

DOI : 10.33274/2079-4827-2023-46-1-53-60

УДК 681.5:(664633.49)(045)

Цвіркун Л. О.¹, канд. пед. наук
Омельченко О. В.¹, канд. техн. наук
Цвіркун С. Л.², канд. техн. наук
Шкільна Ю. С.¹, здобувач ОС магістра
Шилін А. С.¹, здобувач ОС бакалавра

¹Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: cvirkun@donnuet.edu.ua.

²Криворізький національний університет (м. Кривий Ріг, Україна), e-mail: tserg30@ukr.net

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ СОРТУВАННЯ КАРТОПЛІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ МАШИННОГО ЗОРУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНОГО РУХУ СИРОВИНИ

UDC 681.5:(664633.49)(045)

Tsvirkun L. A.¹, PhD in Pedagogical sciences
Omelchenko O. V.¹, PhD in Engineering sciences
Tsvirkun S. L.², PhD in Engineering sciences
Shkilna Yu. S.¹, a graduate of a master's degree
Shilin A. S.¹, a graduate of a bachelor degree

¹Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky (Kryvyi Rig, Ukraine), e-mail: cvirkun@donnuet.edu.ua. Krivoy Rog

²Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine), e-mail: tserg30@ukr.net

AUTOMATED CONTROL OF THE PROCESS OF SORTING POTATOES USING A MACHINE VISION SYSTEM BASED ON THE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE MECHANICAL MOVEMENT OF THE RAW MATERIAL

Мета. Метою статті є автоматизоване управління процесом сортування картоплі із використанням системи машинного зору на основі аналізу характеристик механічного руху сировини.

Методи. У роботі для автоматизованого управління процесом сортування картоплі на основі регулярності форми під час транспортування на сортувальному пристрої, застосовано методи теоретичної механіки, методи сортування на основі систем машинного зору, методи обробки зображень.

Результати. Зазначено, що картопля відноситься до найважливіших сільськогосподарських культур. Вона займає четверте місце у світі після кукурудзи, пшениці та рису. Відрізняється різноманітними розмірами та формою. Вважається, що серед усіх найважливіших характеристик за якими здійснюється процес сортування картоплі є її форма, оскільки пошкодження та порізи під час збору врожаю та обробки додають додаткові типи форм. Розглянуто методи сортування картоплі на основі застосування систем машинного зору, які уможливають розпізнавання не лише зовнішніх дефектів (зелена шкіра, паростки, синці, механічні травми), а й внутрішніх дефектів (чорне серце, водяне ядро, пошкодження морозом, внутрішні порожнини). Сконцентровано увагу на тому, що ефективно сортування овочевої сировини має відбуватися при подачі на сортувальну поверхню в один або півтора шари та забезпечувати безвідривне переміщення щодо

© Цвіркун Л. О., Омельченко О. В., Цвіркун С. Л.,
Шкільна Ю. С., Шилін А. С.

виконавчого механізму. Тому форма сортувальної поверхні безпосередньо визначатиме ефективність процесу сортування. Чим менш стійким буде положення картоплі на поверхні сортувальника, тим швидше картопля буде переміщатися по сортувальній поверхні, що призведе до недотримання відстаней між об'єктами, що підлягають сортуванню. На основі аналізу силових характеристик взаємодії картоплі із сортувальною поверхнею було визначено, що прискорення у процесі переміщення овочевої сировини не впливатиме на дотримання відстаней між об'єктами, що підлягають сортуванню. Циліндрична форма ролика сортувальної поверхні сприятиме підвищенню ефективності та точності сортування, зниженню точкового навантаження на картоплю. Розроблено узагальнену структуру системи візуального контролю потоку картоплі на сортувальному пристрої із застосуванням технічних засобів та технологій цифрової обробки зображень. Запропоновано автоматизоване управління процесом сортування картоплі на основі регулярності форми під час транспортування на сортувальному пристрої із швидкими алгоритми аналізу форми картоплі на основі систем машинного зору, здатної виявляти картоплю, яка не відповідає заданим формам, задля вилучення із загального потоку.

Ключові слова: системи машинного зору, сортування, методи теоретичної механіки, силові характеристики, автоматизація, технічні засоби, технології цифрової обробки зображень, картопля.

