

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МОДУЛІВ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

Марія Паньків, к. т. н., Микола Підгурський, к. т. н., Віктор Барановський, д. т. н.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна,

e-mail: baranovskyvm@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.065>

Постановка проблеми. Сучасною ознакою загальної тенденції процесу збирання коренеплодів [2; 18] є масштабне застосування однофазних самохідних бункерних комбайнів, які побудовані за модульною схемою та поєднують послідовні фази збирання (зрізування гички, обрізування залишків гички з головок коренеплодів, викопування коренеплодів, очищення викопаного вороху коренеплодів від домішок, вивантаження коренеплодів) в одну послідовну технологічну операцію, тобто реалізують принцип однофазного збирання коренеплодів.

При цьому, незважаючи на доволі складні багатовузлові модулі транспортно-технологічних систем (МТТС) машин для збирання коренеплодів, робочі органи модуля викопування коренеплодів (МВК) подають із викопаними коренеплодами на наступні робочі органи модуля очищення коренеплодів (МОК) коренезбиральної машини (КМ) значну масову кількість ґрунтових домішок (до 10...15 т з 1 га) [3]. Як наслідок – навіть після очищення енергоємними робочими органами МОК з полів вивозиться кількість родючого ґрунту, яка еквівалентна 10...15 см орного шару на площі збирання, рівній 100 га [19], незважаючи на те, що загальна протяжність (технологічна довжина) очисних поверхонь МОК сягає 8...10 м і більше [15].

Проблема підвищення агротехнологічного рівня однофазних машин для збирання коренеплодів, основними критеріями оцінки яких є показники якості викопування та відокремлення домішок від коренеплодів, залишається особливо актуальною в контексті подальшого вдосконалення коренезбиральної техніки, розвиток і виробництво якої в Україні останніми роками практично припинили [1].

В основу вирішення науково-технічної проблеми підвищення агротехнологічних показників якості роботи КМ у складних умовах збирання покладено гіпотезу значного покращання процесу викопування та очищення викопаного

вороху коренеплодів за рахунок інтенсифікації технологічного процесу відокремлення ґрунтових і рослинних домішок від коренеплодів робочими органами МТТС, які побудовано на основі розроблення та обґрунтування параметрів і загальних конструктивно-технологічних принципів та аспектів їх функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Розроблення наукової концепції та алгоритму побудови МТТС сільськогосподарських машин частково ґрунтується на методах і принципах, які викладено, зокрема, у наукових працях [1; 4; 5; 8; 10; 11; 17]. В основу розробки покладено загальні положення, які характеризують і описують сутність базисних статичних і кінематично-динамічних елементів побудови та функціонування технологічних процесів збирання сільськогосподарських культур, зокрема й коренеплодів – викопування та очищення коренеплодів від домішок, вплив на ці процеси конструкції і параметрів робочих органів МТТС КМ, розмірно-масових характеристик і просторових форм коренеплодів, їх агробіологічних умов розташування в ґрунтово-коренеплідному середовищі тощо.

У праці [6] для ефективного забезпечення збирання коренеплодів розроблено конструктивно-функціональну схему КМ (рис. 1), яку побудовано за блочно-модульним принципом послідовного розташування робочих органів, що утворюють МТТС. Схема складається з послідовно розташованих блоків ТТС: МВК 1, модуля проміжної ланки (МПЛ) 2, МОК 3, модуля завантаження коренеплодів (МЗК) 4. Функціональна схема інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами МТТС передбачає три основні стадії та один завершальний етап очищення викопаного вороху коренеплодів від домішок: стадія інтенсифікації очищення вороху коренеплодів від домішок (відокремлення залишків гички та часткове відокремлення вільних домішок)

у процесі його викопування робочими органами МВК 1; відокремлення дрібних вільних домішок (вільного ґрунту та гички) у процесі їх переміщення з'єднувальною ланкою МПЛ 2, яка розташована між МВК 1 і МОК 3; стадія інтенсифікації процесу

відокремлення домішок від коренеплодів під час його очищення робочими органами МОК; завершальний етап відокремлення вільних домішок під час завантаження коренеплодів робочими органами МЗК 4.

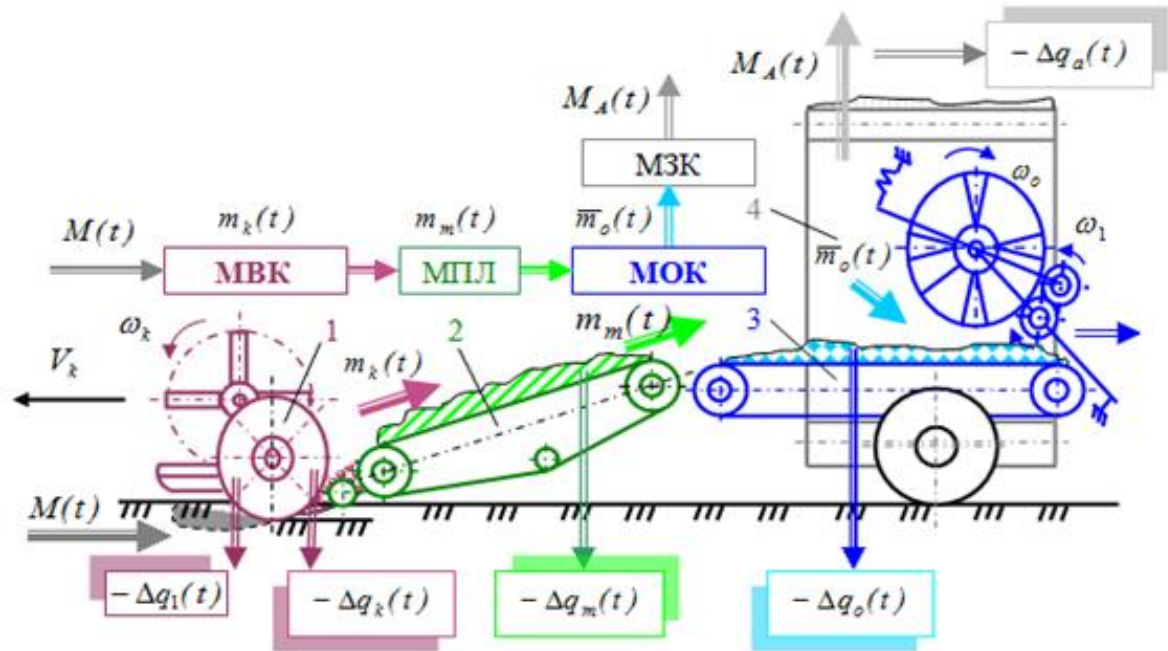


Рис. 1. Конструктивно-функціональна схема коренезбиральної машини:

- 1 – модуль викопування коренеплодів; 2 – модуль проміжної ланки;
- 3 – модуль очищення коренеплодів; 4 – модуль завантаження коренеплодів

Fig. 1. Structural-functional scheme of the root-carving machine:

- 1 – module of excavation of root crops; 2 – intermediate module;
- 3 – module for cleaning root crops; 4 – root loading module

Для розробки детермінованої математичної моделі, яка характеризує динамічну інтенсифікацію процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами МТТС, було змодельовано функціональний процес роботи КМ загалом у вигляді динамічної технічної системи.

