

О. М. Іванов, доц., канд. техн. наук, **Т. Г. Лапенко**, доц., канд. техн. наук,
В. О. Крохмаль

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

e-mail: oleg.ivanov@pdau.edu.ua

Параметрично-критеріальна модель процесу садіння коренеплодів у карусельній машині

Садіння маточних коренеплодів буряків для отримання насіння потребує узгодження конструктивних і режимних параметрів карусельних садильних машин з метою забезпечення стабільності технологічного процесу та збереження посадкового матеріалу. Метою роботи є теоретичне обґрунтування процесу садіння коренеплодів у карусельній машині та розроблення параметрично-критеріальної моделі, що дозволяє визначати область допустимих параметрів її роботи. У дослідженні використано аналітичне моделювання механічних процесів, кінематичний і силовий аналіз та критеріальний підхід до оцінювання працездатності процесу садіння.

У результаті отримано інженерно-критеріальну модель процесу садіння, яка забезпечує аналітичне визначення області допустимих параметрів карусельної машини та кількісну оцінку надійності режимів її роботи. Запропоновано функцію запасу працездатності, що дозволяє ідентифікувати лімітуючі фізичні та технологічні фактори і створює основу для оптимізації режимів садіння за умови збереження стабільності процесу. Наукова новизна роботи полягає у розробленні параметрично-критеріальної моделі процесу садіння маточних коренеплодів у карусельній машині, а практична значущість — у можливості її використання при проектуванні та раціональному налаштуванні карусельних садильних машин для насінництва буряків.

карусельна садильна машина, маточні коренеплоди буряків, процес садіння, параметрично-критеріальна модель, область допустимих параметрів, запас працездатності, аналітичне моделювання

Постановка проблеми. Садіння маточних коренеплодів буряків для отримання насіння є відповідальним технологічним етапом, що визначає рівномірність розміщення рослин, збереження посадкового матеріалу та подальшу продуктивність насінневих посівів. Для реалізації цього процесу застосовуються спеціалізовані садильні машини, робочі органи яких повинні забезпечувати поштучне дозування, стабільне утримання коренеплодів та їх контрольоване укладання у ґрунт без механічних пошкоджень.

У практиці насінництва буряків широко використовуються карусельні садильні апарати, в яких транспортування посадкового матеріалу здійснюється по круговій траєкторії із заданими геометричними та кінематичними параметрами. Особливістю таких машин є наявність взаємопов'язаних конструктивних і режимних характеристик, від узгодженості яких залежить стабільність захвату коренеплодів, відсутність їх зриву з гнізд і характер взаємодії з ґрунтом у момент скидання.

Порушення узгодженості між основними параметрами карусельного апарата призводить до виникнення ударних навантажень, нестабільності руху посадкового матеріалу та зниження якості садіння. Водночас надмірне зниження швидкісних режимів з метою уникнення пошкоджень негативно впливає на продуктивність машин, що створює протиріччя між вимогами до якості процесу та його ефективності.

У зв'язку з цим актуальною є науково-практична задача аналітичного обґрунтування режимів роботи карусельних садильних машин для буряків, яка полягає

у визначенні таких поєднань конструктивних і кінематичних параметрів, за яких процес садіння є фізично можливим, стабільним і керованим. Розв'язання цієї задачі має важливе значення для галузевого машинобудування, оскільки створює передумови для інженерного проектування та вдосконалення карусельних садильних апаратів без надмірної залежності від багаторазових експериментальних налагоджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, присвячені садильним і трансплантаційним машинам, за останні роки характеризуються активним розвитком аналітичних, конструктивних та чисельних підходів до підвищення точності й надійності процесу садіння. Значна кількість робіт зосереджена на вдосконаленні ротаційних і карусельних механізмів, у яких аналізується вплив геометрії гнізд, траєкторій руху робочих органів і форми захватних елементів на стабільність утримання та точність укладання посадкового матеріалу. Показано, що оптимізація геометричних параметрів карусельних механізмів дозволяє зменшити відхилення положення рослин у рядку та підвищити рівномірність садіння [1, 2]. Подібні результати отримано також у дослідженнях, де встановлено залежність між геометрією гнізд і продуктивністю механізмів, однак режими роботи розглядаються як фіксовані і не аналізуються з позицій допустимих меж їх зміни [3, 4].