Постановка проблеми. Картопля відноситься до найважливіших сільськогосподарських культур. Вона займає четверте місце у світі за важливістю продовольчої культури після кукурудзи, пшениці та рису. Відрізняється різноманітними розмірами та формою. Товар з відповідним зовнішнім виглядом, розміром і однорідною формою більш привабливий для споживача. Тому найважливішими якісними параметрами є не лише поживні цінності, хімічні складові, механічні та функціональні властивості та дефекти, а перш за все загальний зовнішній вигляд, колір і форма овочевої сировини [1, 2]. Щоб продукція відповідала визначеним вимогам та забезпечувала очікуваний рівень якості для споживачів, продукція підлягає процесам сортування. Сортуючи, ми можемо класифікувати культури за розміром, формою, кольором, стиглістю, пошкодженням.

Картопля повинна мати гарне забарвлення, однорідну і правильну форму, не мати будь-яких дефектів. Серед усіх критеріїв сортування картоплі – форма є однією з основних показників, оскільки пошкодження та порізи під час збору врожаю та обробки додають додаткові типи форм. Картопля неправильної форми має великі втрати при очищенні від шкірки і подальшої обробки. Вразливість до пошкоджень робить урожай картоплі складним в обробці і сортуванні. Тому виникає необхідність в надійних, автоматичних, послідовних системах перевірки для збільшення швидкості виробництва і підвищення точності й ефективності процесу сортування овочевої сировини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ручне сортування – виснажливий і трудомісткий процес. Крім того, непослідовні помилки у процесі сортування часто виникають саме у процесі ручного оцінювання. Для швидкого сортування картоплі створюються менш трудомісткі сучасні технології, такі як машинне бачення. Система машинного зору є однією із сучасних методів сортування. В основі цього методу лежить отримання зображення зразків, аналіз зображень, порівняння їх зі стандартом і остаточним рішенням щодо прийняття або відхилення зразків [3, 7, 8]. Для цього використовуються різні типи пристроїв візуалізації: ПЗС-камера, гіперспектральна камера, ультрафіолетова камера та рентгенівська КТ. Використовуючи системи машинного зору та методи обробки зображень можна класифікувати овочеву сировину за розміром, формою, кольором, пошкодженням, наявністю зеленої шкіри, рис. 1.

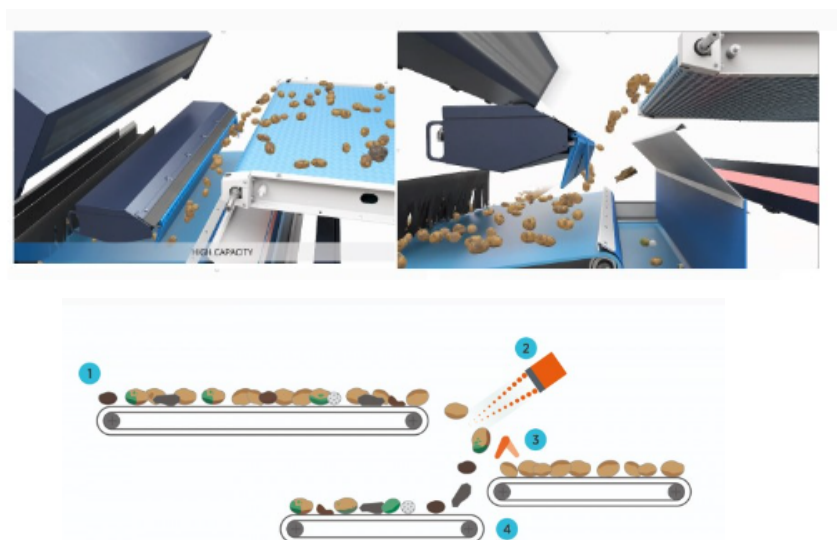


Рисунок 1 – Обладнання для оптичного сортування картоплі

На рис. 1 зображено: 1 – картопля, яка подається на транспортерну стрічку для сортування (з домішками); 2 – датчики для розпізнавання та вилучення непридатних зразків та домішок; 3 – зразки, які відповідають критеріям якості (розмір, вага, колір, зовнішній вигляд, відсутність пошкоджень); 4 – вилучення непридатних зразків, які не відповідають критеріям якості (зелена шкіра, паростки, механічні травми) та домішок.