На основі застосування теоретичних аспектів зміни потоку технологічної маси вороху коренеплодів під час руху його компонентів впродовж часу t , який описується рівнянням матеріального балансу (див. рис. 1), було отримано лінійні диференціальні рівняння, що характеризують функціональну залежність зміни динамічної інтенсифікації технологічного процесу відокремлення компонентів потоку вороху коренеплодів залежно від конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів МТТС і КМ загалом, ґрунтово-кліматичних умов роботи та агробіологічних характеристик і фізико-механічних властивостей коренеплодів:

$$\begin{aligned}
 & a_1^{(k)} \frac{d[\Delta q_1(t)]}{dt} + a_0^{(k)} \frac{d[\Delta q_k(t)]}{dt} = \\
 & = a_1^{(k)} \frac{d[\Delta q_1(t)]}{dt} + a_{1r}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{1rk}(t)]}{dt} + \\
 & + a_{2r}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{2rk}(t)]}{dt} + a_{3r}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{3rk}(t)]}{dt} + ; \quad (1) \\
 & + a_{1p}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{1pk}(t)]}{dt} + a_{2p}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{2pk}(t)]}{dt} = \\
 & = b_0 M(t - t_k) - c_0^{(k)} m_k(t) \\
 & a_0^{(m)} \frac{d[\Delta q_m(t)]}{dt} = a_{1r}^{(m)} \frac{d[\Delta q_{1rm}(t)]}{dt} + ; \quad (2) \\
 & + a_{1p}^{(m)} \frac{d[\Delta q_{1pm}(t)]}{dt} = b_0^{(m)} m_k(t - t_m) - c_0^{(m)} m_m(t) \\
 & a_0^{(o)} \frac{d[\Delta q_o(t)]}{dt} = a_{1r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{1ro}(t)]}{dt} + \\
 & + a_{2r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{2ro}(t)]}{dt} + a_{3r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{3ro}(t)]}{dt} +
 \end{aligned}$$

$$+a_{1p}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{1po}(t)]}{dt} + a_{2p}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{2po}(t)]}{dt} = ; \quad (3)$$

$$= b_0^{(m)} m_m(t - t_o) - c_0^{(o)} m_o(t)$$

$$a_0^{(a)} \frac{d[\Delta q_a(t)]}{dt} = a_{1r}^{(a)} \frac{d[\Delta q_{1ro}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{1p}^{(a)} \frac{d[\Delta q_{1po}(t)]}{dt} = b_0^{(o)} m_o(t - t_a) - c_0^{(a)} M_A(t) \quad , \quad (4)$$

$$a_1^{(k)} \frac{d[\Delta q_1(t)]}{dt} + a_0^{(m)} \frac{d[\Delta q_M(t)]}{dt} =$$

$$= a_1^{(k)} \frac{d[\Delta q_1(t)]}{dt} + a_{1r}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{1rk}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{2r}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{2rk}(t)]}{dt} + a_{3r}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{3rk}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{1p}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{1pk}(t)]}{dt} + a_{2p}^{(k)} \frac{d[\Delta q_{2pk}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{1r}^{(m)} \frac{d[\Delta q_{1rc}(t)]}{dt} + a_{1p}^{(m)} \frac{d[\Delta q_{1pc}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{1r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{1ro}(t)]}{dt} + a_{2r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{2ro}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{3r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{3ro}(t)]}{dt} + a_{1r}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{1po}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{2p}^{(o)} \frac{d[\Delta q_{2po}(t)]}{dt} + a_{1r}^{(a)} \frac{d[\Delta q_{1ra}(t)]}{dt} +$$

$$+ a_{1p}^{(a)} \frac{d[\Delta q_{1pa}(t)]}{dt} = b_0 M(t - t_k) - c_0^{(k)} m_k(t) +$$

$$+ b_0^{(k)} m_k(t - t_m) - c_0^{(m)} m_m(t) + b_0^{(m)} m_m(t - t_o) -$$

$$- c_0^{(o)} m_o(t) + b_0^{(o)} m_o(t - t_a) - c_0^{(a)} M_A(t) \quad , \quad (5)$$

де $a_1^{(k)}$, $a_0^{(k)}$, $a_0^{(m)}$, $a_0^{(o)}$, $a_0^{(a)}$, b_0 , $b_0^{(k)}$, $b_0^{(m)}$, $b_0^{(o)}$, $c_0^{(k)}$, $c_0^{(m)}$, $c_0^{(o)}$, $c_0^{(a)}$; $a_{1r}^{(k)}$, $a_{2r}^{(k)}$, $a_{3r}^{(k)}$, $a_{1p}^{(k)}$, $a_{2p}^{(k)}$; $a_{1r}^{(m)}$, $a_{1r}^{(o)}$, $a_{2r}^{(o)}$, $a_{3r}^{(o)}$, $a_{1p}^{(o)}$, $a_{2p}^{(o)}$; $a_{1r}^{(a)}$, $a_{1p}^{(a)}$ – змінні коефіцієнти функцій параметрів робочих органів КМ: МВК, МПЛ, МОК, МЗК, фізико-механічних властивостей ґрунту, урожайності коренеплодів тощо, які визначаються експериментально; $m_k(t)$, $m_m(t)$, $m_o(t)$, $M(t)$ – вхідна маса потоку вороху коренеплодів, яка пов'язана з часом t і шириною захвату МВК, кг; $M_A(t)$ – вихідна кількість потоку компонентів вороху коренеплодів з МВК, МПЛ, МОК, МЗК, кг; $\Delta q_k(t)$, $\Delta q_m(t)$, $\Delta q_o(t)$, $\Delta q_a(t)$ – відокремлена кількість потоку домішок вороху коренеплодів робочими органами

МВК, МПЛ, МОК, МЗК; $\Delta q_1(t)$ – кількість втраченого потоку коренеплодів робочими органами МВК; Δq_{1rk} , Δq_{2rk} , Δq_{3rk} , Δq_{1pk} , Δq_{2pk} ; Δq_{1ro} , Δq_{2ro} , Δq_{3ro} , Δq_{1po} , Δq_{2po} – відокремлена маса вільного ґрунту, грудок ґрунту, налиплого ґрунту на підземній частині коренеплодів, вільних рослинних домішок, залишків гички на головках коренеплодів від вороху коренеплодів: МВК; МОК; Δq_{1ra} , Δq_{1pa} – відокремлена маса вільного ґрунту, вільних рослинних домішок від вороху коренеплодів МПЛ; Δq_{1ra} , Δq_{1pa} – відокремлена кількість вільного ґрунту, вільних рослинних домішок від вороху коренеплодів МЗК; t_k , t_m , t_o , t_a – час запізнення руху мас вороху коренеплодів у процесі роботи, яке відбувається за рахунок накопичення, ущільнення, зсуву тощо технологічних мас у робочій зоні відповідно кожного МТТС та КМ загалом, с.