Паралельно з конструктивними дослідженнями активно розвивається кінематичний і динамічний аналіз садильних апаратів. Отримано аналітичні залежності для швидкостей і прискорень робочих органів, що дозволяє оцінювати інерційні навантаження на посадковий матеріал і визначати граничні режими роботи механізмів [5, 6]. Аналогічні підходи використовуються при дослідженні динамічних характеристик ротаційних механізмів за змінних швидкісних режимів [7, 8]. Разом із тим, у зазначених роботах кінематичні та динамічні залежності подаються у вигляді окремих умов без їх об'єднання в узгоджену систему параметрів, що обмежує можливість комплексної оцінки працездатності машини.

Важливим аспектом сучасних досліджень є визначення фізико-механічних властивостей коренеплодів і посадкового матеріалу, які безпосередньо впливають на допустимі режими роботи садильних машин. Експериментально встановлено граничні значення навантажень, перевищення яких призводить до механічних пошкоджень коренеплодів [9, 10]. Подальші дослідження доповнюють ці результати аналізом варіабельності геометричних і міцнісних характеристик посадкового матеріалу [11, 12]. Проте в більшості випадків отримані дані використовуються як довідкові і не інтегруються у формалізовані інженерні моделі процесу садіння.

Останніми роками зростає кількість публікацій, у яких застосовуються чисельні методи та елементи автоматизованого керування. З використанням DEM- та DEM–MBD-моделювання детально досліджується контактна взаємодія «грунт–коренеплід–машина», що дозволяє аналізувати локальні силові ефекти і прогнозувати пошкодження посадкового матеріалу [13, 14]. Показано можливість підвищення точності садіння шляхом застосування систем синхронізації приводів та алгоритмів інтелектуального керування [15, 16]. Водночас такі підходи залишаються обчислювально складними і потребують значних ресурсів, що ускладнює їх безпосереднє використання на етапі інженерного проектування.

Узагальнення наведених досліджень свідчить, що сучасні підходи до аналізу садильних і трансплантаційних машин зосереджені на окремих конструктивних рішеннях, кінематичних залежностях або властивостях посадкового матеріалу. Отримані результати дозволяють формувати часткові рекомендації щодо вибору параметрів, однак не забезпечують узгодженого аналітичного опису процесу садіння як системи взаємопов'язаних конструктивних і режимних характеристик.

Невирішеною залишається задача аналітичного визначення таких поєднань параметрів карусельної садильної машини, за яких одночасно виконуються умови стабільного захвату, безударного транспортування та контрольованого скидання коренеплодів у ґрунт, що й зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямку.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка параметрично-критеріальної моделі процесу садіння маточних коренеплодів буряків у карусельній машині, яка дозволяє аналітично визначити область допустимих значень конструктивних і режимних параметрів, за яких забезпечуються фізична здійсненність, стабільність і керованість технологічного процесу садіння.

Об'єктом дослідження є процес садіння маточних коренеплодів буряків у карусельній садильній машині, а предметом — взаємозв'язок конструктивних і режимних параметрів, що визначають працездатність технологічного процесу. Дослідження виконано на основі аналітичного моделювання з використанням методів класичної механіки, кінематичного та силового аналізу і параметрично-критеріального підходу. Процес садіння розглянуто як фазово-структурований механічний процес, для якого сформульовано систему фізичних і технологічних обмежень. Аналіз результатів здійснено шляхом аналітичного опрацювання отриманих залежностей, визначення області допустимих параметрів та введення функції запасу працездатності, що забезпечує відтворюваність дослідження.

