільшують втрати гички та знижують рівномірність очищення головок коренеплодів. Уточнено розрахункову схему машини, у якій контакт «опорно-копіювальне колесо – ґрунт» подано в'язкопружною ланкою Кельвіна-Фойгта з еквівалентними параметрами жорсткості та демпфування ґрунтової основи. На основі рівнянь Лагранжа другого роду сформовано математичну модель зв'язаних коливань, у якій узагальненими координатами є кутове відхилення рами та вертикальне переміщення осі опорно-копіювальних коліс. Чисельний аналіз виконано для порівняння з порівнянням результатів із граничним варіантом жорсткої ґрунтової опори. Амплітуди на графічних залежностях перераховано для половини висоти нерівності $h_0 = 0,02$ м, що забезпечило зменшення амплітудних значень удвічі порівняно з базовими розрахунками. Установлено, що збільшення моменту інерції машини з 30 до 60 кг·м² при швидкості 1,0 м·с⁻¹ зменшує амплітуду вертикальних коливань робочого органу приблизно з 89,9 до 49,1 мм. Зменшення відстані від точки підвісу до осі опорно-копіювальних коліс є найрезультативнішим конструктивним засобом зниження амплітуди. Показано, що скінченна жорсткість і демпфування ґрунту помірно, але принципово змінюють амплітудно-частотну та фазово-частотну характеристики, особливо у верхній частині робочого діапазону швидкостей. Отримані результати використано для обґрунтування рекомендацій щодо підвищення технологічної якості робочого процесу шляхом урахування стану ґрунту, компонування опорно-копіювальних коліс і параметрів швидкісного режиму.

Ключові слова: гичкозбиральна машина, роторний гичкозрізувальний апарат, опорно-копіювальні колеса, технологічна якість, пружно-демпфувальні властивості ґрунту, модель Кельвіна-Фойгта, рівняння Лагранжа, амплітуда коливань, копіювання поверхні поля..



Постановка проблеми. Якість виконання робочого процесу під час збирання гички цукрового буряка визначається не лише енергетичними та продуктивнісними показниками агрегату, а передусім стабільністю положення роторного гичкозрізувального апарата відносно головок коренеплодів. Для передньонавішених гичкозбиральних машин ця стабільність залежить від здатності опорно-копіювальних коліс відтворювати профіль поверхні поля без надмірного вертикального зміщення та фазового запізнення. Якщо робочий орган рухається зі значною амплітудою, виникають ділянки завищеного або заниженого зрізу, збільшуються втрати гички, підвищується ризик пошкодження головок коренеплодів і погіршується рівномірність подальшого технологічного процесу.

У більшості інженерних розрахунків нерівності поля задають як геометричне або кінематичне збурення, а ґрунт під опорно-копіювальними колесами вважають абсолютно жорсткою опорою. Такий підхід є зручним для попереднього оцінювання конструктивних параметрів, але він не враховує реальної деформівності ґрунту, його вологості, щільності, модуля реакції основи, демпфувальних властивостей та зміни контактної плями колеса. У практичних умовах саме ґрунтова основа є проміжною ланкою між профілем поля й опорно-копіювальним колесом, тому вона здатна змінювати як амплітуду вертикального переміщення робочого органу, так і фазу його реакції на збурення.

Актуальність дослідження посилюється тим, що сучасні гичкозбиральні машини працюють у широкому діапазоні швидкостей і на полях з неоднорідними ґрунтовими умовами. За однакового профілю нерівностей вологий або розуцільнений ґрунт може збільшувати осадку опорно-копіювальних коліс, тоді як ущільнений ґрунт змінює характер передавання нормальної реакції. Тому підвищення технологічної якості робочого процесу потребує переходу від суто геометричного опису нерівностей до моделі, у якій контакт колеса з ґрунтом має скінченну жорсткість і демпфування.

У цій роботі якість копіювання поверхні поля оцінюється за амплітудою вертикальних коливань роторного гичкозрізувального апарата Ар та за фазовим запізненням його переміщення відносно гармонічної складової профілю поля. Така постановка дає змогу пов'язати розрахункові динамічні характеристики з технологічними наслідками: стабільністю висоти зрізу, рівномірністю обрізування, імовірністю втрат гички та умовами роботи транспортуючих органів.

Аналіз останніх досліджень. Теоретичні основи аналізу коливань передньонавішених

гичкозбиральних машин сформовано в роботах, де рух гичкозрізувального модуля у поздовжньо-вертикальній площині описано рівняннями Лагранжа другого роду [1, 2]. У цих дослідженнях показано, що інтенсивність коливань суттєво залежить від моменту інерції, геометрії підвіски, швидкості руху та параметрів профілю нерівностей. Експериментальну оцінку роботи передньонавішеної машини для збирання гички як біомаси наведено в [3], а розширену модель руху гичкозбирального модуля з урахуванням конструктивно-кінематичних чинників розглянуто в [4]. Для задньопричіпної гичкозбиральної машини аналогічну проблему стійкості технологічного процесу пов'язано з параметрами плоскопаралельного руху агрегату [5].