Аналіз наукових досліджень показав, що, незважаючи на відомі методи та принципи побудови КМ, є певні обмеження щодо їх застосування для обґрунтування та оптимізації основних параметрів робочих органів і підвищення технологічної ефективності процесу очищення вороху коренеплодів від домішок у важких умовах збирання та розробки конструктивно-технологічних схем МТТС КМ, що й зумовило проведення даних досліджень.

Постановка завдання. На основі проведеного аналізу технологічних процесів роботи викопувальних і очисних робочих органів можна констатувати, що ідентифікація процесу розробки КМ повинна ґрунтуватися на застосуванні удосконалених МТТС, що дасть змогу суттєво підвищити показники якості роботи внаслідок значного зменшення подачі вільних ґрунтових і рослинних домішок, особливо грудок ґрунту та зв'язаних ґрунтових і рослинних домішок, зокрема залишків гички на головках коренеплодів, налиплого ґрунту на бічній поверхні тіла викопаних коренеплодів, за рахунок додаткової інтенсифікації дії на ворох базових структурних елементів (робочих органів) МВК та МОК.

У цьому разі оптимізацію конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів МТТС КМ необхідно реалізовувати на основі комплексного рішення, яке передбачає інтегрований підхід до алгоритму розробки та дослідження процесів, спрямованих на значне зменшення подачі домішок під час викопування коренеплодів

копачами й підвищення інтенсивності відокремлення їх від коренеплодів під час очищення вороху очисниками.

Складність очищення вороху коренеплодів, який викопується робочими органами МВК із ґрунтово-коренеплідного середовища, функціонально пов'язана з необхідністю значного відокремлення різних за своїми фізико-механічними властивостями ґрунтових і рослинних домішок (4...8 кг/м), які перебувають відносно коренеплодів у вільному (сипкий ґрунт, дрібні (20...50 мм) і крупні (до 100 мм) грудки ґрунту, втрачена під час збирання основного масиву гички робочими органами гичкозбиральної машини гичка, бур'яни) та зв'язаному (налиплий ґрунт на бічній поверхні тіла і залишки гички на головках коренеплодів) станах [16; 18].

Тому розробку та вдосконалення конструктивно-компонувальних схем КМ і обґрунтування параметрів їх робочих органів необхідно проводити з урахуванням специфічних властивостей цього середовища, що є особливо важливим і актуальним для очисників вороху, на які над-

ходить значна кількість домішок (ґрунту – до 80...90 %, у тому числі налиплого ґрунту – до 3...5 %; рослинних домішок – до 10...15 %; залишків гички на головках коренеплодів – 5...10 % відносно сумарних домішок, які становлять 30...40 % залежно від умов роботи КМ [14] і які необхідно відокремити від коренеплодів, забезпечивши при цьому необхідні показники якості роботи згідно з агротехнічними вимогами.

Частково розв'язання цієї задачі було реалізовано у праці [6]. Отримані лінеаризовані диференціальні рівняння (1)–(5) є детермінованими математичними моделями, які характеризують зміну процесу інтенсифікації відокремлення структурних компонентів різноструктурованих домішок від коренеплодів залежно від технологічної подачі викопаного вороху коренеплодів і умов роботи КМ.

Подальший розв'язок математичних моделей (1)–(5) може бути проведено зі застосуванням прямого та зворотного перетворення Лапласа [9; 20].

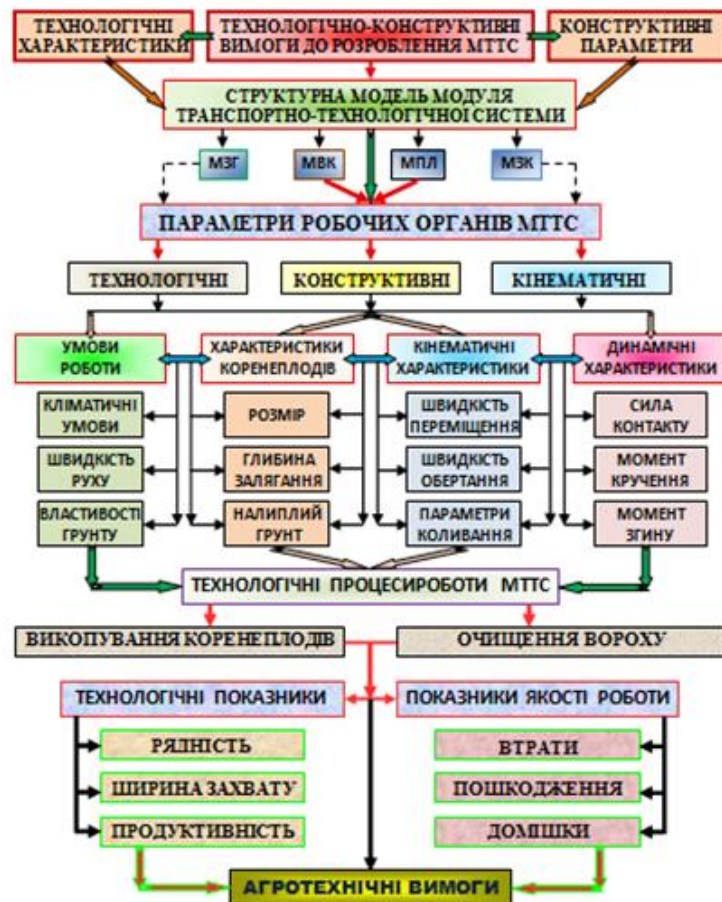


Рис. 2. Алгоритм розробки модуля транспортно-технологічної системи коренезбиральної машини
Fig. 2. Algorithm for the development of modules of transport and technological systems of root-harvesting machines

Характерною ознакою розвитку сучасних КМ є розробка й дослідження удосконалених МТТС, впровадження яких дасть змогу певною мірою вирішити актуальну науково-технічну проблему збирання коренеплодів за задовільних показників якості їх роботи.

Розробка алгоритму побудови КМ повинна ґрунтуватися на застосуванні конструктивної схеми основних МТТС, які являють собою моноблочні МВК і МОК (рис. 2), при цьому принципи функціонування їхніх робочих органів повинні бути регламентовані основними властивостями процесу збирання коренеплодів, конструктивними характеристиками і конструктивно-технологічними аспектами процесу розробки (їх призначення, конструктивне виконання, спосіб застосування, агротехнічні й екологічні вимоги тощо).

Мета дослідження – подальший розвиток методів і методології розробки та оптимізації параметрів МТТС КМ.

Це забезпечить реалізацію наукових підходів до розробки технологічних процесів функціонування робочих органів МТТС і КМ загалом.

Виклад основного матеріалу. У багатьох задачах математичного аналізу розглядаються випадки, в яких кожна точка одного простору динамічної системи ставиться у відповідність деякій точці іншого (або того ж самого) простору. Відповідність між двома точками, які належать динамічній системі, встановлюють за допомогою перетворення або деякого оператора [12].

Тому розв’язування задачі структурної ідентифікації динамічної системи проведемо методом теорії систем автоматичного керування, яка найбільш придатна для дослідження керованих МТТС, які утворюють керовану динамічну систему КМ загалом, у режимі практичного застосування або в режимі експлуатації об’єкта з наявною дією випадкових процесів і факторів.