Останнім часом багато досліджень присвячено удосконаленню процесів сортування, зокрема картоплі, застосовуючи різноманітні технології та виокремлюючи найважливіші характеристики за якими може здійснюватися процес сортування. З-поміж таких досліджень є розроблення методу сортування картоплі за вагою і формою. Авторами пропонується за допомогою систем машинного зору захоплювати три проекційних зображення картоплі одночасно *V*-подібним плоским дзеркалом. Випадковим чином обираються зразки картоплі, які мають великі, середні та малі розміри, сфери наближення відповідно до штучного візуального визначення [4]. Параметри отримувалися із використанням технології цифрової обробки зображень, включаючи області контуру верхнього вигляду та двох виглядів збоку, довжину та ширину описаного прямокутника на проекційному зображенні кожного зразка картоплі.

Під час сортування картоплі вага і форма є двома найважливішими характеристиками. Дослідниками пропонується метод сортування на основі врахування маси і форми картоплі. На підставі отриманих параметрів площі верхнього виду і периметра бокового огляду побудовано модель сортування маси картоплі зі ступінчастим регресійним аналізом, а потім чотири раунди класифікації мас завершилися машинним зором [5]. Однак для того, щоб ці системи були більш ефективними, необхідне врахування обмеженої швидкодії виконавчого механізму.

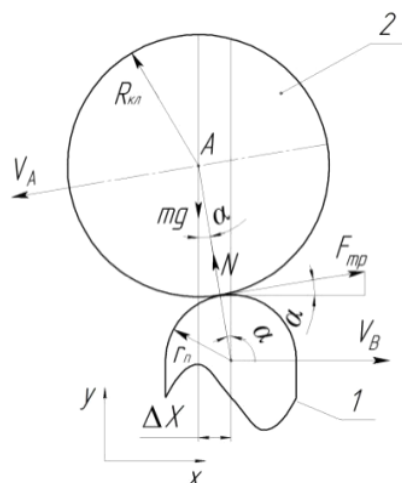
Також науковцями розглядається об'ємний метод, заснований на мінімально обмеженому циліндрі. Для сортування картоплі за її розмірами було запропоновано використовувати співвідношення ширини і довжини найбільшого діаметра. Метод ґрунтується на основі виявлення особливостей дефектів картоплі, площі дефекту, довжини діагоналі [6]. Системи машинного зору здатні прогнозувати фізичні розміри картоплі, враховуючи довжину, ширину і масу. Проте потребує покращення розпізнавання не лише зовнішніх дефектів (зелена шкіра, паростки, синці, механічні травми), а й внутрішніх дефектів (чорне серце, водяне ядро, пошкодження морозом, внутрішні порожнини).

На основі аналізу, можна стверджувати, що серед усіх найважливіших характеристик за якими здійснюється процес сортування картоплі є її форма, оскільки пошкодження та порізи під час збору врожаю та обробки додають додаткові типи форм. Тому актуальним є

розроблення узагальненої структури системи візуального контролю потоку овочевої сировини на сортувальному пристрої із застосуванням технічних засобів та технологій цифрової обробки зображень; здійснення аналізу форми картоплі на основі систем машинного зору та виявлення зразків, які не відповідають заданим формам, задля вилучення із сортувального пристрою.

Мета статті – автоматизоване управління процесом сортування картоплі із використанням системи машинного зору на основі аналізу характеристик механічного руху сировини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ефективне сортування овочевої сировини має відбуватися при подачі на сортувальну поверхню в один або півтора шари та забезпечувати безвідривне переміщення щодо виконавчого механізму. Тому форма сортувальної поверхні безпосередньо визначатиме ефективність процесу сортування. Чим менш стійким буде положення картоплі на поверхні сортувальника, тим швидше картопля буде переміщатися по сортувальній поверхні, що призведе до недотримання відстаней між об'єктами, що підлягають сортуванню. Це вимагає аналізу силових характеристик взаємодії картоплі з роликami сортувального пристрою, задля визначення доцільності застосування такої поверхні у розробці узагальненої структури системи візуального контролю потоку картоплі на сортувальному пристрої із застосуванням технічних засобів та технологій цифрової обробки зображень [7, 9, 10], рис. 2.



1 – об'єкт сортування; 2 – ролик сортувальної поверхні

Рисунок 2 – Сили, що діють на картоплю, що знаходиться на сортувальному пристрою

Складемо рівняння руху та спроектуємо всі сили на вісь x

$$m\ddot{x} = m a^n = F_{тр} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

де m – маса зразка, кг;

α – кут, що визначає початкове положення картоплі, град.;

$F_{тр}$ – сила тертя кочення, Н;

$$F_{тр} = f \cdot mg \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

f – коефіцієнт тертя кочення.