Окремий напрям досліджень стосується зв'язку коливань робочого органу з технологічними втратами. У роботі [6] теоретично обґрунтовано, що коливання роторного гичкозрізувального апарата в поздовжньо-вертикальній площині можуть спричинити втрати гички через зміну фактичної висоти зрізу. Це підтверджує доцільність використання амплітуди вертикальних коливань як одного з розрахункових критеріїв технологічної якості робочого процесу.

Разом з тим у більшості зазначених праць контакт опорно-копіювальних коліс із поверхнею поля описують переважно через заданий профіль нерівностей або через параметри колеса, тоді як ґрунтова основа не розглядається як окрема пружно-демпфувальна ланка. Сучасні дослідження взаємодії шини з пластичним ґрунтом показують, що така взаємодія є нелінійною, залежить від типу ґрунту, вологості, щільності, вертикального навантаження, тиску в шині та площі контакту [7–9]. Це означає, що для опорно-копіювального колеса гичкозбиральної машини поверхня поля не є ідеально жорсткою базою, а фактична реакція ґрунту може мати як пружну, так і в'язку складові.

Роботи з оцінювання ґрунтових напружень під сільськогосподарськими шинами підкреслюють важливість контактної площі та тиску в шині для передавання навантаження на ґрунт [10, 11, 13]. Дослідження впливу об'ємної щільності та вмісту води на площу контакту шина-ґрунт показують, що збільшення вологості та зменшення жорсткості ґрунтового масиву змінюють характер контакту [12]. Для інженерного опису нормальної реакції деформівної основи часто використовують модуль реакції основи [14], а для врахування енергетичних втрат у ґрунті – коефіцієнт в'язкого демпфування або частку критичного демпфування [15].

Отже, невирішеною частиною загальної проблеми залишається інтеграція пружно-демпфувальних властивостей ґрунтової основи у математичну модель коливань передньонавішеної гичкозбиральної машини та кількісне оцінювання впливу цих властивостей на якість копіювання поверхні поля.

перекочуванню; N_0 – статична складова нормальної реакції; $\alpha(t) = \partial h / \partial x$ – локальний кут нахилу профілю нерівностей; $h(t)$ – висота профілю поля; $\dot{h}(t)$, $\dot{z}(t)$, $\dot{\varphi}(t)$ – відповідні похідні за часом; $\ddot{z}(t)$, $\ddot{\varphi}(t)$ – кутове та вертикальне прискорення.

Еквівалентну жорсткість ґрунтової основи визначали через модуль реакції основи k_s та характерну площу контакту A_c , яку оцінювали за статичним навантаженням N_0 і середнім контактним тиском p_c :

$$K_g = k_s \cdot A_c, \quad A_c = N_0 / p_c. \quad (5)$$

Еквівалентне демпфування ґрунтової основи оцінювали через частку критичного демпфування ζ , що відповідає інженерному в'язкопружному поданню деформівної основи:

$$\mu_g = 2\zeta \sqrt{(m_{eq} \cdot K_g)} \quad (6)$$

Для теоретичних досліджень прийняті наступні параметри (табл. 1) та еквівалентні параметри ґрунтової основи для опорно-копіювальних коліс: Тип ґрунту – чорнозем; $k_s = 25 \text{ МН} \cdot \text{м}^{-3}$; $2C_g = 294071 \text{ Н/м}$; $2\mu_g = 1517 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$.

Таблиця 1.

Вихідні параметри для чисельного моделювання

№	Параметр	Позначення	Значення
1	Маса машини разом з гичкою	m , кг	948
2	Маса опорно-копіювальних коліс (сумарна)	m_k , кг	48,9
3	Момент інерції машини відносно осі повороту	I_{Oy} , кг·м ²	30–60
4	Відстань від точки підвісу до осі коліс	L , м	0,5–1,0
5	Відстань від точки підвісу до роторного гичкозрізувального апарата	l_2 , м	1,10
6	Сумарна жорсткість опорно-копіювальних коліс	$2C$, Н·м ⁻¹	4000
7	Сумарне демпфування опорно-копіювальних коліс	2μ , Н·с·м ⁻¹	150
8	Половина висоти нерівності поверхні	h_0 , м	0,02
9	Крок нерівностей профілю поля	h , м	0,70
10	Коефіцієнт опору перекочуванню	f	0,3
11	Статична нормальна реакція в контакті	N_0 , Н	4117
12	Радіус опорно-копіювального колеса	r , м	0,365