Для розв’язування лінійних диференціальних рівнянь (1)–(5) застосуємо метод, який ґрунтується на перетворенні функцій дійсної змінної у функції комплексної змінної. Цей метод дає можливість замінити лінійні диференціальні рівняння (1)–(5) на алгебричні [9; 20]. Для реалізації процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами КМ побудуємо формалізовану структурно-функціональну модель послідовного з’єднання основних структурних елементарних ланок МТТС КМ (рис. 3).

При цьому необхідно акцентувати, що ступінь інтенсифікації відокремлення компонентів домішок від коренеплодів у загальному контексті залежить від певної вагової об’ємної ємності та часу перебування компонентів вороху коренеплодів (компонентів домішок і коренеплодів) на робочих поверхнях кожного МТТС і КМ загалом [13].

Враховуючи послідовний спосіб з’єднання структурних ланок (див. рис. 3), еквівалентну передавальну функцію кожного МТТС і КМ загалом під час інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів згідно з [9; 20] можна записати у вигляді добутку Д аналітичних передавальних функцій відповідних ланок МТТС КМ, які утворюють динамічну систему: МВК, МПЛ, МОК і МЗК, що утворюють це послідовне з’єднання ланок динамічної системи, тобто

$$W_M^n(s) = \prod_{i=1}^n W_i^n(s);$$

$$W_i^n(s) = \frac{m_{\text{aux},i}(s)}{m_{\text{ex},i}(s)} = \frac{1}{T_i s + 1}, \quad (6)$$

де $m_{\text{aux},i}(s)$, $m_{\text{ex},i}(s)$ – зображення за Лапласом вихідного та вхідного потоку вороху коренеплодів відповідного МТТС КМ; T_i – стала часу відповідного МТТС КМ.

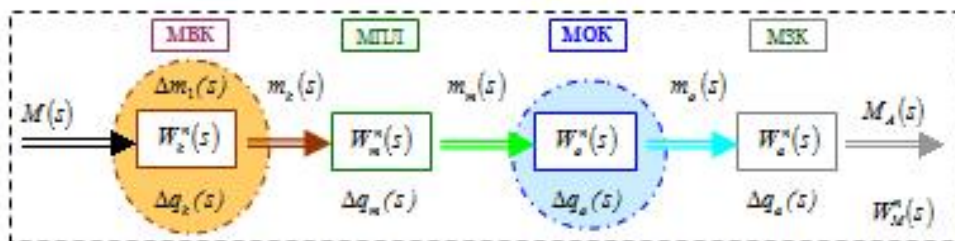


Рис. 3. Структурна модель послідовного з’єднання елементарних ланок модулів транспортно-технологічних систем коренезбиральної машини

Fig. 3. Structural model of the serial connection of the elementary links of the modules of transport and technological systems of root-harvesting machines

У нашому випадку стала часу T_i є адекватна часу перебування вороху коренеплодів на робочих поверхнях або часу перебування в певній ваговій ємності кожного МТТС КМ. Певна вагова ємність кожного МТТС КМ буде характеризуватися певною кількістю оброблювального вороху коренеплодів або адекватною ваговою пропускною здатністю P_i .

Тоді час перебування складових компонентів вороху коренеплодів (коренеплодів, вільних і зв'язаних ґрунтових і рослинних домішок) на робочих поверхнях кожного МТТС КМ, або стала часу T_i , можна визначити як відношення пропускної здатності P_i до кількості оброблюваного вхідного потоку вороху коренеплодів $m_{ex,i}(t)$.

Час перебування складових компонентів вороху коренеплодів (коренеплодів, вільних і зв'язаних ґрунтових і рослинних домішок) на робочих поверхнях кожного МТТС КМ, або стала часу T_i , з врахуванням (1) – (4) визначається так:

$$\left. \begin{aligned} T_k &= \frac{P_k}{M(t)} = \frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)}; \\ T_m &= \frac{P_m}{m_k(t)} = \frac{P_m}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)}; \\ T_o &= \frac{P_o}{m_m(t)} = \frac{P_o}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t)}; \\ T_a &= \frac{P_a}{m_o(t)} = \frac{P_a}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t)} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де T_k, T_m, T_o, T_a – час перебування вороху коренеплодів на робочих поверхнях МВК, МПЛ, МОК, МЗК, або стала часу, с; P_k, P_m, P_o, P_a – вагова ємність МВК, МПЛ, МОК, МЗК, кг·с; m_1, m_2 – вхідна маса коренеплодів і домішок, які викопуються робочими органами МВК, кг;

Аналогічно (7) стала часу T_i КМ загалом можна визначати за формулою

$$T_M = \frac{P_M}{M(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{M(t)} = \frac{P_k + P_m + P_o + P_a}{m_1(t) + m_2(t)}. \quad (8)$$

Підставивши значення часу перебування вороху коренеплодів на робочих поверхнях МВК, МПЛ, МОК і МЗК, або сталої часу T_i кожної ТТС, у кожен тотожність (7), одержимо рівняння передавальної функції відповідного МТТС і КМ загалом, яку записано в операторній формі:

$$\begin{aligned} & \text{– для КМ загалом} \\ W_M^n(s) &= [W_k^n(s)] \cdot [W_m^n(s)] \cdot [W_o^n(s)] \cdot [W_a^n(s)] = \\ &= \left[\frac{m_k(s)}{M(s)} \right] \cdot \left[\frac{m_m(s)}{m_k(s)} \right] \cdot \left[\frac{m_o(s)}{m_m(s)} \right] \cdot \left[\frac{M_A(s)}{m_o(s)} \right] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left[\frac{1}{T_k s + 1} \right] \cdot \left[\frac{1}{T_m s + 1} \right] \cdot \left[\frac{1}{T_o s + 1} \right] \cdot \left[\frac{1}{T_a s + 1} \right] = \\ &= \left[\left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)} \right) s + 1 \right]^{-1} \times \end{aligned} \quad ; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &\times \left[\left(\frac{P_m}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)} \right) s + 1 \right]^{-1} \times \\ &\times \left[\left(\frac{P_o}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t)} \right) s + 1 \right]^{-1} \times \\ &\times \left[\left(\frac{P_a}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t)} \right) s + 1 \right]^{-1} \end{aligned}$$

– для кожного МТТС

$$\left. \begin{aligned} W_k^n(s) &= \frac{m_k(s)}{M(s)} = \frac{1}{T_k s + 1} = \left[\left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)} \right) s + 1 \right]^{-1}; \\ W_m^n(s) &= \frac{m_m(s)}{m_k(s)} = \frac{1}{T_m s + 1} = \\ &= \left[\left(\frac{P_m}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)} \right) s + 1 \right]^{-1}; \\ W_o^n(s) &= \frac{m_o(s)}{m_m(s)} = \frac{1}{T_o s + 1} = \\ &= \left[\left(\frac{P_o}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t)} \right) s + 1 \right]^{-1}; \\ W_a^n(s) &= \frac{M_A(s)}{m_o(s)} = \frac{1}{T_a s + 1} = \\ &= \left[\left(\frac{P_a}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t)} \right) s + 1 \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