У цьому випадку картопля буде здійснювати переміщення не по прямій, а по дузі кола, тому сила тертя $F_{тр}$ буде спрямована під кутом до осі x , отже, вона зменшується.

Спроекуємо всі сили на вісь y

$$m\ddot{y} = m a^{\tau} = N \cdot \cos \alpha - mg \quad (3)$$

де N – нормальна реакція віброживильника, Н;
 mg – сила тяжіння, Н.

Рух відбуватиметься не тільки по осі x , але і по осі y , отже, $m\ddot{y} \neq 0$ та з'явиться тенденційне прискорення.

Визначимо крутні моменти

$$J_z \ddot{\varphi} = F_{mp} \cdot R_{кл} + mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha) \quad (4)$$

Це рівняння показує, що навіть після дуже малого зміщення центру симетрії бульби від центру симетрії ролика виникатиме додатковий крутний момент, $mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha)$ який сприятиме більш швидкому переміщенню, систему доповнить рівняння

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m a^n = F_{mp} \cdot \cos \alpha \\ m\ddot{y} = m a^{\tau} = N \cdot \cos \alpha - mg \\ J_z \ddot{\varphi} = F_{mp} \cdot R_{кл} + mg \cdot (R_{кл} \cdot \sin \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

На основі аналізу силових характеристик взаємодії картоплі із сортувальною поверхнею можна вважати, що буде відбуватися прискорення у процесі переміщення овочевої сировини, яке не буде впливати на дотримання відстаней між об'єктами, що підлягають сортуванню. Циліндрична форма ролика сортувальної поверхні сприятиме підвищенню ефективності та точності сортування, зниженню точкового навантаження на картоплю.

Узагальнена структура системи візуального контролю потоку картоплі на сортувальному пристрої із застосуванням технічних засобів та технологій цифрової обробки зображень наведена на рис. 3. Запропоновано автоматизоване управління процесом сортування бульб картоплі на основі регулярності форми під час транспортування на сортувальному пристрої із швидкими алгоритми аналізу форми картоплі на основі систем машинного зору, здатної виявляти картоплю, яка не відповідає заданим формам, задля вилучення із загального потоку.

Отже, особливістю запропонованої автоматизованої системи управління процесом сортування картоплі є те, що вона дозволить аналізувати зразки різних кольорів, розмірів та з різними швидкостями руху, що дозволить розпізнавати та вилучати зразки, які мають форму, що не відповідає зразку.

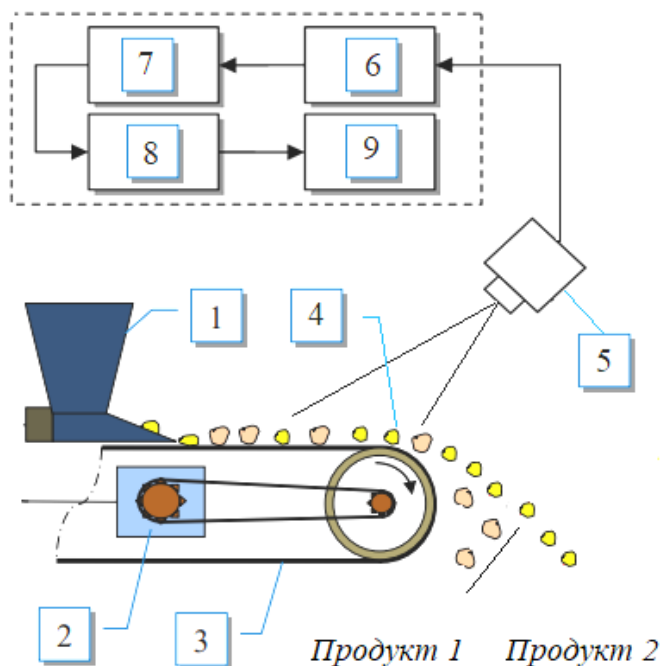


Рисунок 3 – Узагальнена структура системи візуального контролю потоку картоплі на сортувальному пристрої із застосуванням технічних засобів та технологій цифрової обробки зображень

На рис. 3 зображено: 1 – віброживильник; 2 – двигун; 3 – транспортерна стрічка; 4 – об’єкт у зоні аналізу; 5 – відеокамера; 6 – система перетворення відео в послідовність фотографічних зображень; 7 – система поліпшення якості зображень; 8 – система розпізнавання різновидів по зображеннях; 9 – вихідний інтерфейс системи.