Для оцінювання амплітуди вимушених коливань систему (4) розв'язували в усталеній гармонічній постановці. Після переходу до комплексних амплітуд Z амплітуда вертикальних коливань роторного гичкозрізувального апарата визначалась як:

$$A_p = |Z - l_2 \cdot \varphi| \quad (7)$$

Параметричний розрахунок виконано в

діапазоні $I_{Oy} = 30\text{--}60$ кг·м², $V = 1,0\text{--}2,8$ м·с⁻¹, $L = 0,5\text{--}1,0$ м. Для побудови порівняльних залежностей додатково розглянуто варіант без урахування пружно-демпфувальних властивостей ґрунту. Його задавали як граничний випадок жорсткої ґрунтової опори: $2C_g = 10^9$ Н·м⁻¹, $2\mu_g = 0$, тобто деформація ґрунтової основи не враховувалася, а поверхня поля виступала безпосередньою кінематичною базою контакту.

Теоретичну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) і фазово-частотну характеристику (ФЧХ) визначали за комплексною передавальною функцією $H_p(i\omega) = (Z - l_2 \cdot \varphi) / H$, де $H = h_0$ – амплітуда гармонічної складової профілю. АЧХ подавали як $A_p(\omega) = |Z - l_2 \cdot \varphi|$, а ФЧХ – як $\psi_p(\omega) = \arg[(Z - l_2 \cdot \varphi) / H]$.

За удосконаленою моделлю побудовано графічні залежності рис. 2–5. Оскільки система в прийнятій лінійній постановці є пропорційною за амплітудою збурення, такий перерахунок не змінює тенденцій впливу параметрів, але приводить абсолютні значення A_p до уточненого рівня. На рис. 2 і рис. 3 кольорова поверхня відповідають моделі з урахуванням пружно-демпфувальних властивостей ґрунту, а тонкі каркасні лінії – граничному варіанту жорсткої опори.

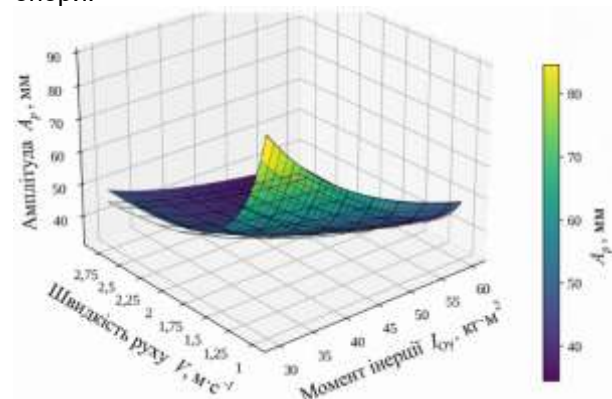


Рис. 2. Поверхня відгуку $A_p(\omega, V)$ для чорнозему при $L = 0,75$ м: кольорова поверхня – з урахуванням пружно-демпфувальних властивостей ґрунту; тонка каркасна сітка – без їх урахування



Рис. 2 підтверджує, що збільшення моменту інерції знижує амплітуду вертикальних коливань роторного гичкозрізувального апарата в усьому діапазоні швидкостей. Для чорнозему за $V = 1,0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ амплітуда зменшується приблизно з 89,9 до 49,1 мм при збільшенні з 30 до 60 $\text{кг}\cdot\text{м}^2$. Це означає, що більша інерційність рами знижує чутливість машини до короткоперіодичних вертикальних збурень від опорно-копіювальних коліс. У низькошвидкісному режимі крива без урахування пружно-демпфувальних властивостей ґрунту майже збігається з основою поверхнею, тоді як за $V = 2,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ різниця стає помітнішою: для $I_{0y} = 45 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ модель з урахуванням ґрунту дає $A_p \approx 39,5 \text{ мм}$, а варіант жорсткої опори – близько 36,3 мм. Отже, ігнорування ґрунтової ланки може занижувати розрахункове вертикальне відхилення робочого органу саме в режимах, де підвищена швидкість руху вже погіршує технологічну якість копіювання.

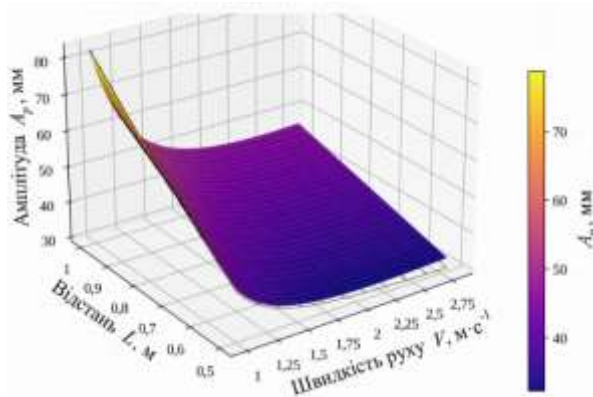
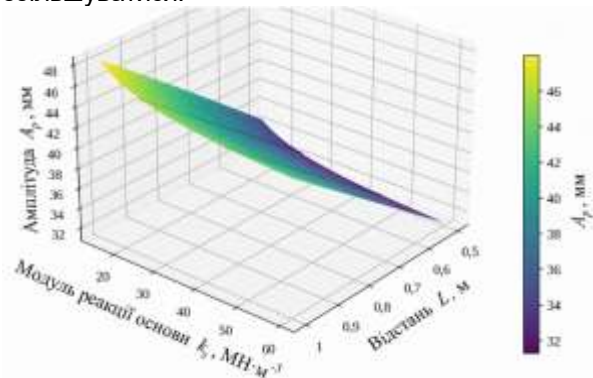