або в загальному спрощеному вигляді

$$\begin{aligned} W_M^n(s) &= \prod_{i=1}^n \left[\frac{m_{ex,i}(s)}{m_{ex,i}(s)} \right] = \\ &= \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i s + 1} \right) = \prod_{i=1}^n \left[\left(\frac{P_i}{m_{ex,i}(t)} s + 1 \right) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Якщо формалізувати функціональний процес інтенсифікації відокремлення домішок вороху коренеплодів КМ (див. рис. 3) у вигляді однієї сумарної ланки, то рівняння передавальної функції в операторній формі матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} W_M^n(s) &= \left[\frac{\bar{M}_A(s)}{\bar{M}(s)} \right] = \frac{1}{T_M s + 1} = \\ &= \left[\left(\frac{P_k + P_m + P_o + P_a}{m_1(t) + m_2(t)} \right) s + 1 \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Тоді диференціальне рівняння структурно-функціональної моделі елементарної ланки МВК в операторній формі згідно з (5) матиме такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m_k(s) \cdot \left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)} s + 1 \right) = \\ = m_k(s) \cdot \left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)} \right) s + m_k(s) = \hat{M}(s) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Відповідно для елементарної ланки МПЛ згідно з (9)

$$\left\{ \begin{aligned} m_m(s) \cdot \left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)} s + \right. \\ \left. + m_m(s) = m_k(s); \end{aligned} \right. \quad (14)$$

а для елементарної ланки МОК згідно з (9)

$$\left. \begin{aligned} m_o(s) \cdot \left(\frac{P_o}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t)} s + \right. \\ \left. + m_o(s) = \bar{m}_m(s). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Відповідно для елементарної ланки МЗК згідно з (9)

$$\left. \begin{aligned} M_A(s) \cdot \left(\frac{P_a}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t)} s + \right. \\ \left. + M_A(s) = m_o(s) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Для структурних ланок КМ у цілому згідно з (9), (11) маємо

$$\begin{aligned} \prod_{i=1}^n \bar{m}_{aux.i}(s) \cdot \prod_{i=1}^n \left[\left(\frac{P_i}{m_{ex.i}(t)} \right) s + \right] + \\ + \prod_{i=1}^n [m_{aux.i}(s)] = \prod_{i=1}^n \bar{m}_{ex.i}(s) \end{aligned} \quad (17)$$

або згідно з рівнянням (12) у формалізованому загальному вигляді

$$M_A(s) \left(\frac{P_k + P_m + P_o + P_a}{m_1(t) + m_2(t)} s + M_A(s) \right) = M(s). \quad (18)$$

Тоді диференціальні рівняння (13) – (16), які описують інтенсивність технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів кожним МТТС КМ з транспортним запізненням, у класичній (часовій) формі згідно з рівняннями (10) матимуть такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)} \right) \frac{d[m_k(t)]}{dt} = M(t - t_k) - m_k(t); \\ \left(\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)} \right) \frac{d[m_m(t)]}{dt} = \\ = m_k(t - t_m) - m_m(t); \\ \left(\frac{P_o}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t)} \right) \times \\ \times \frac{d[m_o(t)]}{dt} = m_m(t - t_o) - m_o(t) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

– для МЗК та КМ загалом згідно із залежностями (10) і (11)

$$\left(\frac{P_a}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t)} \right) \times \frac{d[M_A(t)]}{dt} = m_o(t - t_a) - M_A(t) \quad (20)$$

$$\prod_{i=1}^n \left[\left(\frac{P_i}{m_{ex.i}(t)} \right) \right] \frac{d \left[\prod_{i=1}^n m_{aux.i}(t) \right]}{dt} = ; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} = \prod_{i=1}^n m_{ex.i} \left(t - \sum_{i=1}^n t_i \right) - \prod_{i=1}^n m_{aux.i}(t) \\ \left(\frac{P_k + P_m + P_o + P_a}{m_1(t) + m_2(t)} \right) \frac{d[M_A(t)]}{dt} = \\ = M(t - t_M) - M_A(t) \end{aligned} \quad (22)$$

Крім того, формалізований технологічний процес роботи КМ передбачає вузол розгалуження структурних ланок МТТС на окремі елементарні ланки загальних ґрунтових і рослинних домішок, які, своєю чергою, розгалужуються на структурні підланки вільного та налиплого ґрунту, грудок ґрунту; вільних рослинних домішок і залишків гички на головках коренеплодів. У процесі інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами МВК відбувається руйнування грудок ґрунту та відокремлення налиплого ґрунту з поверхні тіла і залишків гички з головок коренеплодів, а робочими органами МОК – руйнування грудок ґрунту, які перетворюються на вільні ґрунтові та рослинні домішки, тобто існує вірогідність збільшення кількості вхідного потоку вільних домішок, або, з погляду структури керованих динамічних систем, відбувається підсилення вхідної структурної елементарної ланки МВК і МОК або існує наявність додатного зворотного зв'язку однієї структурної підланки відносно іншої, тобто одна елементарна підланка охоплюється у вигляді зворотного зв'язку другою елементарною підланкою.

На основі цього побудовано формалізовану структурно-функціональну модель процесу інтенсифікації відокремлення домішок від вороху коренеплодів робочими органами КМ (рис. 4).

Ступінь інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів залежить не тільки від певної вагової ємності P_i кожного МТТС та часу T_i перебування вороху коренеплодів на їх робочих поверхнях, але також і значною мірою від коефіцієнта, який враховує ступінь зменшення вихідного потоку технологічної маси вороху відносно його вхідного потоку.