Висновки. Зазначено, що картопля відноситься до найважливіших сільськогосподарських культур. Вона займає четверте місце у світі за важливістю продовольчої культури після кукурудзи, пшениці та рису. Відрізняється різноманітними розмірами та формою. Найважливішими якісними параметрами сировини є загальний зовнішній вигляд, колір і форма овочевої сировини. Вважається, що серед усіх найважливіших характеристик за якими здійснюється процес сортування картоплі є її форма, оскільки пошкодження та порізи під час збору врожаю та обробки додають додаткові типи форм.

Сконцентровано увагу на тому, що ефективне сортування овочевої сировини має відбуватися при подачі на сортувальну поверхню в один або півтора шари та забезпечувати безвідривне переміщення щодо виконавчого механізму. Тому форма сортувальної поверхні безпосередньо визначатиме ефективність процесу сортування. Чим менш стійким буде положення картоплі на поверхні сортувальника, тим швидше картопля буде переміщатися по сортувальній поверхні, що призведе до недотримання відстаней між об’єктами, що підлягають сортуванню. На основі аналізу силових характеристик взаємодії картоплі із сортувальною поверхнею було визначено, що прискорення у процесі переміщення овочевої сировини не впливатиме на дотримання відстаней між об’єктами, що підлягають сортуванню. Циліндрична форма ролика сортувальної поверхні сприятиме підвищенню ефективності та точності сортування, зниженню точкового навантаження на картоплю.

Розглянуто методи сортування картоплі на основі застосування систем машинного зору, які уможливають розпізнавання не лише зовнішніх дефектів (зелена шкіра, паростки, синці, механічні травми), а й внутрішніх дефектів (чорне серце, водяне ядро, пошкодження морозом, внутрішні порожнини). Розроблено узагальнену структуру системи візуального контролю потоку картоплі на сортувальному пристрої із застосуванням технічних засобів та технологій

цифрової обробки зображень. Запропоновано автоматизоване управління процесом сортування картоплі на основі регулярності форми під час транспортування на сортувальному пристрої із швидкими алгоритми аналізу форми картоплі на основі систем машинного зору, здатної виявляти картоплю, яка не відповідає заданим формам, задля вилучення із загального потоку.

Список літератури

1. Sergio Cuber. In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system. *Journal of food engineering*. 2012. Vol. 112. P. 60–68.
2. Yongsheng Si, Sindhuja Sankaran. Image-based automated potato tuber shape evaluation. *Journal of food measurement and characterization*. 2018. Vol. 12. P. 702–709.
3. Roya Hassankhan, Hossein Navid. Potato sorting based on size and color in machine vision system. *Journal of agricultural science*. 2012. Vol. 4. P. 235–244.
4. Wang J., Xiong Z. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*. 2016. Vol. 32. P. 272–277.
5. Kong Y., Gao X., Li H. Potato grading method of mass and shapes based on machine vision. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*. 2012. Vol. 28. P. 143–148.
6. Zhou Z., Huang Y., Li X. Automatic detecting and grading method of potatoes based on machine vision. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*. 2012. Vol. 28. P. 178–183.
7. Дзюба О.А. Визначення умов руху картоплі в сортувальному пристрої. *Механізація сільськогосподарського виробництва*. № 20. 2016. С.404 – 407.
8. Дзюба О.А. Аналіз пристроїв для післязбирального сортування картоплі. *Вісник ХДПУ*. 2000. № 12. С.99–106.
9. Павловський М.А. Теоретична механіка. К.: Техніка, 2016. 400 с.
10. Шульга. О.Ю. Теоретична механіка. Харків: Ранок, 2017. 208 с.

