

УДК 621.865.8:658.56

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-37-44

Наталія Стельмах, Сергій Сапон, Олег Бельман

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ МОДУЛЬ СОРТУВАННЯ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ**

*Актуальним напрямом підвищення ефективності технологій сортування твердих побутових відходів є розробка автоматизованих систем оперативного розпізнавання типів матеріалів із подальшим їх відокремленням та утилізацією. У статті запропоновано метод сортування твердих побутових відходів на базі візуальної спектрометрії. Розроблено компоновку та функціональну схему системи контролю модуля сортування пластикових відходів. Використання запропонованих розробок дозволяє оптимізувати технологічний процес ідентифікації та відокремлення різних типів пластикових відходів.*

**Ключові слова:** автоматизація; утилізація; тверді побутові відходи; спектрометрія; модуль сортування пластмас.

*Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 7.*

**Актуальність теми дослідження.** Для України на сьогодні сортування відходів – справа проблемна, і має багато невирішених завдань від фінансових до відсутності ефективних технічних рішень. Люди не знають, як правильно розділяти сміття і для чого це робити. Тим часом правильна утилізація і сортування відходів здатні вирішити безліч екологічних і фінансових завдань. Країни Європи й Америки досить давно успішно практикують поділ сміття і як результат – відмінна екологічна ситуація, дешева вторинна сировина, збереження природних ресурсів.

**Постановка проблеми.** Розвиток сучасних технологій сортування твердих побутових відходів набуває дедалі більшої актуальності, оскільки класичні методи утилізації вже не спроможні задовольнити потреби людства в цьому відношенні. Важливим аспектом є як сортування відходів з можливістю подальшого їх перероблення, так і сам процес утилізації без значної шкоди навколишньому середовищу.

Для забезпечення утилізації пластмасових одноразових предметів розроблено систему маркування, ідентифікаційних кодів. Більшість типів пластмас зазвичай добре піддається переробці й повторному використанню. Можливість повторного використання є найбільш корисною властивістю пластмас. Запропонований у роботі прототип модуля сортування пластикових відходів є спробою вирішити актуальну проблему сортування пластикових відходів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основними методами переробки твердих побутових відходів (ТПВ) на сьогодні є: збір і проміжне зберігання відходів, захоронення, спалювання, рециклінг (вторинне використання, утилізація) ТПВ.

Головною проблемою при вторинній переробці ТПВ є розділення відходів на фракції і на окремі компоненти [1]. У світі існує безліч різних технологій, що дозволяють розділяти вторинну сировину і відходи [2]. Найдорожчим і складним є отримання вторинної сировини на спеціальних підприємствах з уже сформованого загального потоку ТПВ. Однак існують і більш прості технології видалення тих чи інших компонент з потоку ТПВ, а саме, збагачення ТПВ з метою усунення небажаних елементів перед спалюванням і підвищення його енергетичної цінності [3]. На Заході встановлені закони, які зобов'язують споживачів здійснювати збір і сортування окремих видів відходів. Наприклад, у Франції повністю заборонено приймати несортовані ТПВ з метою їх подальшої переробки та захоронення [4]. У Нідерландах встановлено заборону на захоронення ТПВ органічних складових ТПВ з метою підвищення ефективності їх роздільного збору з подальшим компостуванням. У деяких країнах встановлені спеціальні показники, що характеризують рециклінг окремих компонентів ТПВ [3; 4].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На основі здійсненого аналізу досліджень та публікацій можна зробити висновок, що важливим елементом технологічного процесу сортування ТПВ є їх достовірна та швидка ідентифікація відповідно до типу пластику. Отже, постає задача виявлення можливості оперативного і водночас точного технологічного процесу сортування.

**Метою статті** є удосконалення методу сортування твердих побутових відходів на базі візуальної спектрометрії з розробкою компоновки та функціональної схеми системи контролю модуля сортування пластикових відходів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо основні властивості спектроскопії в інфрачервоній (ІЧ) області спектра.