Виклад основного матеріалу. Процес садіння маточних коренеплодів буряків у карусельній машині розглядається як фазово-структурований механічний процес, що включає послідовні стадії захвату, примусового транспортування по круговій траєкторії та керованого скидання у ґрунт. Кожна з цих фаз характеризується власним набором силових і кінематичних факторів, а працездатність машини в цілому визначається їх сумісною реалізацією в межах одного технологічного циклу. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного аналізу окремих режимів до системного інженерного опису процесу садіння.

У межах прийнятої розрахункової схеми коренеплід масою m рухається разом із гніздом карусельного диска радіуса R , що обертається з кутовою швидкістю ω . Колова швидкість коренеплоду визначається як $v_k = \omega R$, а нормальне (центробіжне) прискорення – як $a_n = \omega^2 R$. На стадії транспортування основним чинником, що забезпечується утримання коренеплоду в гнізді, є нормальна реакція з боку робочої поверхні, яка з урахуванням інерційних і гравітаційних складових може бути подана у вигляді

$$N = m\omega^2 R - mg \cos \varphi, \quad (1)$$

де φ – поточна кутова координата гнізда.

Умова $N > 0$ визначає фізичну можливість контакту і задає нижню межу допустимих швидкісних режимів.

Окрім збереження контакту, необхідно виключити зрив коренеплоду в гнізді під дією інерційних сил. Ця вимога формулюється на основі умови сухого тертя

$$m\omega^2 R \leq \mu N, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт тертя між коренеплодом і поверхнею гнізда.

Разом із умовою $N > 0$ ця нерівність формує верхню межу допустимих значень кутової швидкості для заданого радіуса каруселі. Таким чином, параметри R та ω

виявляються жорстко взаємопов'язаними вже на рівні забезпечення стабільного транспортування.

Для обмеження механічних пошкоджень маточних коренеплодів вводиться динамічний критерій безударного руху

$$\omega^2 R \leq \alpha_{дон}. \quad (3)$$

Він визначає максимально допустиме нормальне прискорення з урахуванням міцності тканин коренеплоду. Даний критерій є принципово важливим саме для насінневих буряків, де механічні пошкодження безпосередньо впливають на схожість і продуктивність.

Контрольоване скидання коренеплоду у ґрунт відбувається у кутовій зоні, де нормальна реакція зникає, тобто за умови $N(\varphi_s) = 0$. Для забезпечення точності укладання і мінімізації ударних навантажень додатково вводиться умова кінематичної узгодженості

$$|\omega R - v_m| \leq \varepsilon, \quad (4)$$

де v_m – поступальна швидкість машини,

ε – допустиме відхилення швидкостей.

Ця умова пов'язує параметри обертального і поступального руху та формує технологічну складову моделі.

З метою узагальнення отриманих залежностей і підвищення інженерної універсальності моделі введено безрозмірні критерії, які відображають основні фізичні механізми процесу садіння.

Перший з них – інерційно-гравітаційний критерій Π_1 – характеризує співвідношення між інерційними силами, зумовленими обертальним рухом каруселі, та силою тяжіння і визначає умови стабільного контакту коренеплоду з гніздом.

$$\Pi_1 = \frac{\omega^2 R}{g}. \quad (5)$$

Другий – тертєвий критерій утримання Π_2 – описує здатність контактної пари «коренеплід–гніздо» протидіяти зриву під дією інерційних навантажень.

$$\Pi_2 = \frac{m\omega^2 R}{\mu N}. \quad (6)$$

Третій – кінематичний критерій узгодженості Π_3 – відображає відносну швидкість коренеплоду у момент скидання і визначає умови безударного укладання посадкового матеріалу у ґрунт.

$$\Pi_3 = \frac{\omega R - v_m}{v_m}. \quad (7)$$

У такому поданні умови працездатності карусельної машини набувають вигляду системи критеріальних обмежень, кожне з яких має чітке фізичне та технологічне обґрунтування:

$$\Pi_1 > \cos \varphi, \quad (8)$$

$$\Pi_2 \leq 1, \quad (9)$$

$$|\Pi_3| \leq \Pi_{3, \text{дон}}, \quad (10)$$

$$\omega^2 R \leq \alpha_{\text{дон}}. \quad (11)$$

Нерівність (8) впливає з умови додатності нормальної реакції і відображає необхідність домінування інерційної складової над проекцією сили тяжіння для забезпечення стабільного контакту коренеплоду з гніздом у процесі транспортування.