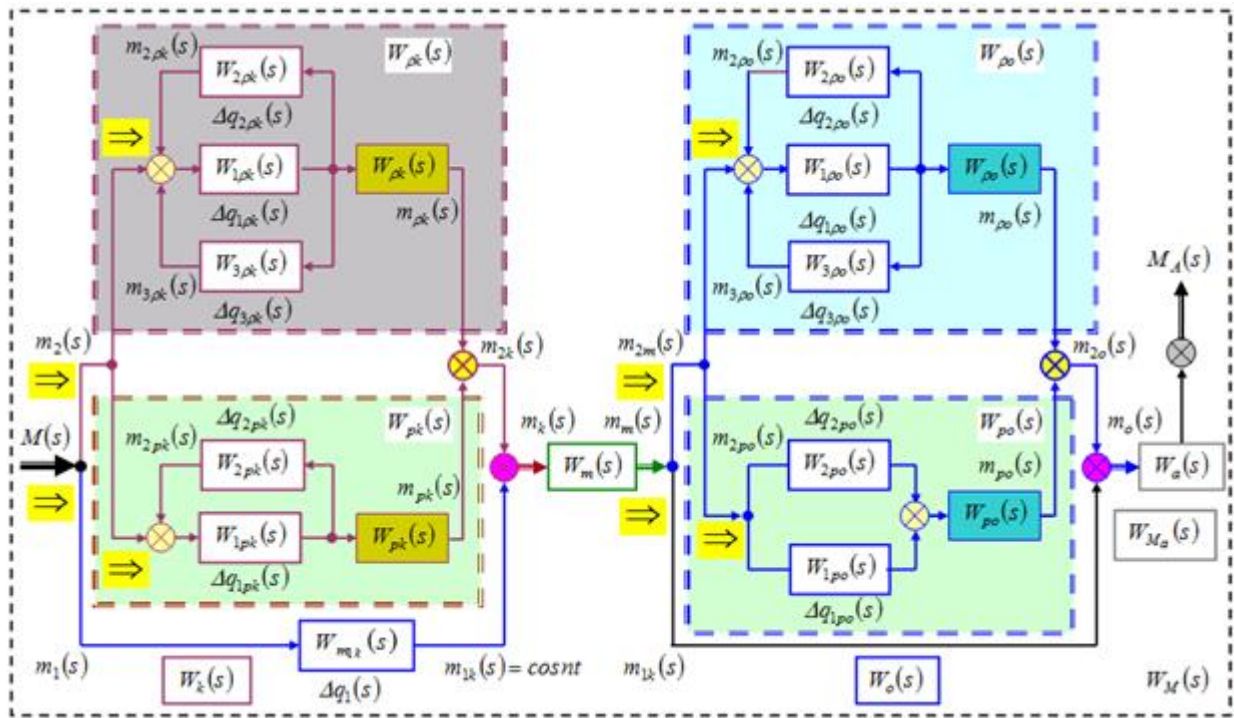


Рис. 4. Структурно-функціональна модель процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин
Fig. 4. Structural and functional model of the process of intensification of the separation of impurities from root crops by the working bodies of transport and technological systems of root-harvesting machines

Коефіцієнт, який враховує ступінь зменшення вихідного потоку технологічної маси вороху коренеплодів відносно його вхідного потоку кожного МТТС і КМ загалом з погляду керованих динамічних систем є коефіцієнтом підсилення, який охарактеризуємо як коефіцієнт технологічної ефективності роботи кожного МТТС і КМ загалом та позначимо через співвідношення $K_i = m_{\text{вих},i}(t)/m_{\text{вх},i}(t)$ [7; 15].

Тоді коефіцієнт технологічної ефективності роботи кожного МТТС з урахуванням (6) – (9) визначиться за формулою

$$\left. \begin{aligned}
 K_k &= \frac{m_k(t)}{M(t)} = \frac{M(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)}{M(t)} = \\
 &= 1 - \frac{\Delta q_1(t) + \Delta q_k(t)}{M(t)}; \\
 K_m &= \frac{m_m(t)}{m_k(t)} = \frac{m_k(t) - \Delta q_m(t)}{m_k(t)} = \\
 &= 1 - \frac{\Delta q_m(t)}{m_k(t)};
 \end{aligned} \right\} (23)$$

де K_k , K_m , K_o , K_a – коефіцієнт технологічної ефективності роботи МВК, МПЛ, МОК і МЗК.

Аналогічно (16) коефіцієнт технологічної ефективності роботи КМ для КМ загалом визначається відношенням

$$\begin{aligned}
 K_M &= \frac{[M_A(t)]}{[M(t)]} = \frac{[M(t)] - [\Delta q_1(t)] - [\Delta q_k(t)]}{[M(t)]} = \\
 &= \frac{[\Delta q_m(t)] - [\Delta q_o(t)] - [\Delta q_a(t)]}{[M(t)]} = \\
 &= 1 - \frac{[\Delta q_1(t)] + [\Delta q_k(t)] + [\Delta q_m(t)]}{[M(t)]} + \\
 &+ \frac{[\Delta q_o(t)] + [\Delta q_a(t)]}{[M(t)]}
 \end{aligned} \quad (24)$$

Для подальшого аналізу технологічного процесу інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів необхідно акцентувати таке:

– враховуючи динамічні процеси (характеристики та властивості) керованої динамічної системи – наявність рухомих мас, або інерційність процесу переміщення потоків вороху коренеплодів (коренеплодів, ґрунтових і рослинних домішок) по робочих органах МТТС КМ, їх ланки, які розгалужуються на паралельні підланки у напрямку розгалуження (поділу) $\Rightarrow, \mathbf{K} \Leftarrow$ (див.

рис. 4), представимо у вигляді аперіодичної ланки 1-го порядку (інерційної ланки), яку позначимо через $W_i^p(s)$, при цьому передавальна функція ланки (підланки) визначається за формулою

$$W_i^p(s) = \frac{m_{\text{вх},i}^p(s)}{m_{\text{вх},i}^p(s)} = \frac{K_i}{T_i s + 1}; \quad (25)$$

– враховуючи наявність розгалуження ланок, або паралельного з'єднання структурних підланок, їх передавальна функція визначається як сума передавальних функцій підланок, що утворюють це з'єднання, тобто

$$W_i(s) = \sum_{i=1}^z W_i^p(s); \quad i = 1, 2, \dots, z; \quad (26)$$

– враховуючи наявність додатного зворотного зв'язку (у ланці $W_{rk}(s)$ підланка $W_{1rk}(s)$ охоплюється у вигляді зворотного зв'язку підланками $W_{2rk}(s)$ і $W_{3rk}(s)$, у ланці $W_{pk}(s)$ підланка $W_{1rk}(s)$ – підланкою $W_{2pk}(s)$, у ланці $W_{ro}(s)$ підланка $W_{1ro}(s)$ – підланками $W_{2ro}(s)$ і $W_{3ro}(s)$), їх передавальна функція визначається за формулою

$$W_{iz}(s) = \frac{W_{i1}(s)}{1 + W_{i1}(s) \cdot W_{i2}(s)}; \quad (27)$$

– враховуючи запізнення руху технологічних мас у часі τ_i , передавальну функцію в операторній формі з трансформування технологічних потоків $m_i(t)$ кожного МТТС і КМ загалом, яку позначимо через $W_i(s)$ під час інтенсифікації процесу відокремлення домішок від ВК, можна представити у вигляді добутку аналітичної передавальної функції аперіодичної ланки першого порядку (18) та аналітичної передавальної функції ланки з транспортним запізненням, яку позначимо через $W_{\text{зан},i}(s) = e^{-st}$, тобто

$$W_i(s) = \frac{m_{\text{вх},i}(s)}{m_{\text{вх},i}(s)} = W_i^p(s) \cdot W_{\text{зан},i}(s) = \frac{K_i}{T_i s + 1} e^{-st_i} \quad (28)$$

Підставивши значення коефіцієнта технологічної ефективності роботи K_i (16), (17) і сталої часу T_i (13), (14) кожного МТТС і КМ загалом і враховуючи тотожність (21), одержимо рівняння передавальної функції $W_i(s)$ та диференціальне рівняння з транспортним запізненням кожного структурного елемента динамічної системи, або кожного МТТС та КМ загалом в операторній формі:

– для структурної транспортної ланки МВК

$$W_k(s) = \frac{m_k(s)}{M(s)} = \frac{W_{1rk}(s) \cdot W_{3rk}(s)}{1 + W_{1rk}(s) \cdot [W_{2rk}(s) + 1]} + \frac{W_{1pk}(s)}{1 + W_{1pk}(s) \cdot W_{2pk}(s)} + W_{m_k}(s) = \frac{K_k}{T_k s + 1} e^{-st_k} \quad (29)$$