*Спектроскопія в середній ІЧ-області спектра (ССІЧ) (MIR, Mid-Infrared Reflectance)*, яка покриває діапазон частот з довжиною хвилі від 4000 до 700 $\text{см}^{-5}$ , є добре розробленим і надійним методом ідентифікації пластмас. Середні інфрачервоні області для більшості звичайних полімерів відрізняються і безпосередньо відповідають спеціальним хімічним зв'язкам у полімері. Сучасні інфрачервоні спектрометри, засновані на переходах Фур'є, легкодоступні і прості в роботі. ССІЧ, однак, краще підходить для ідентифікації промислових відходів пластмас, а не для використаних пластикових пляшок. У цьому сенсі вона, швидше, доповнює, ніж конкурує зі спектроскопією в ближній ІЧ-області спектра (СБІЧ, обговорюється нижче), оскільки методи ідентифікації, засновані на СБІЧ, краще підходять для аналізу пластмасових пляшок [5].

Використовуючи засновані на ССІЧ технології для ідентифікації пластмас, що застосовуються в автомобільній промисловості, можна виконати ідентифікацію менш ніж за 10 с [1]. Технологія надійно працює, особливо для наповнених технічним вуглецем полімерів, які зазвичай використовуються для автомобільних компонентів (наприклад, бампери, решітки радіаторів, приладові панелі і т. д.). Однак для забарвлених полімерних деталей, технологія відображення СБІЧ, скоріше, дає спектр фарби, ніж полімерного субстрату. Переваги та недоліки систем сортування, заснованих на СБІЧ, узагальнені в таблиці 1.

*Таблиця 1. Переваги і незручності систем сортування, заснованих на СБІЧ*

<b>Переваги:</b>	<b>Недоліки:</b>
випробувана і надійна технологія	оскільки більшість систем сортування, заснованих на СБІЧ, використовують техніку відбиття, глибина проникнення променів незначна, тому шари фарби й бруд на поверхні можуть перешкодити вимірам
піки абсорбції обумовлені основними коливаннями і добре реєструються	для належної ідентифікації шорсткість поверхні пластмасових деталей повинна бути мінімальною
можуть бути легко проаналізовані пластмаси темного кольору	через значне загасання сигналу для під'єднання спектрометра не може застосовуватися звичайна скловолоконна оптика [2]

**Спектроскопія поглинання або відбиття в ближній області ІЧ-спектра (СБІЧ) (NIR, Near Infrared Reflectance)** – дуже швидкий метод, добре підходить для аналізу прозорих або кольорових полімерів. СБІЧ-спектри звичайних полімерів, що знаходяться в потоці використаних побутових і промислових відходів, досить помітні (рис. 1). За цієї причини вона є ідеальною для ідентифікації та сортування пластмасової тари. У СБІЧ безліч переваг в сортуванні відходів пластмас. Вона робить можливою швидку надійну ідентифікацію (впродовж мілісекунд) і досить надійна для роботи в промислових умовах, в забруднені і при вібрації, в типових умовах сортування [5]. Однак СБІЧ погано підходить для аналізу чорних пластмас, таких як автомобільні компоненти (рис. 2). Тому для чорного матеріалу не отримано жодної спектральної структури.

Абсорбція світла в ближньому ІЧ-спектрі (14 300-4000  $\text{см}^{-5}$ ) відбувається завдяки обертонам або складовим коливань молекули полімеру. Спектральна поглинальна здатність зазвичай має величини на порядок нижче в порівнянні з основними коливальними переходами в середніх інфрачервоних променях. Знижена спектральна поглинальна здатність у СБІЧ може стати перевагою, оскільки дозволяє зареєструвати спектр великих, довгих зразків, таких як пластмасові пляшки. Зв'язки С-Н, О-Н, N-H і С-О, виявлені в БІВ, можуть бути майже однозначно приписані конкретним полімерам, таким чином здійснюючи ідентифікацію більшості зазвичай використовуваних пластмас. Наприклад, СБІЧ -спектр ПЕВП показує пік близько 1200 нм, який відсутній у поліетилені (ПЕТ) і тільки в малих величинах присутній у ПВХ. З іншого боку, ПЕТ показує три характерні піки в діапазоні 2100-2200 нм.