Обмеження (9) є безпосереднім наслідком закону сухого тертя і визначає граничний стан, за якого утримувальна здатність контактної пари «коренеплід–гніздо» дорівнює інерційному навантаженню; перевищення цього порогу призводить до зриву коренеплоду.

Умова (10) має технологічний характер і встановлює допустимий рівень кінематичної неузгодженості між обертальним рухом каруселі та поступальним рухом машини, за якого забезпечується безударне укладання посадкового матеріалу у ґрунт.

Додаткове обмеження (11) враховує допустимий рівень динамічних навантажень, обумовлений міцністю тканин маточного коренеплоду, і запобігає їх механічному пошкодженню у процесі транспортування.

Сукупність зазначених умов визначає область допустимих параметрів

$$\Omega = \{R, \omega, v_m : \text{усі вимоги виконуються}\}. \quad (12)$$

Це є аналітичним образом працездатних режимів карусельної машини.

Введена область допустимих параметрів Ω є результатом одночасної дії всіх критеріальних обмежень і, таким чином, має перетинний характер у параметричному просторі (R, ω, v_m) .

Геометрично кожне з обмежень формує власну граничну поверхню, що відокремлює працездатні режими від непрацездатних, тоді як сама область Ω визначається як внутрішня частина простору, обмежена сукупністю цих поверхонь. Такий вигляд області є наслідком того, що порушення будь-якого з критеріїв — стабільності контакту, утримання коренеплоду, допустимого рівня динамічних навантажень або кінематичної узгодженості — призводить до втрати працездатності машини незалежно від виконання інших умов.

З інженерної точки зору форма області Ω відображає компроміс між швидкісними та геометричними параметрами карусельної машини. Збільшення кутової швидкості ω розширює зону стабільного контакту, однак одночасно звужує область допустимих режимів за рахунок обмежень на тертя і допустиме прискорення. Аналогічно, збільшення радіуса R знижує інерційні навантаження при фіксованій швидкості обертання, але впливає на кінематичну узгодженість із поступальним рухом машини. У результаті область Ω набуває обмеженого та асиметричного вигляду, що відображає складний характер взаємодії конструктивних і режимних параметрів у процесі садіння.

Таким чином, область допустимих параметрів Ω не є довільною, а формується виключно фізичними та технологічними закономірностями процесу садіння. Її аналітичне визначення дозволяє не лише встановити межі працездатності карусельної машини, але й створює основу для подальшого інженерного аналізу та оптимізації параметрів у межах гарантовано стабільних режимів роботи.

Для кількісної оцінки надійності конкретних режимів введено функцію запасу працездатності

$$S(R, \omega, v_m) = \min \{S_1, S_2, S_3, S_4\}, \text{ де} \quad (13)$$

$$S_1 = m\omega^2 R - mg \cos \varphi, \quad (14)$$

$$S_2 = \mu N - m\omega^2 R, \quad (15)$$

$$S_3 = \alpha_{\text{дон}} - \omega^2 R, \quad (16)$$

$$S_4 = \varepsilon - |\omega R - v_m|. \quad (17)$$

У складі функції запасу працездатності кожна з величин S_i має самостійне фізичне та інженерне трактування і відповідає окремому механізму можливої втрати працездатності карусельної машини. Зокрема, складова (14) характеризує запас стабільності контакту коренеплоду з гніздом у процесі транспортування. Додатне значення S_1 означає, що інерційна складова нормальної реакції переважає проєкцію сили тяжіння і контакт між коренеплодом та робочою поверхнею зберігається. Зменшення S_1 до нуля відповідає граничному стану втрати контакту, за якого транспортування коренеплоду стає неможливим.

