

## РОБОТИЗИРОВАННАЯ СОРТИРОВКА ОСНОВНЫХ ВИДОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

**А. С. ЛАЗЕРКО, канд. техн. наук В. М. ЧЕРТКОВ, Г. Ф. КОНАПЛЕВА**  
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)

**Аннотация.** Проводится анализ существующих и эффективных методов роботизированной сортировки твердых бытовых отходов. Описываются основные этапы сортировки твердых бытовых отходов согласно этим методам.

**Ключевые слова:** твердые бытовые отходы, машинное зрение, манипуляторы, тактильные датчики, роботизированная сортировка.

**Введение.** Твердые бытовые отходы (ТБО) на сегодняшний день превратились в глобальную проблему. С XIX века количество мусора стало увеличиваться в геометрической прогрессии, что дополнялось постоянно растущим спросом на новые товары. Результатом этого являются огромные свалки, заполненные тысячами тонн отходов. Это приводит к разрушению озонового слоя, отравлению людей и животных токсичным дымом в результате горения свалок. Свалки служат ореолом обитания насекомых, птиц и грызунов, которые являются переносчиками инфекций.

Один из вариантов решения экологической проблемы это – сжигание мусора с целью прекращения его накопления на свалках и предотвращения интоксикации почвы. Однако данное действие не является экологически чистым. В воздух выбрасывается огромное количество углекислого газа, токсинов. Так же сжигание мусора не является выгодным и в экономическом плане. Поэтому люди стали прибегать к разделению мусора. Сортировка мусора проходит в основном вручную с помощью движущегося конвейера. Поэтому внедрение и использование автоматизированной сортировки с помощью роботов является актуальной задачей по улучшению экологии [1].

Основные достоинства роботизированной сортировки ТБО: снижение экономических затрат на ручную переработку (зарплаты рабочим); не подвергание людей опасности со стороны токсинов при сортировке ТБО; увеличение эффективности сортировки ТБО [2].

Рассмотрим перспективные методы автоматизированной сортировки с помощью роботов.

**Метод роботизированной сортировки с использованием машинного зрения.** Основной способ сортировки ТБО в современном мире. Он использует

машинное зрение и продвинутую интеллектуальную систему управления. Информация с камер и датчиков передаётся в интеллектуальную систему управления, которая для улучшения точности сканирования использует спектрометр и управляет манипуляторами захватами.

Данный метод включает последовательное выполнение этапов по сортировке ТБО.

Первый этап: Отделение пыли, песка и мелкого шлака. На конвейере идет процесс отделение основного мусора от мелких частей радиусом меньше 5 см, путём использования промышленного сита и воздушного потока. Размерами ячейки решётки сита регулирует интеллектуальная система управления.

Второй этап: Отделение очень крупных частей мусора для дробления. Сканер определяет размеры предмета и передаёт информацию в систему управления. Камера распознаёт предметы размер которого превышает 1 метр и подаёт команду манипулятора. Манипуляторы переносят эти объекты в отсек для дробления. После процесса дробления образованные фрагменты продолжают путь по конвейеру.

Третий этап: Отделение металлических объектов. С этим этапом помогают металлоискатели и электромагнитная сепарация. Извлечение металлических частей с помощью переменного магнитного поля.

Четвертый этап: Сортировка основных типов ТБО с помощью машинного зрения. После предыдущих этапов ТБО по конвейеру подает на участок сенсоров. Сенсоры распознают каждый фрагмент мусора и передают в систему интеллектуального управления информацию о его геометрическом расположении на ленте конвейера, размер и распознанный вид материала (пластик, дерево, стекло и т. п.).

Интеллектуальная система имеет несколько цифровых камер для использования функций машинного зрения, обеспечивающих распознавание объектов в конкретной области на ленте конвейера. Программное обеспечение интеллектуальной системы реализует распознавания образов на основе сверточной нейронной сети и формирует список фрагментов с вычисленными параметрами (размер, вид материала, ориентация на ленте) для дальнейшей сортировки. Результат работы ПО представлен на рис. 1 в виде компьютерного представления расположения фрагментов мусора на ленте конвейера.

Когда фрагмент достигает зоны действия манипулятора, последний получив рассчитанные значения размеров, положения и тип материала осуществляет захват и снятие его с конвейера. Далее помещает фрагмент в контейнер с соответствующим типом материалов. Работа манипулятор представлена на рис. 2.