Рис. 3. Поверхня відгуку $A_p(V, L)$ для чорнозему при $I_{0y} = 45 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$: кольорова поверхня – з урахуванням пружно-демпфувальних властивостей ґрунту; тонка каркасна сітка – без їх урахування

За рис. 3 найбільш виразним конструктивним чинником є відстань L між точкою підвісу та віссю опорно-копіювальних коліс. За $V = 1,0 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ збільшення L від 0,5 до 1,0 м підвищує A_p приблизно з 43,3 до 82,1 мм. Це пояснюється збільшенням моменту від нормальної реакції ґрунту відносно точки підвісу та посиленням зв'язку між вертикальними і кутовими коливаннями. У зоні більшої швидкості вплив ґрунтової основи проявляється сильніше: за $V = 2,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ і $L = 0,75 \text{ м}$ модель з урахуванням чорнозему дає близько 39,5 мм, а жорстка опора – близько 36,3 мм. Тому компонування опорно-копіювальних коліс слід розглядати не лише як геометричне рішення, а як чинник, що визначає якість копіювання за конкретного типу й стану ґрунту.

Рис. 4 подано як поверхню відгуку амплітуди від плеча L та еквівалентного модуля реакції ґрунтової основи k_s . Для побудови поверхні жорсткість $2C_g$ масштабували пропорційно k_s , а

демпфування $2\mu_g$ – пропорційно відповідно до прийнятого способу оцінювання демпфування. Поверхня показує, що зростання k_s зменшує A_p , проте цей ефект поступається впливу L . Наприклад, при $L = 0,75 \text{ м}$ збільшення k_s з 15 до 60 $\text{МН}\cdot\text{м}^{-3}$ знижує амплітуду орієнтовно з 41,7 до 37,6 мм, тоді як зміна L від 0,5 до 1,0 м при $k_s = 25 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3}$ змінює A_p приблизно з 32,7 до 46,1 мм. Таким чином, у дослідженому діапазоні параметрів ґрунт має коригувальний вплив, але в умовах перезволоження, розущільнення або локальної неоднорідності його роль може збільшуватися.



Рис/ 4. Поверхня відгуку $A_p(L, k_s)$ при $I_{0y} = 45 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ і $V = 2,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; $2\mu_g(k_s)$ визначено за залежністю, пропорційною $\sqrt{k_s}$

АЧХ на рис. 5 побудовано для $I_{0y} = 45 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ і $L = 0,75 \text{ м}$ у частотному інтервалі, який охоплює робочі швидкості $V = 1,0\text{--}2,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. В обох варіантах амплітуда зменшується при переході від низьких частот до середньої частини робочої зони. Поблизу $\omega = 9 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ обидві криві майже збігаються: A_p становить близько 61,6 мм. У верхній частині робочої зони різниця зростає: при $\omega \approx 25 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ модель із ґрунтом дає $A_p \approx 39,4 \text{ мм}$, а варіант жорсткої опори – близько 36,3 мм. Для технологічної якості це означає, що за підвищених швидкостей розрахунок без ґрунтової ланки може недооцінювати фактичні відхилення висоти зрізу, а отже – ризик нерівномірного зрізування гички.

ФЧХ на рис. 6 свідчать, що у робочому інтервалі частот вертикальне переміщення роторного гичкозрізувального апарата відстає за фазою від гармонічної складової профілю поля. За $\omega \approx 9 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ фазове відставання становить приблизно $-48,8^\circ$ для моделі з ґрунтом і $-47,8^\circ$ для жорсткої опори. За $\omega \approx 25 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$ відповідні значення становлять близько $-11,2^\circ$ та $-8,1^\circ$. Отже, урахування пружно-демпфувальних властивостей ґрунту змінює не тільки амплітуду, а й фазове запізнення робочого органу. Для робочого процесу це важливо, оскільки несинхронність копіювання призводить до того, що роторний гичкозрізувальний апарат реагує на нерівності із запізненням, а фактична висота зрізу зміщується від оптимальної.