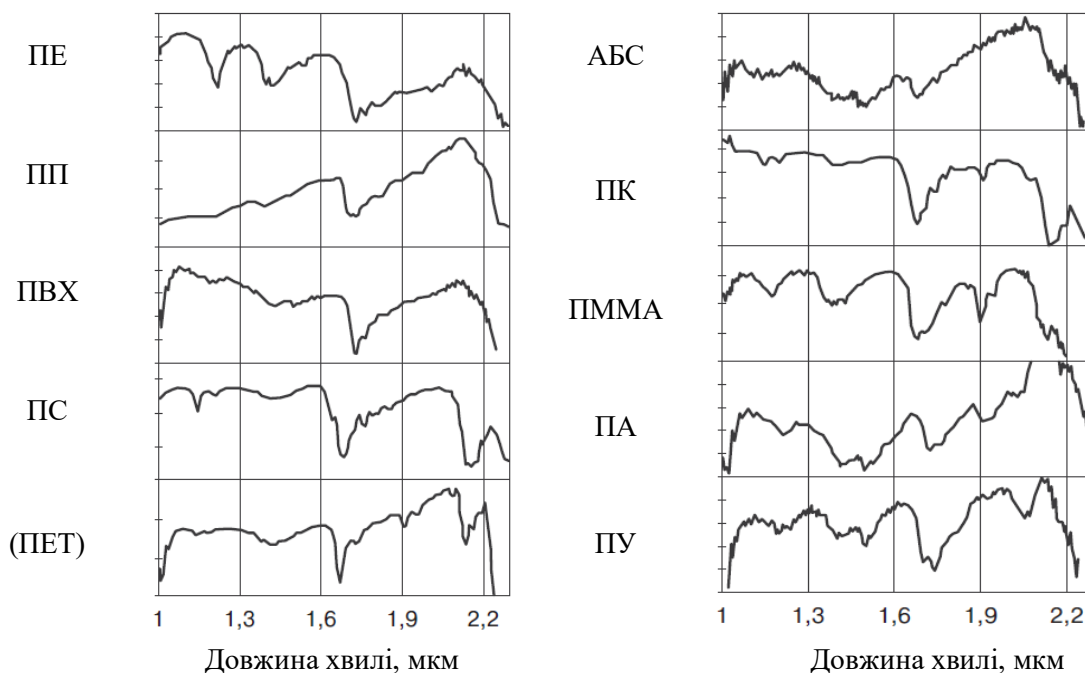


Рис. 1. СБІЧ-спектри звичайних полімерів:

PE – поліетилен; ПП – поліпропілен; АБС – акрилонітрил бутадієн стиролу;  
 ПК – поліакрил; ПММА – поліметилметакрилат; ПА – поліамід; ПУ – поліуретан;  
 ПС – полістирол; ПВХ – полівініл-хлорид; ПЕТ – поліетилентерефталат