Не исключено, что некоторые фрагменты мусора не будут распознаны с высокой степенью вероятности. В этом случае манипуляторы не станут их сортировать. Нераспознанные фрагменты будут доставлены конвейером в специальный

сборник, откуда их снова подадут в начало конвейера для повторного распознавания. При другом расположении на ленте и относительно друг друга эти фрагменты удастся правильно распознать. Процесс будет продолжаться, пока вся партия мусора не окажется разложена в соответствии с типом материалов.

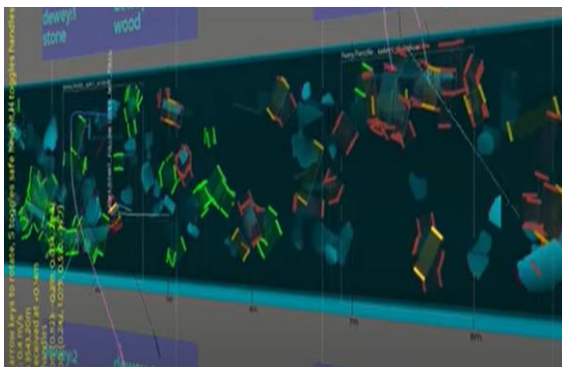


Рисунок 1. – Компьютерное представление расположения объектов на ленте конвейера



Рисунок 2. – Манипуляторы по сортировке мусора

Точность определения материалов зависит от степени обучения искусственного интеллекта (ИИ). Система запоминает внешний вид предметов, цвет и отраженный спектр. Скорость распознавания и количество распознаваемых материалов зависит от производительности нейросети. Машинное зрение может обрабатывать данные по различным показателям одновременно благодаря использованию высокопроизводительных нейросетей. Более 90% процентов всех существующих компаний используют данный метод для сортировки ТБО [5].

Список существующих компаний, использующих машинное зрение в роботизированной системе для сортировки тверды бытовых отходов:

- робот *SamurAI* от *Canada's Machinex Technologies*. Распознает машинным зрением пластик, картон, коробки, упаковки. Точность робота уже равна точности человека;

- российский робот для сортировки отходов от *ГК «Экологические и энергетические технологии»*. Распознает 20 видов пластмассы среди другого мусора, который движется по конвейеру, за счет не просто камер, а спектрометра, который сканирует по химсоставу и цвету;

- финская компания *ZenRobotics* разработала промышленного робота и ПО для переработки мусора. Сенсоры системы постоянно наблюдают за потоком твердых отходов, а программа анализирует данные в реальном времени. В результате мусор сортируется быстро и аккуратно.

**Метод с использованием датчиков давления.** Благодаря данному методу роботизированная система способна определять тип материала с помощью

тактильных сенсоров. Такая система способна определить, является ли объект деревом, металлом или пластиком. Система включает в себя мягкую тефлоновую руку, которая использует тактильные датчики на кончиках пальцев для определения размера и жесткости объекта. Внешний вид манипулятора, оснащённого тактильной системой представлен на рис. 3.

Данный метод оказался на 85 процентов точным при обнаружении материалов в неподвижном состоянии и на 63 процента точным на реальной моделируемой конвейерной ленте. Наиболее распространенной ошибкой было распознавание металлических банок, прикрытых бумагой. Они идентифицировались как бумага.

Дальнейшее развитие таких систем это использование сенсорной кожи для захвата робота, которая обеспечивает тактильную обратную связь, позволяющая ему различать широкий спектр объектов, от жестких до мягких. На рис. 4 представлен робот-манипулятор, имеющий тефлоновые пальцы.



**Рисунок 3. – Процесс сортировки ТБО роботизированной системой с датчиками давления**



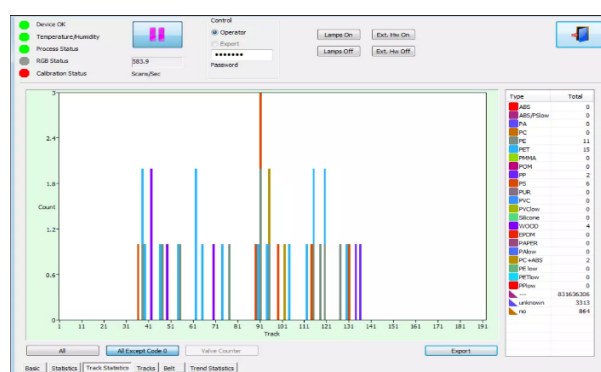
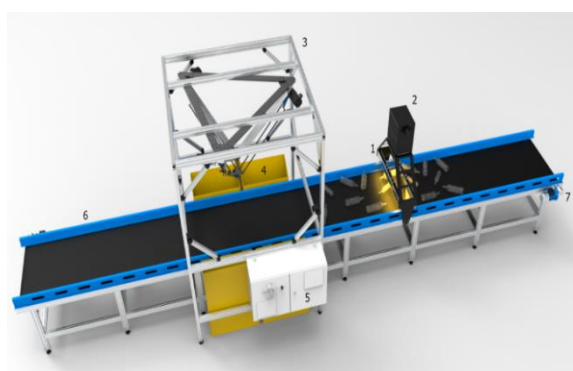
**Рисунок 4. – Тактильная система**