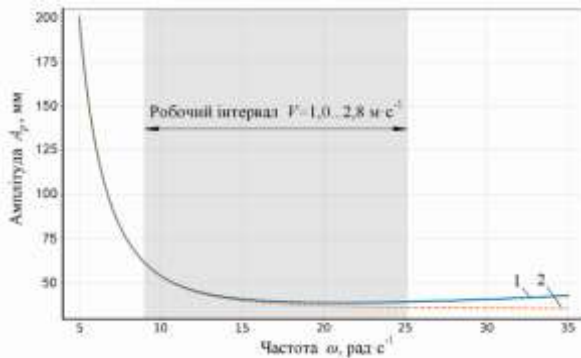


Рис. 5. Теоретичні амплітудно-частотні характеристики коливань гчккозбиральної машини з урахуванням (1) та без урахування (2) пружно-демпфувальних властивостей ґрунту

Порівняння отриманих залежностей із попередніми дослідженнями показує, що інерційні та геометричні чинники, які в роботах [1, 2, 4] визначено як основні для стабілізації руху передньонавішеного гчккозбирального модуля, залишаються визначальними і в уточненій моделі. Проте в цій статті до зазначеної групи чинників додано пружно-демпфувальні властивості ґрунту, які формують додаткову ланку між профілем поля та опорно-копіювальними колесами. Саме ця ланка пояснює розбіжність між поверхнями відгуку для жорсткої та деформівної опори у верхній частині швидкісного діапазону.

Результати узгоджуються з террамеханічними роботами [7–9], у яких підкреслено складність взаємодії шини з деформівним ґрунтом і залежність контакту від вертикального навантаження та тиску в шині. Для гчккозбиральної машини це означає, що навіть відносно невелике опорно-копіювальне колесо не може розглядатися як елемент, що рухається по абсолютно жорсткій траєкторії. Зміна площі контакту, осадки та умов демпфування впливає на нормальну реакцію, а через неї на вертикальне положення робочого органу.

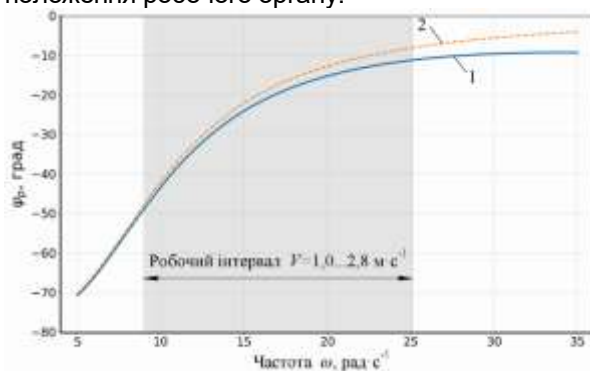


Рис. 6. Теоретичні фазово-частотні характеристики коливань гчккозбиральної машини з урахуванням (1) та без урахування (2) пружно-демпфувальних властивостей ґрунту

Дані досліджень ґрунтових напружень під сільськогосподарськими шинами [10, 11, 13]

підтверджують, що налаштування ходової системи та тиск у шині впливають на контактний тиск і розподіл напружень у ґрунті. У контексті гчккозбиральної машини це може бути використано як практичний резерв підвищення якості робочого процесу: зменшення надмірного контактного тиску та підтримання стабільної площі контакту здатні зменшити коливальні відхилення висоти зрізу. Водночас вплив вологості й щільності ґрунту, проаналізований у [12], показує, що параметри k_s і μ_d не можуть бути сталими для всього поля, тому для високоточного прогнозування необхідна польова ідентифікація стану ґрунту.

З практичного погляду найбільш доцільними напрямками підвищення технологічної якості є зменшення плеча L у межах компоновальних обмежень машини, збільшення інерційної стабільності рами без погіршення агрегативання з трактором, підтримання раціонального тиску в опорно-копіювальних колесах, а також обмеження швидкості руху на перезволожених або нерівномірно ущільнених ділянках. Оскільки демпфування ґрунтової основи може змінюватися залежно від структури та вологості ґрунту [15], остаточне застосування моделі потребує польової верифікації за різних агрофізичних умов.

Отримані результати не заперечують можливості використання спрощеної моделі жорсткої опори для попередніх розрахунків, особливо за малих швидкостей. Проте для оцінювання технологічної якості у швидкісних режимах, для порівняння різних типів ґрунту та для вибору раціональних параметрів опорно-копіювальних коліс урахування пружно-демпфувальної ґрунтової ланки є обґрунтованим і необхідним.

Висновки:

1. Запропоновано уточнену математичну модель коливань передньонавішеної гчккозбиральної машини, у якій контакт «опорно-копіювальне колесо – ґрунт» описано в'язкопружною моделлю Кельвіна-Фойгта з еквівалентними параметрами C_d та μ_d . Це дає змогу оцінювати вплив стану ґрунту на якість копіювання поверхні поля й стабільність висоти зрізу.