References

1. Sergio, Cuber. (2012). *Potochne sortuvannya kartopli nepravyl'noyi formy za dopomohoyu avtomatyzovanoyi komp'yuternoyi systemy mashynnoho zoru* [In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system], *Zhurnal kharchovoyi inzheneriyi* [Journal of food engineering], 112, p. 60–68.
2. Yongsheng, Si, Sindhuja, Sankaran. (2018). *Avtomatyzovana otsinka formy bul'by kartopli na osnovi zobrazhennya* [Image-based automated potato tuber shape evaluation], *Zhurnal vymiryuvannya ta kharakterystyky kharchovykh produktiv* [Journal of food measurement and characterization], 12, p. 702–709.
3. Roya, Hassankhan; Hossein, Navid. (2012). *Sortuvannya kartopli za rozmirom i kol'orom u systemi mashynnoho zoru* [Potato sorting based on size and color in machine vision system], *Zhurnal sil'skohospodars'koyi nauky* [Journal of agricultural science], 4, p. 235–244.
4. Wang, J.; Xiong, Z. (2016). *Metod klasyfikatsiyi kartopli za vahoyu ta formoyu na osnovi parametriv kharakterystyk zobrazhennya v systemi mashynnoho zoru* [Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system], *Pratsi Kytays'koho tovarystva sil'skohospodars'koho mashynobuduvannya* [Transactions of the Chinese society of agricultural engineering], 32, p. 272–277.
5. Kong, Y., Gao, X., Li, H. (2012). *Metod sortuvannya kartopli za masoyu ta formoyu na osnovi mashynnoho zoru* [Potato grading method of mass and shapes based on machine vision], *Pratsi Kytays'koho tovarystva sil'skohospodars'koho mashynobuduvannya* [Transactions of the Chinese society of agricultural engineering], 28, p. 143–148.
6. Zhou, Z., Huang, Y., Li, X. (2012). *Metod avtomatychnoho vyyavlennya ta sortuvannya kartopli na osnovi mashynnoho zoru* [Automatic detecting and grading method of potatoes based on

machine vision], *Pratsi Kytays'koho tovarystva sil's'kohospodars'koho mashynobuduvannya* [Transactions of the Chinese society of agricultural engineering], 28, p. 178–183.

7. Dzyuba, O. A. (2016). *Vyznachennya umov rukhu kartoplya v sortuval'nomu prystroyi* [Determination of the conditions for the movement of potatoes in the sorting device], *Mekhanizatsiya sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva* [Mechanization of agricultural production], 20, p. 404 – 407.

8. Dzyuba, O. A. (2000). *Analiz prystroyiv dlya pislyazbyral'noho sortuvannya kartopli* [Analysis of attachments for sorting potatoes], *Visnyk KHDPU* [Bulletin of KhSPU], 12, p. 99–106.

9. Pavlovs'kyi, M. A. (2016). *Teoretychna mekhanika* [Theoretical mechanics]. Kyiv, Machinery, 400 p.

10. Shulga, O. Yu. (2017). *Teoretychna mekhanika* [Theoretical mechanics]. Kharkiv, Morning, 208 p.

Objective. *The purpose of the article is the automated control of the potato sorting process using a machine vision system based on the analysis of the characteristics of the mechanical movement of raw materials.*

Methods. *In the work, the methods of theoretical mechanics and methods of sorting based on machine vision systems are used for the automated control of the potato sorting process based on the regularity of the shape during transportation on the sorting device, image processing methods.*

Results. *It is noted that potatoes are among the most important agricultural crops. It ranks fourth in the world after corn, wheat and rice. Differs in a variety of the sizes and forms. It is believed that among all the most important characteristics by which the potato grading process is carried out is its shape, since damage and cuts during harvesting and processing add additional types of shapes. Methods for sorting potatoes based on the use of machine vision systems are considered, which allow recognizing not only external defects (green skin, sprouts, bruises, mechanical injuries), but also internal defects (black heart, water core, frost damage, internal cavities). Attention is focused on the fact that effective sorting of vegetable raw materials should occur when fed to the sorting surface in one or one and a half layers and ensure continuous movement along the actuator. Therefore, the shape of the sorting surface will directly determine the efficiency of the sorting process. The less stable the position of the potatoes on the surface of the sorter, the faster the potatoes will move on the sorting surface, which will lead to non-observance of the distances between the sorted objects. Based on the analysis of the power characteristics of the interaction of potatoes with the sorting surface, it was determined that the acceleration in the process of moving vegetable raw materials will not affect the observance of the distances between the sorted objects. The cylindrical shape of the sorting surface roller will increase the efficiency and accuracy of sorting, and reduce the point load on the potatoes. A generalized structure of a system for visual control of the potato flow on a sorting device has been developed using technical means and digital image processing technologies. An automated control of the sorting process of potatoes based on the regularity of the shape during their transportation on a sorting device with fast algorithms for analyzing the shape of potatoes based on machine vision systems is proposed, which is capable of detecting potatoes that do not correspond to the specified shapes for extraction from the general flow.*

Key words: *machine sorting systems, sorting, methods of theoretical mechanics, power characteristics, automation, technical needs, technologies for digital processing of calculations, potatoes.*