Когда система захватывает предмет он проводит оценку размера объекта, а затем использует свои два датчика давления для измерения силы, необходимой для захвата объекта. Эти показатели — наряду с калибровочными данными о размерах и жесткости объектов различных типов материалов — являются тем, что дает захватчику представление о том, из какого материала изготовлен объект. Поскольку тактильные датчики также являются проводящими, они могут обнаружить металл по измеренному изменению электрического сигнала. Робот оценивает размер и измеряет разницу давления между текущей закрытой рукой и тем, значением при нормальном состоянии открытой руки. Система управления использует эту разницу давления и размеры для классификации объектов на основе имеющейся информации о уже измеренных объектах.

В качестве следующего шага развития подобных систем это сопоставление тактильных данных с фактическими видеоданными с цифровых камер робота.

Это позволит повысить точность и обеспечить более тонкую дифференциацию между различными видами материалов [3].

**Метод химического анализа.** Данный метод, как и прошлые использует движущийся конвейер. Сортируемый мусор поступает на начало конвейерной ленты и продвигается к роботу-манипулятору. По мере движения он пересекает световой луч, который и анализирует химический составу, для анализа по химическому составу используют спектрометр. Помощь спектрометру оказывают камеры машинного зрения, производится отбор пластика по нескольким критериям: геометрия тары (все пластиковые банки, бутылки, тарелки, упаковки и т. п. имеют близкую геометрию, стеклянная тара имеет постоянный химический состав).



а

б

- а – роботизированный комплекс: 1 – источник света, 2 – сканирующее устройство, размещенное над лентой, 3 – робот-манипулятор с системой управления, 4 – мусорные контейнеры, 5 – блок содержащий программное обеспечение, 6 – конвейер;  
б – программное обеспечение для химического анализа

Рисунок 5. – Роботизированный комплекс по сортировке ТБО методом химического анализа

Поэтому, возможно научит систему промышленного зрения отбирать те продукты и с той геометрией, сведения о которой хранятся в ее базе. Цвет ТБО (пластиковые упаковки разнообразны по цветам, но чаще всего имеют несколько основных: белый, прозрачный, синий, красный, желтый, зеленый и коричневый).

Далее система, состоящая из робота, системы управления и промышленного компьютера с собственным ПО, анализирует и подает сигнал роботу, в каком месте на конвейере находится фрагмент, его размеры и тип материала. Это нужно для правильного позиционирования вакуумного захвата. На сегодняшний день комплекс определяет и сортирует по своему химическому составу следующие виды материалов: стеклянные, пластмассовые и бумажные [4].

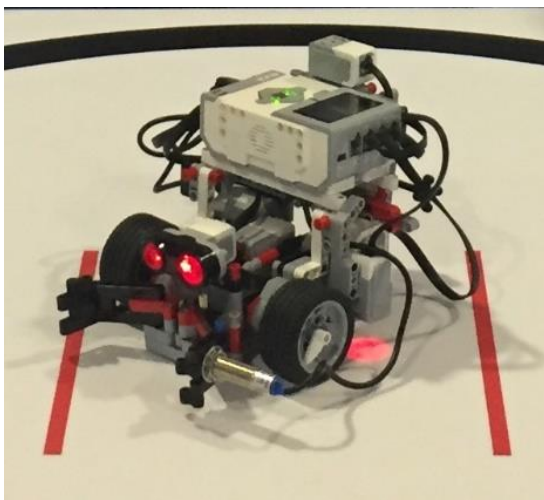
**Разработка робота сортировщика на базе образовательной платформы LEGO.** На данный момент, в Полоцком государственном университете существует база для создания прототипов роботизированной сортировки на базе образовательного набора LEGO Mindstorms EV3. Для проектирования робота, который

способен сортировать мусор, была разработана блок-схема проведения эксперимента, включающая следующие этапы:

*Первый этап.* Изучение требований к сортируемым объектам. В первом разделе мы выбрали три вида объектов: металл, стекло, пластмасса. Главной задачей робота будет различение этих трех объектов.