Складова (15) відображає запас утримання коренеплоду в гнізді за умов сухого тертя. Вона показує різницю між максимально можливою утримувальною силою тертя та інерційною силою, що прагне зірвати коренеплід. При $S_2 > 0$ зрив коренеплоду не відбувається, тоді як $S_2 = 0$ визначає граничний режим, за якого контактна пара «коренеплід–гніздо» працює на межі своїх можливостей.

Складова (16) характеризує запас за допустимим рівнем динамічних навантажень і пов'язана з міцністю тканин маточного коренеплоду. Додатне значення S_3 означає, що нормальне прискорення, яке виникає внаслідок обертального руху каруселі, не перевищує допустимих значень. Зменшення S_3 до нуля свідчить про досягнення граничного рівня навантажень, за якого зростає ризик механічного пошкодження посадкового матеріалу.

Складова (17) має технологічний характер і відображає запас кінематичної узгодженості між обертальним рухом каруселі та поступальним рухом машини у момент скидання коренеплоду. Додатне значення S_4 відповідає режимам безударного укладання посадкового матеріалу у ґрунт, тоді як $S_4 = 0$ визначає граничний стан, за якого відносна швидкість контакту досягає максимально допустимого рівня.

Таким чином, кожна складова S_i відповідає окремому фізичному або технологічному механізму порушення процесу садіння, а мінімальне значення серед них визначає загальний запас працездатності режиму роботи карусельної машини. Такий підхід дозволяє не лише ідентифікувати критичний фактор для конкретного режиму, але й цілеспрямовано впливати на параметри машини з метою підвищення надійності та якості процесу садіння.

Додатне значення функції запасу працездатності S відповідає режимам, що знаходяться всередині області допустимих параметрів і характеризуються наявністю запасу за всіма критеріями. Значення $S = 0$ визначає граничні режими, які відповідають межі області допустимих параметрів та характеризують перехід до втрати працездатності за одним із фізичних або технологічних механізмів. Це дозволяє перейти від бінарної оцінки працездатності до кількісного аналізу запасів за кожним критерієм і визначити лімітуючий фактор для конкретного режиму роботи машини.

Отримана інженерно-критеріальна модель створює основу для оптимізаційної постановки задачі.

Продуктивність карусельної машини може бути подана у вигляді

$$Q = kv_m, \quad (18)$$

де k – коефіцієнт, що враховує кількість гнізд та конструктивні параметри машини. Оптимальний режим роботи визначається як розв'язок задачі

$$Q(R, \omega, v_m) \rightarrow \max \text{ за умови } S(R, \omega, v_m) > 0.$$

Це дозволяє поєднати вимоги до високої продуктивності з обмеженнями стабільності та технологічної надійності процесу садіння.

Для узагальнення отриманих аналітичних залежностей та забезпечення однозначної інтерпретації введених критеріїв доцільно встановити їхній зв'язок із фізичними механізмами процесу садіння. Оскільки кожен з критеріїв параметрично-критеріальної моделі відображає окремий аспект взаємодії коренеплоду з робочими органами карусельної машини, систематизація цих відповідностей дозволяє чітко ідентифікувати роль кожного критерію у забезпеченні працездатності процесу. У наведеній нижче таблиці 1 представлено відповідність безрозмірних і розрахункових критеріїв конкретним фізичним явищам та їх технологічному значенню з точки зору стабільності, керованості і надійності процесу садіння маточних коренеплодів буряків.

Таблиця 1 – Відповідність критеріїв фізичним явищам процесу садіння

Критерій	Вираз	Фізичне явище	Технологічне значення
Π_1	$\frac{\omega^2 R}{g}$	Інерційно-гравітаційний баланс	Стабільність контакту
Π_2	$\frac{m\omega^2 R}{\mu N}$	Умови тертя в гнізді	Відсутність зриву
Π_3	$\frac{\omega R - v_m}{v_m}$	Кінематична сумісність	Безударне скидання
$\alpha_{дон}$	$\omega^2 R$	Динамічне навантаження	Збереження коренеплоду
S	$\min S_i$	Запас працездатності	Інженерна надійність

Джерело: розроблено автором

Наведена відповідність критеріїв фізичним явищам дозволяє розглядати параметрично-критеріальну модель як інтегровану систему взаємопов'язаних обмежень, у якій кожен критерій формує окремий напрям контролю працездатності процесу садіння.