або

$$m_k(s) \left[\frac{P_k}{m_1(t) + m_2(t)} s + 1 \right] = M(s) \cdot \left[1 - \frac{\Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)}{M(t)} \right] e^{-st_k}; \quad (30)$$

– для структурної транспортної ланки МПЛ

$$W_m(s) = \frac{m_m(s)}{m_k(s)} = W_{rm}(s) + W_{pm}(s) + W_{lmk}(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-st_m} \quad (31)$$

або

$$m_m(s) \left[\frac{P_m}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)} s + 1 \right] = m_k(s) \cdot \left[1 - \frac{\Delta q_m(t)}{m_k(t)} \right] e^{-st_m}; \quad (32)$$

– для структурної транспортної ланки МОК

$$W_o(s) = \frac{m_o(s)}{m_m(s)} = \frac{W_{1ro}(s) \cdot W_{3ro}(s)}{1 + W_{1ro}(s) \cdot [W_{2ro}(s) + 1]} + W_{1po}(s) + W_{2po}(s) + W_{m_k}(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-st_o} \quad (33)$$

або

$$m_o(s) \left[\frac{P_o}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t)} s + 1 \right] = \bar{m}_m(s) \cdot \left[1 - \frac{\Delta q_o(t)}{m_m(t)} \right] e^{-st_o}; \quad (34)$$

– для структурної транспортної ланки МЗК

$$W_a(s) = \frac{M_A(s)}{m_o(s)} = W_{ra}(s) + W_{pa}(s) + W_{lmk}(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} e^{-st_a} \quad (35)$$

або

$$M_A(s) \left[\frac{P_a}{m_1(t) + m_2(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t)} s + 1 \right] = ; (36)$$

$$= m_o(s) \cdot \left[1 - \frac{-\Delta q_a(t)}{m_o(t)} \right] e^{-st_a}$$

– для транспортної ланки КМ загалом з урахуванням того, що згідно з [9; 20]

$$W_i^p(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s) \text{ маємо}$$

$$W_M(s) = \frac{M_A(s)}{M(s)} = W_k(s) \cdot W_m(s) \cdot W_o(s) \cdot W_a(s) =$$

$$= \left[\frac{W_{1rk}(s) \cdot W_{3rk}(s)}{1 + W_{1rk}(s) \cdot [W_{2rk}(s) + 1]} + \frac{W_{1pk}(s)}{1 + W_{1pk}(s) \cdot W_{2pk}(s)} + \right] \times$$

$$\left[\frac{W_{1ro}(s) \cdot W_{3ro}(s)}{1 + W_{1ro}(s) \cdot [W_{2ro}(s) + 1]} + \right] \times$$

$$\left[\frac{W_{1po}(s) + W_{2po}(s) + W_{m_k}(s)}{1 + W_{1po}(s) + W_{2po}(s) + W_{m_k}(s)} \right] \times$$

$$\left[\frac{W_{ra}(s) + W_{pa}(s) + W_{m_k}(s)}{T_M s + 1} \right] = \frac{K_M}{T_M s + 1} e^{-st_M}$$

або

$$M_A(s) \left[\frac{P_k + P_m + P_o + P_a}{m_1(t) + m_2(t)} s + 1 \right] = ; (38)$$

$$= M(s) \cdot \left[1 - \frac{\Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \Delta q_m(t) - \Delta q_o(t) - \Delta q_a(t)}{M(t)} \right] e^{-st_M}$$

Одержані рівняння передавальної функції (22)–(31) свідчать про те, що робочі органи МТТС КМ можна ідентифікувати як послідовне з'єднання аперіодичних ланок першого порядку та ланок із запізненням руху технологічних мас.

Комплексна оцінка параметрів МТТС і КМ загалом: відповідних їм коефіцієнта технологічної ефективності K_i , сталої часу T_i та часу запізнення τ_i руху потоків технологічних мас – дає змогу глибше та детальніше аналізувати технологічний процес інтенсифікації відокремлення домішок від коренеплодів і оптимізацію конструктивно-кінематичних параметрів і режимів роботи робочих органів МТТС і КМ загалом.

Тоді диференціальні рівняння (23), (25), (27), (29) і (31), які описують інтенсифікацію технологічного процесу відокремлення домішок від коренеплодів МТТС і КМ загалом із транспортним запізненням, у класичній (часовій) формі матимуть такий вигляд:

– для МВК, МПЛ, МОК і МЗК

$$\left. \begin{aligned} P_k \frac{d[m_k(t)]}{dt} &= M(t) \cdot [M(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t)] e^{-st_k} - \\ &- m_k(t); \\ P_m \frac{d[m_m(t)]}{dt} &= m_k(t) \cdot [m_k(t) - \Delta q_m(t)] e^{-st_m} - m_m(t); \end{aligned} \right\}; (39)$$

$$\left\{ \begin{aligned} P_o \frac{d[m_o(t)]}{dt} &= m_m(t) \cdot [m_m(t) - \Delta q_o(t)] e^{-st_o} - m_o(t); \\ P_a \frac{d[m_a(t)]}{dt} &= m_o(t) \cdot [m_o(t) - \Delta q_a(t)] e^{-st_a} - m_a(t); \end{aligned} \right. ; (40)$$

– для КМ загалом

$$(P_k + P_m + P_o + P_a) \frac{d[M_A(t)]}{dt} =$$

$$= M(t) \left[\begin{aligned} &M(t) - \Delta q_1(t) - \Delta q_k(t) - \\ &-\Delta q_m(t) - \Delta q_o(t) - \Delta q_a(t) \end{aligned} \right] e^{-st_M} - M(t) ; (41)$$

або

$$P_M \frac{d[M_A(t)]}{dt} = M(t) \cdot [M_A(t) \cdot e^{-st_M} - 1] ; (42)$$

Отримані диференціальні рівняння (3) – (35) є детермінованими математичними моделями, які характеризують залежність зміни в часі інтенсифікації технологічного процесу відокремлення потоку компонентів домішок від викопаного вороху коренеплодів від конструктивно-кінематичних параметрів робочих органів МТТС і КМ загалом та їхніх умов роботи.

Висновки. Запропонований алгоритм розробки модулів транспортно-технологічних систем дозволяє на етапі проектування моделювати загальні структурні схеми модуля для викопування коренеплодів і модуля для очищення коренеплодів від домішок. Отримані аналітичні залежності, які записано в операторній і параметричній формах, характеризують інтенсивність процесу відокремлення домішок від коренеплодів робочими органами модулів транспортно-технологічних систем коренезбиральної машини залежно від пропускної здатності, інтенсивності зменшення вхідного потоку або інтенсивності зменшення компонентів домішок і часу їх перебування на робочих поверхнях відповідного модуля. На основі кількісного масового розрахунку вхідних і вихідних потоків, який регламентовано отриманими детермінованими моделями, надалі можна обґрунтовувати та оптимізувати конструктивно-кінематичні параметри робочих органів модулів транспортно-технологічних системи машин для збирання коренеплодів залежно від умов їх роботи та прогнозувати необхідні агротехнічні показники.