*Второй этап.* Выбор платформы и модели для построения робота. Для разработки робота выбрана образовательная платформа LEGO Mindstorms EV3 [6]. Данная платформа позволяет создавать сложные робототехнические конструкции. Также позволяет для них составлять программу, которая позволяет роботу работать автономно, без участия человека. В качестве модели был выбран передвижной робот с клешней-захватом.

*Третий этап.* Выполнена сборка модели. Также были внесены изменения в конструкцию робота, вставлен дополнительный магнитный датчик, который позволил различать металлические объекты. Принцип выделения металлических объектов заключается в следующем: робот с помощью своей клешни захватывает объект. Если происходит срабатывание магнитного датчика, то объект считается металлическим. Внешний вид робота с магнитным датчиком представлен на рис. 6.



**Рисунок 6. – Робот сортировщик твердых бытовых отходов**

*Четвертый этап.* Составлена программа в среде LEGO Mindstorms. Программа заключалась в следующем: робот начинает крутиться вокруг своей оси. При попадании предмета в область ультразвукового датчика робот осуществляет захват этого предмета. Затем робот начинает выполнять анализ материала, из которого предмет состоит. Если в это время срабатывает магнитный датчик, то робот принимает решение что он захватил металлический предмет. Если магнитный датчик не сработал, то робот пытается сдвинуть предмет. Если роботу удастся немного сдвинуть предмет после его захвата, то робот принимает решение, что он захватил пластмассовый предмет. В обратном случае будет принято решение, что захвачен стеклянный предмет.



*Пятый этап.* Для организации эксперимента по различению объектов из стекла, металла и пластмассы были выбраны следующие предметы: металлическая банка от напитка, пустая пластмассовая бутылка от напитка и стеклянная бутылка от напитка.

Эксперимент проводился на пластиковой ровной поверхности. Робот размещался в центре круга диаметром 1 метр. Робот начинал вращаться вокруг своей оси по часовой стрелке. На поле выставлялся один предмет. Робот при обнаружении предмета подъезжал к нему, производил захват и звуковым сигналам сообщал тип захваченного предмета. После робот отвозил предмет за пределы круга и возвращался в первоначальное положение. Далее выставлялся предмет другого вида.

На протяжении всего эксперимента было выставлено 90 предметов, по 30 каждого вида. Результаты распознавания предметов представлены в таблице.

Таблица. – Результаты эксперимента по распознаванию предметов

Наименование предмета	Количество выставленных раз	Количество правильных распознаваний	Количество неправильных распознаваний
Металлическая банка	30	30	0
Пластмассовая бутылка	30	23	7
Стеклянная бутылка	30	27	3

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанный робот справился с поставленной задачей. Для уменьшения количества неправильных распознаваний необходимо усовершенствование конструкции робота и подключение новых датчиков.

**Заключение.** Вывозить на полигон для захоронения все подряд нельзя. Твердые бытовые отходы должны быть предварительно отсортированы. Это позволит отсортированные твердые бытовые отходы использовать в качестве вторичного ресурса для новых материалов. Замена ручного труда по сортировке ТБО на мусоросортировочных предприятиях позволит снизить затраты на персонал, не подвергать людей опасности со стороны токсинов при сортировке ТБО и увеличить эффективность сортировки ТБО тем самым улучшить экологию.

Проведенный эксперимент показал, что разработанная конструкция робота сортировщика имеет высокий процент распознавания предметов. Следовательно, применение роботов для сортировки твердых бытовых отходов будет эффективным по улучшению экологии. Дальнейшее развития направления по проектированию робота сортировщика это – расширение линейки сортируемых

отходов, которые могут быть задействованы для вторичной переработки и производства новых предметов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эрнст Вайцзеккер, Майкл Х. Смит, Карлсон Харгроуз. Фактор пять. Формула устойчивого роста. Аст-Пресс, 2013.
2. Катрин де Сильги. История мусора: От средних веков до наших дней.
3. <https://news.mit.edu/2019/mit-robots-can-sort-recycling-0416>.
4. <https://vc.ru/tribuna/65282-robotizirovanny-kompleks-vektor-dlya-sortirovki-plastikovyh-othodov>.
5. <https://habr.com/ru/post/402311/>.
6. Овсяницкая, Л. Ю. Курс программирования робота EV3 в среде Lego Mindstorms EV3 / Л. Ю. Овсяницкая, Д. Н. Овсяницкий, А. Д. Овсяницкий. – Издательство «Перо» .