Такий підхід забезпечує можливість одночасного врахування силових, кінематичних і технологічних факторів без їх ізольованого аналізу, що є принципово важливим для карусельних садильних машин. У результаті критерії набувають не лише діагностичної, але й проектно-орієнтованої функції, оскільки дозволяють цілеспрямовано оцінювати вплив зміни конструктивних і режимних параметрів на стабільність та надійність процесу садіння.

Висновки. Отримана параметрично-критеріальна модель принципово відрізняється від наявних підходів тим, що дозволяє аналітично враховувати всі ключові фізичні механізми процесу садіння у межах єдиної системи обмежень. На

відміну від моделей, орієнтованих на окремі кінематичні або конструктивні аспекти, запропонований підхід формує чітко визначену область допустимих параметрів, у межах якої процес є фізично здійсненним і технологічно керованим.

Введення функції запасу працездатності дозволяє перейти від формального визначення граничних режимів до інженерного аналізу надійності роботи машини. Це особливо важливо для карусельних садильних апаратів, де незначні відхилення параметрів можуть призводити до різкої втрати якості садіння або пошкодження посадкового матеріалу.

Оптимізаційна постановка задачі демонструє можливість використання моделі не лише для перевірки працездатності, але й для раціонального вибору параметрів, що забезпечують максимальну продуктивність за умови збереження стабільності процесу.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для інженерного проектування, модернізації та раціонального налаштування карусельних садильних машин для насінництва буряків без необхідності багаторазових експериментальних випробувань. Аналітичне визначення області допустимих параметрів і запасу працездатності дозволяє обґрунтовано вибирати конструктивні рішення та режими роботи на етапі проектування.

Перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку пов'язані з розширенням запропонованої параметрично-критеріальної моделі за рахунок урахування стохастичної мінливості геометричних і фізико-механічних властивостей коренеплодів, дослідження впливу профілю гнізда та закону зміни кутової швидкості каруселі, а також інтеграції отриманої аналітичної моделі з чисельними методами та системами автоматизованого керування процесом садіння.

Список літератури

1. Ye B. L., Zeng G. J., Deng B., Yang C. L., Liu J. K., Yu G. H. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13(3). Pp. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20201303.5647>.
2. Wang L., Lin Z., Zhou Z., Yu G., Yang Z., Yu X., Ye B. Design and experiment of a vegetable plug seedling planting mechanism combining non-circular gear system and multi-link. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2025. Vol. 18(3). Pp. 124–134. DOI: [10.25165/ijabe.20251803.9229](https://doi.org/10.25165/ijabe.20251803.9229).
3. Reza M. N., Islam M. N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung S.-O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. 2021. Vol. 9(9). Article 183. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9090183>.
4. Wen Y., Zhang J., Tian J., Duan D., Zhang Y., Tan Y., Yuan T., Li X. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. Article 106017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106017>.
5. Ji J., Chen K., Jin X., Wang Z., Dai B., Fan J., Lin X. High-efficiency modal analysis and deformation prediction of a rice transplanter based on effective independent method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 168. Article 105126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105126>.
6. Ye B. L., Zeng G. J., Deng B., Yang C. L., Liu J. K., Yu G. H. Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13(3). Pp. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20201303.5647>.
7. Sun L., Chen X., Wu C., Zhang G., Xu Y. Synthesis and design of rice pot seedling transplanting mechanism based on labeled graph theory. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017. Vol. 143. Pp. 249–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.021>.
8. Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the impact damage characteristics of transplanting seedlings based on pressure distribution measurement system. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8(11). Article 1080. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111080>.
9. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling soil–plant–machine dynamics using discrete element method: a review. *Agronomy*. 2023. Vol. 13. Article 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>.