2. Показано, що збільшення моменту інерції I_{Oy} з 30 до 60 $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ зменшує амплітуду вертикальних коливань роторного гчккозрізувального апарата в усьому дослідженому діапазоні швидкостей. Для чорнозему при $L = 0,75$ м і $V = 1,0$ $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ амплітуда зменшується приблизно з 89,9 до 49,1 мм.

3. Зменшення відстані L між точкою підвісу та віссю опорно-копіювальних коліс є одним із найефективніших конструктивних способів зниження амплітуди A_p , оскільки зменшує момент від збурювальних сил і



послаблює зв'язок між вертикальними та кутовими коливаннями.

4. Поверхня відгуку A_p (L , k_s) показала, що підвищення жорсткості ґрунтової основи знижує амплітуду, але у прийнятному діапазоні параметрів цей вплив поступається впливу L . Отже, параметри k_s і μ_d мають коригувальний, але технологічно важливий вплив, особливо для перезвожених, розуцільнених або неоднорідних ґрунтів.

5. Порівняння з варіантом жорсткої ґрунтової опори показало, що на малих швидкостях різниця між моделями є незначною, тоді як у верхній частині робочого діапазону ігнорування пружно-демпфувальних властивостей ґрунту може занижувати амплітуду A_p коливань приблизно на 3 мм для прийнятого рівня збурення $h_0 = 0,02$ м.

6. Теоретичні АЧХ і ФЧХ підтвердили, що властивості ґрунту змінюють не тільки амплітуду, а й фазове запізнення робочого органу відносно профілю поля. Це безпосередньо пов'язано з технологічною якістю, оскільки фазове запізнення зменшує синхронність копіювання нерівностей.

7. Перспективою подальших досліджень є польова верифікація моделі за різної вологості, щільності та типу ґрунту з одночасним вимірюванням осадки опорно-копіювальних коліс, вертикальних прискорень роторного гичкозрізувального апарата, фактичних відхилень висоти зрізу та втрат гички.

Список використаних джерел

1. Bulgakov V., Adamchuk V., Nozdrovicky L., Ihnatiev Ye. Theory of vibrations of sugar beet leaf harvester front-mounted on universal tractor. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20(4). P. 96–103. DOI: 10.1515/ata-2017-0019.
2. Bulgakov V., Pascuzzi S., Anifantis A.S., Santoro F. Oscillations analysis of front-mounted beet toppler machine for biomass harvesting. *Energies*. 2019. Vol. 12(14). Article 2774. DOI: 10.3390/en12142774.
3. Bulgakov V., Pascuzzi S., Ivanovs S., Santoro F., Anifantis A.S., Ihnatiev I. Performance assessment of front-mounted beet toppler machine for biomass harvesting. *Energies*. 2020. Vol. 13(14). Article 3524. DOI: 10.3390/en13143524.
4. Pascuzzi S., Bulgakov V., Adamchuk V., Holovach I., Nadykto V., Budzanivskyi M. Study of the movement dynamics of a beet leaves harvester. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(2). Article 841. DOI: 10.3390/app13020841.
5. Olt J., Bulgakov V., Beloiev H., Nadykto V., Ihnatiev Ye., Dubrovina O., Arak M., Bondar M., Kutsenko A. A mathematical model of the rear-trailed top harvester and an evaluation of its motion stability.

Agronomy Research. 2022. Vol. 20(2). P. 371–388. DOI: 10.15159/AR.21.162.

6. Bulgakov V., Adamchuk V., Arak M., Olt J. A theoretical study of haulm loss resulting from rotor toppler oscillation. *Chemical Engineering Transactions*. 2017. Vol. 58. P. 223–228. DOI: 10.3303/CET1758038.

7. Swamy V.S., Pandit R., Yerro A., Sandu C., Rizzo D.M., Sebeck K., Gorsich D. Review of modeling and validation techniques for tire-deformable soil interactions. *Journal of Terramechanics*. 2023. Vol. 109. P. 73–92. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.05.007.

8. Sandu C., Taheri Sh., Taheri S., Gorsich D. Hybrid Soft Soil Tire Model (HSSTM). Part II: Tire-terrain interaction. *Journal of Terramechanics*. 2019. Vol. 86. P. 15–29. DOI: 10.1016/j.jterra.2019.08.004.

9. Alkhalifa N., Tekeste M.Z., Jjagwe P., Way T.R. Effects of vertical load and inflation pressure on tire-soil interaction on artificial soil. *Journal of Terramechanics*. 2024. Vol. 112. P. 19–34. DOI: 10.1016/j.jterra.2023.11.002.

10. Ten Damme L., Stettler M., Pinet F., Vervaeke P., Keller T., Munkholm L.J., Lamandé M. Construction of modern wide, low-inflation pressure tyres per se does not affect soil stress. *Soil and Tillage Research*. 2020. Vol. 204. Article 104708. DOI: 10.1016/j.still.2020.104708.