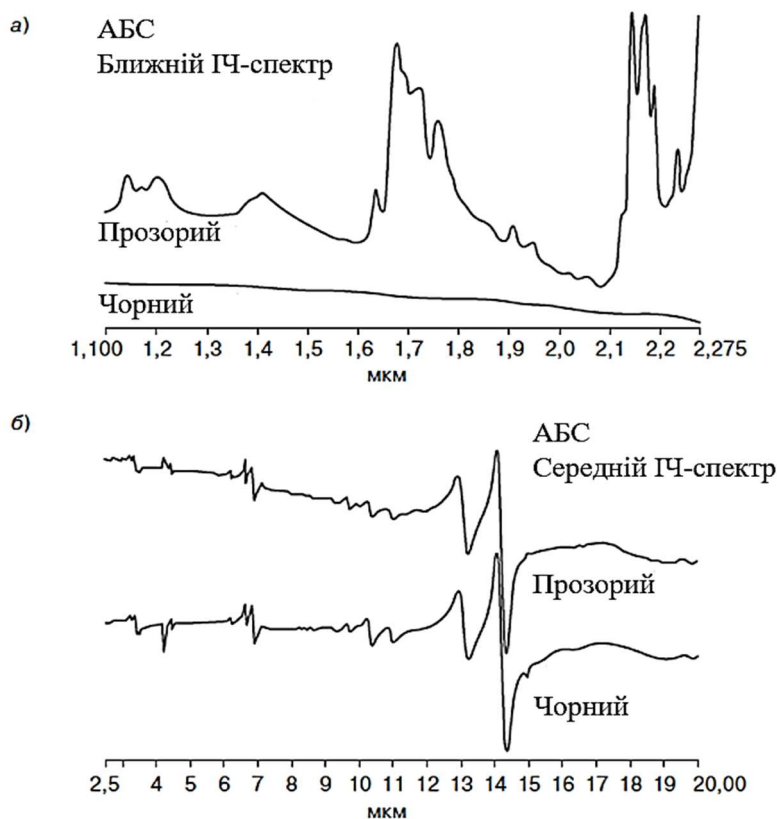


Рис. 2. Відбиті БІВ-спектри(а) світла АБС пластику різного кольору;  
 відбиті СІВ-спектри (б) світла АБС пластику

Інша перевага СБІЧ по порівнянні з ССІЧ полягає в тому, що у фотодетекторів БІВ (а саме, германію, арсеніду індію, або арсеніду індію-галію) короткий час відгуку і висока чутливість детектора. Крім того, для зручного і дистанційного розпізнавання може бути використана дешева оптика на основі кварцових волокон з низьким загасанням [6]. БІВ-спектрометри зазвичай не мають рухомих частин і тому на них не впливають вібрація або пил чи бруд, звичайні для регенерації пластмас. Більш того, інструменти БІВ вимагають мінімального обслуговування і забезпечують прекрасну відтворюваність при незначному зрушенні інструменту. На протигагу цьому у СІВ-спектрометри є дзеркала й оптика, які можуть бути забруднені пилом чи брудом. Переваги та недоліки систем сортування, заснованих на БІВ, узагальнені в табл. 2.

Таблиця 2. Переваги та недоліки систем сортування, заснованих на БІВ

Переваги:	Недоліки:
можна використовувати звичайну волоконну оптику, що дозволяє дистанційно обстежити зразок	природа піків не завжди зрозуміла, оскільки вони обумовлені обертонами, а не є основними піками
доступні переносні і міцні апарати	технічний вуглець сильно абсорбує і накладає свої частоти на БІВ, ускладнюючи випробування темних пластмас
БІВ проникає в полімер глибше, ніж СІВ	
вимірювання можуть виконуватися у відбитому світлі без контакту зі зразком	
інструменти не мають рухомих частин і можуть працювати в умовах вібрації	

Промислова БІВ-система, відома як *SIROCUBE* (рис. 3), дозволяє швидко ідентифікувати вторинні пластмаси. Ця система надзвичайно швидка (0,3 мс на сканування) і може навіть розрізнити зелені і безбарвні шматочки ПЕТ. Інструмент *SIROCUBE* виробляє безконтактне вимірювання в спектральному діапазоні 1650-1830 нм. Пластмасові предмети (наприклад, пляшки) висвітлюють з допомогою галогенового джерела світла, і відображене світло збирається за допомогою оптико-волоконного датчика. Найменший об'єкт, виявляється з допомогою *SIROCUBE*, розміром 4×4 см. На жаль, подібно іншим системам ідентифікації, заснованим на БІВ, вона не може аналізувати чорні або дуже темні об'єкти (оскільки вони можуть поглинути все світло). Крім того, ці об'єкти повинні бути індивідуально піднесені під сканер. *SIROCUBE* використовує германієвий детектор і випускається з оптико-волоконними датчиками.