10. Kim Y.-S., Lee S.-D., Baek S.-M., Baek S.-Y., Jeon H.-H., Lee J.-H., Siddique M. A. A., Kim Y.-J., Kim W.-S., Yi S., Sim T., Choi Y.-S. Development of DEM–MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 202. Article 107405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107405>.
11. Tian Z., Li Y., Fan J., Yang X. Modeling the mechanical properties of root–substrate composites for transplanting applications. *Agriculture*. 2024. Vol. 14(5). Article 651. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14050651>.
12. Kołodziej P., Stropek Z., Gołacki K. Mechanical properties of sugar beet roots under impact loading conditions. *Materials*. 2023. Vol. 16(3). Article 1281. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16031281>.
13. Nedomová Š., Kumbar V., Pytel R., Buchar J. Mechanical properties of sugar beet root during storage. *International Agrophysics*. 2017. Vol. 31. Pp. 507–513. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0081>.
14. Zhou M., Shan Y. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2020. Vol. 13(4). Pp. 85–92. DOI: <https://doi.org/10.25165/ijabe.20201304.5404>.
15. Sri M., et al. Experimental safety analysis for transplanting device of 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Article 1890. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081890>.
16. Cheng B. Current status and analysis of key technologies in automatic transplanters for vegetables in China. *Agriculture*. 2024. Vol. 14. Article 2168. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122168>.

References

1. B. L. Ye, G. J. Zeng, B. Deng, C. L. Yang, J. K. Liu, and G. H. Yu, «Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 70–78, 2020. doi: 10.25165/ijabe.20201303.5647.
2. L. Wang, Z. Lin, Z. Zhou, G. Yu, Z. Yang, X. Yu, and B. Ye, «Design and experiment of a vegetable plug seedling planting mechanism combining non-circular gear system and multi-link», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 124–134, 2025. doi: 10.25165/ijabe.20251803.9229.
3. M. N. Reza, M. N. Islam, M. Chowdhury, M. Ali, S. Islam, S. Kiraga, S.-J. Lim, I.-S. Choi, and S.-O. Chung, «Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter», *Machines*, vol. 9, no. 9, article 183, 2021. doi: 10.3390/machines9090183.
4. Y. Wen, J. Zhang, J. Tian, D. Duan, Y. Zhang, Y. Tan, T. Yuan, and X. Li, «Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 182, article 106017, 2021. doi: 10.1016/j.compag.2021.106017.
5. J. Ji, K. Chen, X. Jin, Z. Wang, B. Dai, J. Fan, and X. Lin, «High-efficiency modal analysis and deformation prediction of a rice transplanter based on effective independent method», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 168, article 105126, 2020. doi: 10.1016/j.compag.2019.105126.
6. B. L. Ye, G. J. Zeng, B. Deng, C. L. Yang, J. K. Liu, and G. H. Yu, «Design and tests of a rotary plug seedling pick-up mechanism for vegetable automatic transplanter», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 70–78, 2020. doi: 10.25165/ijabe.20201303.5647.
7. L. Sun, X. Chen, C. Wu, G. Zhang, and Y. Xu, «Synthesis and design of rice pot seedling transplanting mechanism based on labeled graph theory», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 143, pp. 249–261, 2017. doi: 10.1016/j.compag.2017.10.021.
8. H. Bai, X. Li, F. Zeng, J. Cui, and Y. Zhang, «Study on the impact damage characteristics of transplanting seedlings based on pressure distribution measurement system», *Horticulturae*, vol. 8, no. 11, article 1080, 2022. doi: 10.3390/horticulturae8111080.
9. A. Walunj, Y. Chen, Y. Tian, and Z. Zeng, «Modeling soil–plant–machine dynamics using discrete element method: a review», *Agronomy*, vol. 13, article 1260, 2023. doi: 10.3390/agronomy13051260.
10. Y.-S. Kim, S.-D. Lee, S.-M. Baek, S.-Y. Baek, H.-H. Jeon, J.-H. Lee, M. A. A. Siddique, Y.-J. Kim, W.-S. Kim, S. Yi, T. Sim, and Y.-S. Choi, «Development of DEM–MBD coupling model for draft force prediction of agricultural tractor with plowing depth», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 202, article 107405, 2022. doi: 10.1016/j.compag.2022.107405.
11. Z. Tian, Y. Li, J. Fan, and X. Yang, «Modeling the mechanical properties of root–substrate composites for transplanting applications», *Agriculture*, vol. 14, no. 5, article 651, 2024. doi: 10.3390/agriculture14050651.
12. P. Kołodziej, Z. Stropek, and K. Gołacki, «Mechanical properties of sugar beet roots under impact loading conditions», *Materials*, vol. 16, no. 3, article 1281, 2023. doi: 10.3390/ma16031281.