11. Rivero D., Botta G.F., Antille D.L., Ezquerro-Canalejo A., Bienvenido F., Ucgul M. Tyre configuration and axle load of front-wheel assist and four-wheel drive tractors effects on soil compaction and rolling resistance under no-tillage. *Agriculture*. 2022. Vol. 12(11). Article 1961. DOI: 10.3390/agriculture12111961.

12. Thorpe D.F., Rolim M.M., Pedrosa E.M.R., Simões Neto D.E., Cavalcanti R.Q., Lima R.P. Impacts of bulk density and water content on the tire-soil contact area of agricultural field vehicles. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 2024. Vol. 46(1). Article e67906. DOI: 10.4025/actasciagron.v46i1.67906.

13. Kukharets S., Zabrodskyi A., Sheludchenko B., Jasinskas A., Domeika R., Šarauskiis E. Assessment of changes in soil contact stress depending on tractor tire parameters. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 172. DOI: 10.1038/s41598-024-84102-y.

14. Naeini S.A., Ziaie Moayed R., Kordnaeij A., Mola-Abasi H. Prediction of subgrade reaction modulus of clayey soil using group method of data handling. *Scientia Iranica*. 2020. Vol. 27(4). P. 1740–1750. DOI: 10.24200/sci.2018.5586.1357.

15. Shen Q., Zhang Y., Yan Y., Zhang C., Wang C. A novel method for determining soil damping ratio combining DMA and strain energy. *International Journal of GEOMATE*. 2025. Vol. 28(127). P. 39–46. DOI: 10.21660/2025.127.4759.



References

1. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Nozdrovicky, L., & Ihnatiev, Ye. (2017). Theory of vibrations of sugar beet leaf harvester front-mounted on universal tractor. *Acta Technologica Agriculturae*, 20(4), 96–103. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0019>
2. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Anifantis, A. S., & Santoro, F. (2019). Oscillations analysis of front-mounted beet topper machine for biomass harvesting. *Energies*, 12(14), 2774. <https://doi.org/10.3390/en12142774>
3. Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Ivanovs, S., Santoro, F., Anifantis, A. S., & Ihnatiev, I. (2020). Performance assessment of front-mounted beet topper machine for biomass harvesting. *Energies*, 13(14), 3524. <https://doi.org/10.3390/en13143524>
4. Pascuzzi, S., Bulgakov, V., Adamchuk, V., Holovach, I., Nadykto, V., & Budzanivskyi, M. (2023). Study of the movement dynamics of a beet leaves harvester. *Applied Sciences*, 13(2), 841. <https://doi.org/10.3390/app13020841>
5. Olt, J., Bulgakov, V., Beloev, H., Nadykto, V., Ihnatiev, Ye., Dubrovina, O., Arak, M., Bondar, M., & Kutsenko, A. (2022). A mathematical model of the rear-trailed top harvester and an evaluation of its motion stability. *Agronomy Research*, 20(2), 371–388. <https://doi.org/10.15159/AR.21.162>
6. Bulgakov, V., Adamchuk, V., Arak, M., & Olt, J. (2017). A theoretical study of haulm loss resulting from rotor topper oscillation. *Chemical Engineering Transactions*, 58, 223–228. <https://doi.org/10.3303/CET1758038>
7. Swamy, V. S., Pandit, R., Yerro, A., Sandu, C., Rizzo, D. M., Sebeck, K., & Gorsich, D. (2023). Review of modeling and validation techniques for tire-deformable soil interactions. *Journal of Terramechanics*, 109, 73–92. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.05.007>
8. Sandu, C., Taheri, Sh., Taheri, S., & Gorsich, D. (2019). Hybrid Soft Soil Tire Model (HSSTM). Part II: Tire-terrain interaction. *Journal of Terramechanics*, 86, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.08.004>
9. Alkhalifa, N., Tekeste, M. Z., Jjagwe, P., & Way, T. R. (2024). Effects of vertical load and inflation pressure on tire-soil interaction on artificial soil. *Journal of Terramechanics*, 112, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.11.002>
10. Ten Damme, L., Stettler, M., Pinet, F., Vervaet, P., Keller, T., Munkholm, L. J., & Lamandé, M. (2020). Construction of modern wide, low-inflation pressure tyres per se does not affect soil stress. *Soil and Tillage Research*, 204, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104708>
11. Rivero, D., Botta, G. F., Antille, D. L., Ezquerro-Canalejo, A., Bienvenido, F., & Ucgul, M. (2022). Tyre configuration and axle load of front-wheel assist and four-wheel drive tractors effects on soil compaction and rolling resistance under no-tillage.