Рис. 3. Стаціонарний безконтактний спектрометр *SIROCUBE*

У результаті виконаного вище аналізу було розроблено функціональну схему (рис. 4) модуля сортування пластикових відходів [4]. Вона включає в себе мікроконтролер та датчики, які контролюють основні параметри роботи під час процесу сортування відходів. Датчик тиску, який встановлено в компресорі, автоматично надсилає значення в мікроконтролер, яке відображається на екрані контрольної панелі. Соленоїдні клапани, як основний інструмент сортування, теж з'єднані з мікроконтролером, який, у свою чергу, керує їхньою роботою. А також контролю піддається двигун конвеєра, призначений для зміни швидкості руху конвеєрної стрічки. Головним блоком модуля сортування пластикових відходів є спектрометр [5; 6].

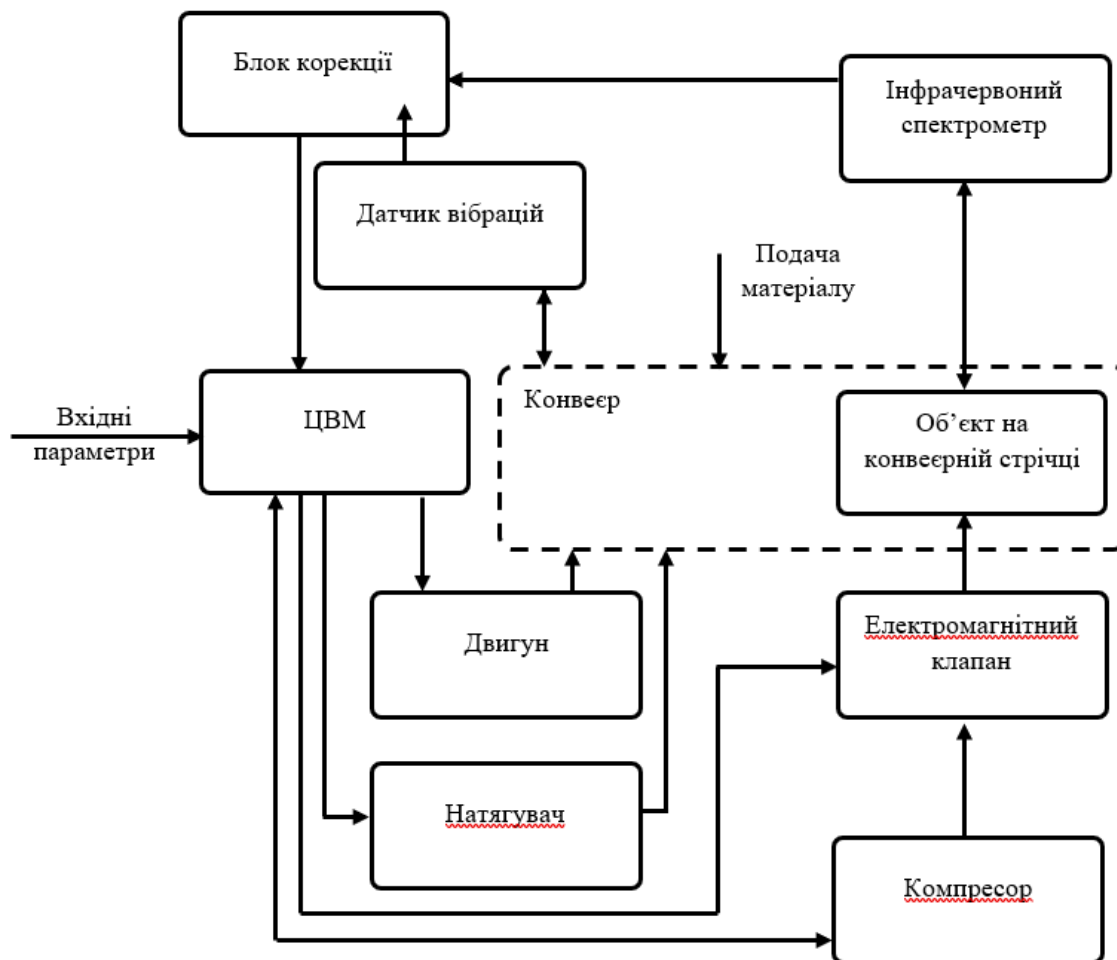


Рис. 4. Функціональна схема роботи модуля сортування пластмас

На основі функціональної схеми розроблено компоновку та загальний вигляд модуля сортування пластмас (рис. 5) [7].

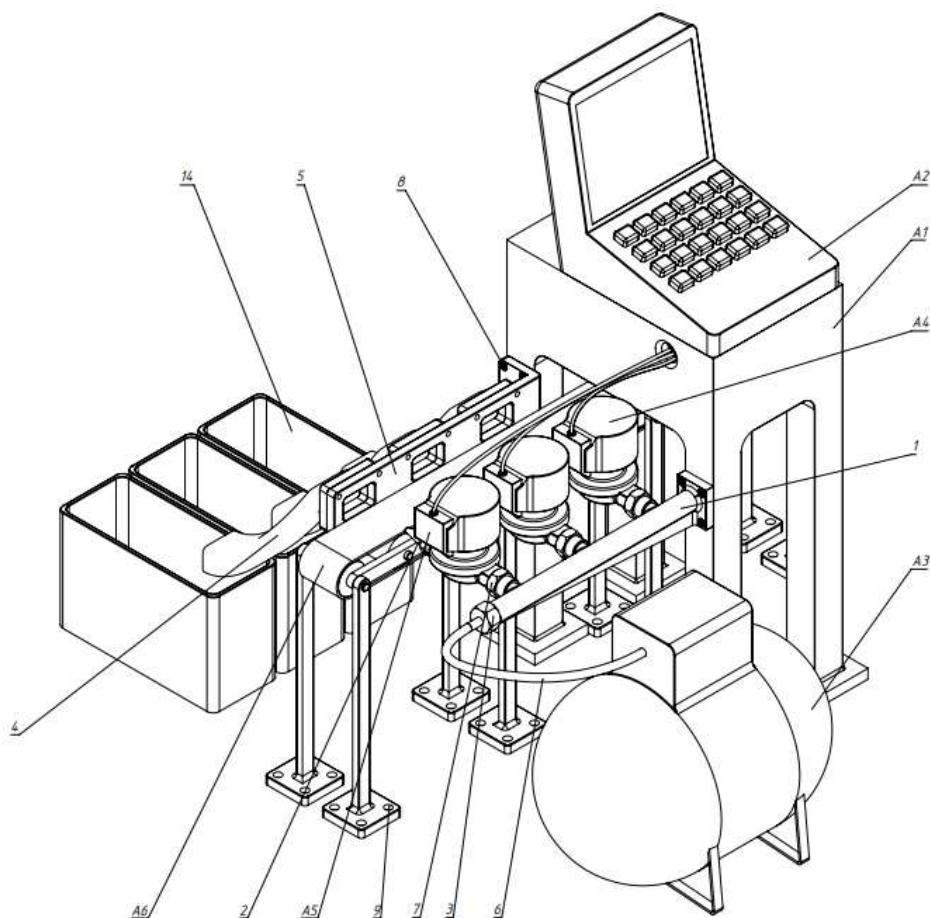


Рис. 5. Модуль сортування пластикових відходів:

*A1* – блок спектрометр; *A2* – контрольна панель; *A3* – компресор (рис. 6);  
*A4* – соленоїдний клапан (рис. 7); *A5* – комутатор; *A6* – конвеєр; *1* – розподільча труба,  
*2* – сопло; *3* – перехідник; *4* – направляюча труба; *5* – кронштейн; *6* – шланг високого тиску; *7* – швидкознімач; *8* – гвинт М6; *9* – гвинт М8; *14* – контейнер

Компресор поз. *A3* призначений для нагнітання тиску в певний об'єм. Він є одним із найважливіших пристроїв для повітряної сепарації відходів. При виборі комплектації компресора важливими були такі вимоги:

- живлення робочої частини компресора від електричної мережі;
- здатність підтримувати стабільний тиск 4 бар;
- компактні розміри.

Вказаним вимогам цілком задовольняє компресор Дніпро-М (рис. 6) українського виробництва.

Клапан *A4* (рис. 7) є відповідальною частиною функціональної схеми роботи модуля сортування пластмас, яка забезпечує герметичність та регулювання подачі повітря. У зробленій функціональній схемі керування роботою клапаном здійснюється за допомогою мікроконтролера, тому було обрано модель соленоїдного клапана італійської фірми СЕМЕ. Принцип його роботи полягає в наступному: при подачі струму на котушку, штифт відкриває потік повітря, вимкнувши струм, мембрана повертає штифт у початкове положення, тим самим закриваючи прохід. Використавши котушку, як інструмент впливу на потік повітря, можна досягти досить високої швидкості відкриття та закриття клапана. Оскільки швидкість руху конвеєра поз. *A6* досить висока, тому швидкодія та надійність роботи кожного елемента модуля сортування пластмас є досить важливою.





Рис. 6. Компресор Дніпро-М



Рис. 7. Соленоїдний клапан

Конструкція конвеєра А6 також відіграє важливе значення для функціонування модуля сортування пластмас. Від швидкості конвеєрної стрічки залежить час проходження частинками пластмас відстаней від точки сканування до передбачених місць “сходження”. Тому потрібно мати можливість регулювання частоти обертів двигуна конвеєру. Впливаючи на параметр швидкості, можна напряму змінити продуктивність усього модуля сортування.

**Висновки.** Пластмаси як матеріал стали невід’ємною частиною нашого світу насамперед завдяки своїм властивостям: легкість, стійкість до будь-яких погодних умов, універсальність, не окислюється на повітрі, простота виробництва деталей тощо, а також найголовніша властивість – придатність до повторного використання. Тому всі переваги цього матеріалу зникають, якщо не займатися його сортуванням та вторинною переробкою. Сучасні прилади, такі як, наприклад, спектрометр, принцип дії яких базується на властивостях відбитого спектра від досліджуваної поверхні, дозволяють розробляти компактні, але потужні автоматизовані лінії сортування пластиків за їх різновидами. Це дозволяє зробити пластик з проблеми сучасності, на основну перевагу в майбутньому. Тому запропоновані в роботі функціональна схема роботи модуля сортування пластмас, а також його конструкція в подальшому потребують доскональної конструкторської розробки. А це неминуче пов’язано з цілою низкою подальших наукових досліджень та дослідно-конструкторських розробок.

#### Список використаних джерел

1. Graham, J., Hendra, P.J., and Mucci, P. (1995). *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 24, pp. 55–67.
2. John Scheirs. (1998). *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications*.
3. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.-J., Kuiper, P., de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chem. Eng. Process. Process Intensif*, 51, pp. 53–68.
4. Eisenreich, N., Rohe, Th. (1996) Identifying plastics, analytical methods facilitate grading used plastics. *Kunststoffe plast Europe*, 86(2), pp. 31–32.
5. Grigory S. Tymchik, Nataliia V. Stelmakh, Anatoliy S. Vasyura, Waldemar Wójcik, Kuanysch Muslimov. (1 October 2018). Automated generation of the design solution of the assembly in instrument engineering. *Proc. SPIE 10808*, 1080828.
6. Alamgir, M., and Ahsan A., (2007). Municipal Solid Waste and Recovery Potential: Bangladesh Perspective. *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 4(2), pp. 67–76.
7. Belman O. I., Stelmakh N. V. Automated waste sorting system based on visual spectrometry. *Новые направления развития приборостроения: материалы 13-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов*. Минск : БНТУ, 2020. С. 4.