Бібліографічний список

1. Аванесов Ю. Б., Бессарабов В. И., Русанов И. И. Свеклоуборочные машины. Москва, 1979. 351 с.
2. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Иванишин В. В. Про розробку і створення в Україні сільськогосподарських машин сучасного рівня. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія «Технічні науки»*. 2012. Вип. 11, т. 2 (66). С. 8–14.

3. Аналіз тенденцій розвитку робочих органів для сепарації вороху коренеплодів / В. Ю. Рамш, В. М. Барановський, М. Р. Паньків [та ін.]. *Наукові нотатки*. 2011. Вип. 31. С. 298–305.
4. Барановський В. Основні етапи та сучасні тенденції розвитку коренезбиральних машин. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2006. Т. 11, № 2. С. 67–75.
5. Барановський В. М. Конструктивно-технологічні принципи застосування адаптивного викопувального робочого органу коренезбиральної машини. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2004. Вип. 73, ч. 1. С. 249–255.
6. Барановський В. М. Математична модель інтенсифікації процесу відокремлення домішок від коренеплодів. *Науковий вісник Національного університету біотехнологій і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2014. Вип. 96, ч. 1. С. 196–204.
7. Барановський В. М., Паньків М. Р. Конструктивно-технологічні принципи адаптованого застосування коренезбиральних машин. *Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: зб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. конф. Тернопіль: ТДТУ, 2004. С. 192–198.*
8. Булгаков В. М., Черновол М. И., Сви-рень Н. А. Теория свеклоборочных машин: монография. Кировоград: КОД, 2009. 256 с.
9. Волоков И. К., Канатников А. Н. Интегральные преобразования и операционное исчисление. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 227 с.
10. Гевко Р. Б. Викопувально-очисні пристрої бурякозбиральних машин: конструювання і розрахунок. Тернопіль, 1997. 120 с.
11. Герасимчук Г. А., Барановський В. М. Критерії оцінки технологічної ефективності процесу викопування коренеплодів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2009. № 14. С. 163–168.
12. Кравчук В. І. Теоретичні основи адаптації сільськогосподарських машин: монографія. Київ: НАУ, 2005. 208 с.
13. Паньків М., Дубчак Н. Аналіз процесу роботи доочисних пристроїв коренезбиральних машин. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2007. Т. 12, № 1. С. 76–81.
14. Погорілий М. Закономірності розвитку бурякозбиральної техніки та обґрунтування раціональних обрисів вітчизняних машин. *Техніка АПК*. 1999. № 3. С. 8–12.
15. Погорельый Л. В., Татьяна М. В. Свеклоборочные машины: история, конструкция, теория, прогноз. Киев: Феникс, 2004. 232 с.
16. Прогнозування кількості ґрунту на поверхні тіла коренеплоду / В. М. Барановський та ін. *MOTROL 03, IV*. 2003. Т. 6. С. 164–172.
17. Рамш В. Ю., Барановський В. М. Оптимізаційні математичні моделі процесу викопування вороху коренеплодів пасивним сферичним диском. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2008. № 12 (2). С. 337–349.
18. Сучасні тенденції розвитку конструкції сільськогосподарських машин / за ред. В. І. Кравчука, М. І. Грицишина, С. М. Ковалю. Київ: Аграрна наука, 2004. 353 с.
19. Ямков О. В. Обґрунтування параметрів технологічного процесу і робочих органів бурякозбирального агрегату з системним трактором: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2007. 20 с.
20. McLachlan N. W. Laplace Transforms and Their Applications to Differential Equations. Dover Publications, 2014. 241 p.

Паньків М., Підгурський М., Барановський В.

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МОДУЛІВ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

Для збирання коренеплодів застосовують самохідні бункерні комбайни, які реалізують спосіб однофазного збирання. Конструкція таких машин складається з розташованих один за одним модулів транспортно-технологічних систем, які виконують послідовні фази збирання коренеплодів. Проте під час значного варіювання умов збирання (ґрунтово-кліматичних умов, урожайності тощо), їхні показники якості роботи не відповідають агротехнічним вимогам – наявні втрати коренеплодів і домішки знижують показники подальшої реалізації зібраної продукції. На основі ідентифікації існуючих типів копачів і очисників вороху коренеплодів визначено основні шляхи та принципи розробки модулів транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин. Наведено результати наукових досліджень, які характеризують методологічні та конструктивно-технологічні принципи послідовності розробки модулів транспортно-технологічних систем однофазних коренезбиральних машин. На основі аналізу технологічних процесів викопування та очищення коренеплодів від домішок розроблено структурну модель і запропоновано алгоритм розробки модуля викопування та очищення коренеплодів. Розроблено детерміновані математичні моделі, які описують інтенсифікацію процесу відокремлення домішок від вороху коренеплодів робочими органами модулів транспортно-технологічних систем коренезбиральної машини.

Ключові слова: ворох коренеплодів, домішки, копач, очисник, алгоритм, структурна ланка, оператор, передавальна функція.

Pankiv M., Pidhursky M., Baranovsky V.

**TECHNOLOGICAL ASPECTS OF DEVELOPMENT MODULES
OF TRANSPORT-TECHNOLOGICAL SYSTEMS MACHINES FOR CLEANING OF CORPS**

A modern feature of the general trend in the process of harvesting roots is the large-scale application of single-phase self propelled bunker combines. They are constructed according to the modular scheme and combine the successive phases of harvesting (cutting the wicker, trimming the remnants of the stick from the heads, digging the root crops, cleaning the excavated rootstock from the impurities, unloading the root crops) into one successive technological operation, that is, implementing the principle of single-phase harvesting of root crops. The basis of solving the scientific and technical problem of increasing the agrotechnological performance indicators of machines for harvesting root crops is the hypothesis of the possible improvement of the digestion and purification of root crops by intensifying the technological process of separating soil and vegetal impurities from root crops by the working bodies of the modules of transport and technological systems. The purpose of the study is the further development of methods and methodology for the development and optimization of parameters and modes of work of the working bodies of modules of transport and technological systems of machines for harvesting root crops. On the basis of identification of existing types of diggers and root crop cleaners from impurities, the main ways and principles of developing modules for transport and technological systems for corncrapers are proposed. The results of scientific researches, which characterize the methodological and constructive and technological principles of the sequence of development of modules of transport-technological systems of single-phase machines, are presented. On the basis of the analysis of the technological processes of digestion and purification of root crops from impurities a structural model was developed and an algorithm for the development of the module for the digestion and purification of root crops from impurities was proposed. Based on the application of Laplace transformations, deterministic mathematical models are developed that describe the intensification of the separation process of impurities from root crops by the working bodies of the modules of transport and technological systems of the coronet-cutting machine. On the basis of the quantitative mass calculation of input and output flows, which is regulated by the obtained deterministic models, in the future it is possible to substantiate and optimize the structural and kinematic parameters of the working bodies of the modules of the transport and technological systems of machines for harvesting roots depending on their working conditions and to forecast the necessary agronomic indicators.

Key words: root crop, impurity, digger, purifier, algorithm, structural link, operator, transfer function.

Стаття надійшла 30.11.2018