- Agriculture, 12(11), 1961. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111961>
12. Thorpe, D. F., Rolim, M. M., Pedrosa, E. M. R., Simões Neto, D. E., Cavalcanti, R. Q., & Lima, R. P. (2024). Impacts of bulk density and water content on the tire-soil contact area of agricultural field vehicles. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 46(1), e67906. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v46i1.67906>
13. Kukharets, S., Zabrodskyi, A., Sheludchenko, B., Jasinskas, A., Domeika, R., & Šarausis, E. (2025). Assessment of changes in soil contact stress depending on tractor tire parameters. *Scientific Reports*, 15, 172. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84102-y>
14. Naeini, S. A., Ziaie Moayed, R., Kordnaeij, A., & Mola-Abasi, H. (2020). Prediction of subgrade reaction modulus of clayey soil using group method of data handling. *Scientia Iranica*, 27(4), 1740–1750. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5586.1357>
15. Shen, Q., Zhang, Y., Yan, Y., Zhang, C., & Wang, C. (2025). A novel method for determining soil damping ratio combining DMA and strain energy. *International Journal of GEOMATE*, 28(127), 39–46. <https://doi.org/10.21660/2025.127.4759>

**THEORETICAL STUDY OF THE EFFECT
OF SOIL PROPERTIES IN THE ROW SPACES
OF SUGAR BEET CROPS ON THE
PERFORMANCE OF THE FIELD SURFACE
COPYING PROCESS IN HOP-HARVESTING
MACHINES MACHINE**

The influence of soil elastic-damping properties on the technological quality of the working process of a front-mounted beet tops harvester equipped with a rotary cutting device is investigated. The problem is considered from the standpoint of stable field-surface copying by support-copying wheels, because vertical and angular oscillations of the frame change the position of the working body, cause deviations in cutting height, increase beet tops losses and reduce the uniformity of root-head cleaning. The calculation scheme is refined by representing the contact “support-copying wheel – soil” as an equivalent Kelvin-Voigt viscoelastic link with soil stiffness and damping parameters. Based on Lagrange equations of the second kind, a mathematical model of coupled oscillations is formulated. The generalized coordinates are the angular displacement of the machine frame and the vertical displacement of the support-copying wheel axle. Numerical calculations are performed for Black soil and the results are compared with the limiting case of a rigid soil base. The amplitude values in the graphical dependences are recalculated for half of the irregularity height $h_0 = 0.02$ m, which provides a twofold reduction in amplitude compared with the basic calculation set. It is established that increasing the machine



moment of inertia from 30 to 60 kg·m² at a forward speed of 1.0 m·s⁻¹ decreases the amplitude of vertical oscillations of the working body from approximately 89.9 to 49.1 mm. Reducing the distance between the hitch point and the axle of the support-copying wheels is the most effective design measure for decreasing the amplitude. It is shown that finite stiffness and damping of the soil moderately but essentially change the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics, especially in the upper part of the operating speed range. The results are used to substantiate

recommendations for improving the technological quality of the working process by taking into account the soil state, the arrangement of support-copying wheels and the parameters of the speed mode

Keywords: : beet-top harvester, rotary cutting device, support-copying wheels, technological quality, soil elastic-damping properties, Kelvin-Voigt model, oscillation amplitude, field-surface copying.

Відомості про авторів

Погорілий Сергій Петрович – д.т.н., старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту механіки та автоматизації агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України (вул. Вокзальна, 11/1, с-ще Глеваха, Фастівський район, Київська область, 08631. e-mail: pogorilyy_sergiy@ukr.net)

Ігнат'єв Євген Ігоревич – к.т.н., старший викладач кафедри експлуатації та технічного сервісу машин Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, (вул. Університетська 66, м. Запоріжжя, Запорізька обл., 69011, Україна e-mail: yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua)

Ольт Юрій – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії біосистем, Естонський університет природничих наук (F. R. Kreutzwaldi tn 1a, 51006 Tartu, Estonia, e-mail: jyri.olt@emu.ee)

Pohorilyi Serhiy – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Deputy Director for Research at the Institute of Mechanics and Automation of Agro-Industrial Production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (11/1 Vokzalna St., Hlevakha Village, Fastiv District, Kyiv Region, 08631; e-mail: pogorilyy_sergiy@ukr.net)

Ihnatiev Yevhen – PhD, Senior Lecturer at the Department of Operation and Technical Service of Machines, (66 Universitetskaya St., Zaporizhzhia, Zaporizhzhia Oblast, 69011, Ukraine; email: yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua)

Jüri Olt – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Chair of Biosystems Engineering, Estonian University of Life Sciences (F. R. Kreutzwaldi tn 1a, 51006 Tartu, Estonia, e-mail: jyri.olt@emu.ee)

Стаття надійшла 30.04.2026

Стаття прийнята 13.05.2026

Опубліковано 28.05.2026