## References

1. Graham, J., Hendra, P.J., and Mucci, P. (1995). *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 24, pp. 55–67.
2. John Scheirs. (1998). *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications*.
3. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D.-J., Kuiper, P., de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chem. Eng. Process. Process Intensif*, 51, pp. 53–68.
4. Eisenreich, N., Rohe, Th. (1996) Identifying plastics, analytical methods facilitate grading used plastics. *Kunststoffe plast Europe*, 86(2), pp. 31–32.
5. Grigory S. Tymchik, Nataliia V. Stelmakh, Anatoliy S. Vasyura, Waldemar Wójcik, Kuanysh Muslimov. (1 October 2018). Automated generation of the design solution of the assembly in instrument engineering. *Proc. SPIE 10808*, 1080828.
6. Alamgir. M., and Ahsan A., (2007). Municipal Solid Waste and Recovery Potential: Bangladesh Perspective. *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 4(2), pp. 67–76.
7. Belman, O. I., Stelmakh, N. V. (2020). Automated waste sorting system based on visual spectrometry. *New directions for the development of instrumentation. Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students* (p. 4). BNTU.

UDC 621.865.8:658.56

Nataliia Stelmakh, Serhii Sapon, Oleg Belman

## AUTOMATED PLASTIC WASTE SORTING MODULE

*Sorting of solid waste is now of paramount importance. Therefore, it is advisable today to spend more time developing new modern, efficient, environmentally friendly waste sorting systems in an automated mode.*

*The development of modern technologies for sorting solid waste is becoming increasingly important, as classical methods of disposal are no longer able to meet the needs of mankind in this regard. An important aspect is both the sorting of waste with the possibility of further processing and the disposal process itself without significant harm to the environment.*

*Currently, there is a significant number of methods and organizational procedures for sorting solid waste, each of which has its advantages and disadvantages.*

*An important element of solid waste sorting technologies should be the ability to quickly identify types of materials with their subsequent separation and disposal, which will significantly increase the productivity of this process.*

*The purpose of the article is to improve the method of sorting solid waste on the basis of visual spectrometry.*

*On the example of a specific type of solid waste, namely plastic, the capabilities of the proposed module for sorting plastics based on visual spectrometry are demonstrated. The paper also considers the main properties of spectroscopy in the field of infrared spectrum in order to develop a technology for identifying different types of plastics during their sorting for further processing or disposal.*

*The method of solid waste sorting on the basis of visual spectrometry was proposed in the work, which allowed to obtain the optimal technological process of identification and separation of different types of plastics. The prototype of the module for sorting of plastics is developed, the basic principles of its functioning are considered.*

**Keywords:** automation, utilization, solid household waste, spectrometry, plastic sorting module.

*Fig.: 7. Table: 2. References: 7.*

**Стельмах Наталія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри виробництва приладів Національний Технічний Університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Stelmakh Nataliia** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Instrument Production Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** n.stelmakh@kpi.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1876-2794>

**Сапон Сергій Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій машинобудування і деревообробки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна)

**Sapon Serhii** – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of machine building technology and wood processing department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** s.sapon@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>

**Researcher ID:** G-7764-2014

**SCOPUS Author ID:** 56736964700

**Бельман Олег Ігорович** – магістр зі спеціальності автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології, Національний Технічний Університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Belman Oleg** – master in Automation and Computer-Integrated Technologies, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** o\_belman@ukr.net