13. Š. Nedomová, V. Kumbar, R. Pytel, and J. Buchar, «Mechanical properties of sugar beet root during storage», *International Agrophysics*, vol. 31, pp. 507–513, 2017. doi: 10.1515/intag-2016-0081.
14. M. Zhou and Y. Shan, «Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings», *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 85–92, 2020. doi: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404.
15. M. Sri *et al.*, «Experimental safety analysis for transplanting device of 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter», *Agriculture*, vol. 12, article 1890, 2022. doi: 10.3390/agriculture12081890.
16. B. Cheng, «Current status and analysis of key technologies in automatic transplanters for vegetables in China», *Agriculture*, vol. 14, article 2168, 2024. doi: 10.3390/agriculture14122168.

Oleg Ivanov, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Taras Lapenko**, Assoc. Prof., PhD tech. Sci., **Vladislav Krokmal**
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Parametric–critical Model of the Root Crop Planting Process in a Carousel Machine

Planting of mother sugar beet roots for seed production is a critical technological operation that requires stable machine performance and preservation of planting material integrity. Carousel-type planting machines are commonly used due to their high productivity; however, effective coordination of their constructive and operating parameters remains a complex engineering challenge. Insufficient coordination leads to instability of root holding, mechanical damage, inaccurate placement in soil, and deterioration of planting quality, which determines the relevance of this study.

The purpose of the work is to develop a parametric–critical model of the planting process of mother sugar beet roots in a carousel planting machine that enables analytical determination of admissible constructive and operating parameter ranges ensuring physical feasibility, stability, and controllability of the technological process. The research is theoretical and based on analytical modeling. Methods of classical mechanics, kinematic and force analysis, and a critical approach to assessing process operability are applied. The planting process is considered as a phase-structured mechanical system comprising gripping, forced transportation along a circular trajectory, and controlled release into the soil, each stage being governed by specific physical and technological constraints.

As a result, an integrated parametric–critical model has been developed that combines inertial, gravitational, frictional, kinematic, and technological factors into a unified system of operability conditions. An admissible parameter domain has been analytically defined, representing operating regimes in which stable gripping, non-impact transportation, and controlled placement of roots are simultaneously ensured. A functional measure of operability margin has also been introduced, enabling quantitative evaluation of regime reliability and identification of limiting physical or technological mechanisms.

The scientific novelty of the work lies in the development of an engineering-oriented parametric–critical model that provides an analytical description of the admissible operating domain for a carousel planting machine and introduces a quantitative operability margin for reliability assessment. The practical significance of the results is associated with their application in the design, modernization, and rational adjustment of carousel planting machines for sugar beet seed production without extensive experimental testing. Further research may focus on accounting for variability in root properties, improving working element design, and integrating the model into automated control and optimization systems.

carousel planting machine; mother sugar beet roots; planting process; parametric–critical model; admissible parameter domain; operability margin; analytical modeling

Одержано (Received) 16.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 19.02.2026

Прийнято до друку (Approved) 24.02.2026