



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

---

**Факултет за германско инженерно обучение и промишлен  
мениджмънт  
Докторантско училище**

**Маг. инж. Димитър Илиев Илиев**

**МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА  
ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ВГРАДЕНИ СИСТЕМИ  
ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ ОТПАДЪЦИ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен  
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електронизация

**Научен ръководител: Проф. дн инж. Марин Беров Маринов**

**Съръководител: Проф. д-р Франк Ортмайер**

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Съвета на Докторантско училище към Факултета за Германско инженерно обучение и промишлен мениджмънт / Катедрен съвет на катедра „Електронна техника“ към Факултета по електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 17.07.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 31.10.2024 г. от 15.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-69 от 29.07.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Борислав Тодоров Ганев – председател
2. Доц. д-р инж. Любомир Валериев Богданов – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Младен Стоилов Милушев
4. Проф. д-р Кирил Методиев Алексиев
5. Проф. д-р инж. Тодор Атанасов Стоилов

Резервни членове:

1. Проф. д-р инж. Тодор Стоянов Джамийков
2. Проф. д-р инж. Никола Вичев Колев, дссн

Рецензенти:

1. Доц. д-р инж. Борислав Тодоров Ганев
2. Проф. д-р инж. Тодор Атанасов Стоилов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ФЕТТ на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1355.

Дисертантът е редовен докторант към Докторантско училище към Факултета за Германско инженерно обучение и промишлен мениджмънт. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Димитър Илиев

Заглавие: Методи и средства за оптимизиране на производителността на вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

# **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

---

## **Актуалност на проблема**

Глобалният проблем с електронните отпадъци (е-отпадъци) се характеризира от факта, че човечеството генерира много повече електронни отпадъци отколкото рециклира. През 2019 година глобалното количество електронни отпадъци е било 53,6 милиона тона (Mt), от които едва 9,3 Mt са били формално рециклирани. Поради ниският процент на рециклиране, глобалното количество електронни отпадъци расте ежегодно, което води до сериозни екологични и икономически последици. Съвременните системи за автоматично разпознаване на електронни отпадъци са ограничени да работят само в контролирани среди, като например над поточни линии, въпреки че голяма част от електронните отпадъци се натрупват в открити среди, като сметища. Текущите развития в алгоритмите за компютърно зрение за вградени системи създават възможност да се разработят вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци, които биха могли да работят в открити среди, но слабата производителност на тези системи в момента ги прави неприложими на практика.

## **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

Целта на тази дисертация е да се разработят методи и средства, необходими за оптимизиране на производителността на вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци, за да се стимулира провеждането на повече изследвания в тази област, които да допринесат за решаването на глобалния проблем с електронните отпадъци.

За постигането на тази цел са дефинирани следните шест задачи:

1. Да се анализира глобалният проблем с електронните отпадъци и да се намерят причините за него.
2. Да се направи литературен обзор и анализ на съвременните вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци.
3. Да се разработи вградена система за разпознаване на електронни отпадъци въз основа на най-добрите практики установени от извършеното проучване.
4. Да се разработят методите и средствата, необходими за измерване и оптимизиране на производителността на вградената система за разпознаване на електронни отпадъци.
5. Да се създаде набор от данни (dataset) с анотирани снимки на електронни отпадъци въз основа на класификацията UNU-KEYS.
6. Да се измери ефективността на предлаганите методи и средства за оптимизация, като се приложат върху разработената система.

## **Научна новост**

Един от основните причинители на глобалния проблем с електронните отпадъци е липсата на данни за тях. Вградените системи за разпознаване на е-отпадъци могат да се използват за автоматично събиране на данни за наличните е-отпадъци при условие, че системите се оптимизират за тази задача. Един от основните критерии за тези системи е класификацията, която генерират, да бъде съвместима с тази на региона в който работят. Тъй като все още няма глобално приета дефиниция за термина „електронен отпадък“ много държави по света са създали свои собствени дефиниции. Вместо да се създава отделна система за разпознаване на е-отпадъци за всеки регион, се установи, че може да се използва UNU-KEYS класификацията за разработването на една универсална система за разпознаване на е-отпадъци. Това е възможно благодарение на връзките между UNU-KEYS класификацията и множество съвременни класификации, като например Директивата относно отпадъци от електрическо и електронно оборудване (ОЕЕО) на Европейския Съюз и Хармонизираната система за описание и кодиране на стоките.

UNU-KEYS класификацията е използвана за създаването на набор от данни с анотирани снимки на електронни отпадъци. След това е обучен съвременен алгоритъм за машинно обучение на име Faster Object More Objects (FOMO) върху новосъздаденият набор от данни. Алгоритъмът е оптимизиран да работи с максимална точност и скорост на системата Arduino Nano 33 BLE Sense. Системата е оптимизирана допълнително чрез прилагането на метод за намаляване на консумираната ѝ мощност.

Резултатите от дисертационното изследване доказват, че може да бъде създадена универсална и нискобюджетна вградена система за разпознаване на електронни отпадъци след прилагането на нужните методи за оптимизация.

## **Практическа приложимост**

Разработените методи и средства за оптимизиране на производителността на вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци са валидни както за Arduino Nano 33 BLE Sense, така и за други системи, защото са общо приложими.

Разработеният софтуерен инструмент за визуализация и запазване на изходните данни от системата, представен в трета глава и модифициран в пета глава, е приложим за всички системи използващи изображения с формат RGB565.

Разработеният набор от данни с анотирани снимки на електронни устройства, представен в четвърта глава, може да се използва за множество други проекти, дори извън контекста на глобалния проблем с електронните отпадъци. Свободният достъп до този набор от данни и множеството формати под които може да бъде изтеглен го правят широко приложим при обучаването на конволюционни невронни мрежи за разпознаване на електронни устройства. Структурирането на този набор от данни около UNU-KEYS

класификацията улеснява неговото разширяване и доразвиване, за разлика от други набори от данни които нямат ясно дефинирана структура.

Предложените методи за разработка и оптимизация на вградени системи за разпознаване на е-отпадъци могат да бъдат използвани за автоматизирането на множество процеси за обработка на електронни отпадъци, например автоматично събиране на е-отпадъци, автоматично отделяне на е-отпадъци от битови отпадъци, автоматично сортиране, документиране и разглобяване на е-отпадъци и др.

### **Апробация**

Разработените методи и средства за оптимизиране на производителността на вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци са приложени върху действителна такава система, в резултат на което всеки един от измерените ѝ параметри са подобрили значително. Постигнатите резултати доказват валидността на предложените методи и средства.

### **Публикации**

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в шест научни статии, от които две са самостоятелни. Всички шест научни статии са написани на английски език и представени на международни конференции. Четири от статиите са индексирани в Scopus, а една от тях е също индексирана и в Web of Science.

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е в обем от **111** страници, като включва увод, **5** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **146** литературни източници, всички от които са на латиница, а **57** от тях са интернет адреси. Работата включва общо **49** фигури и **19** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

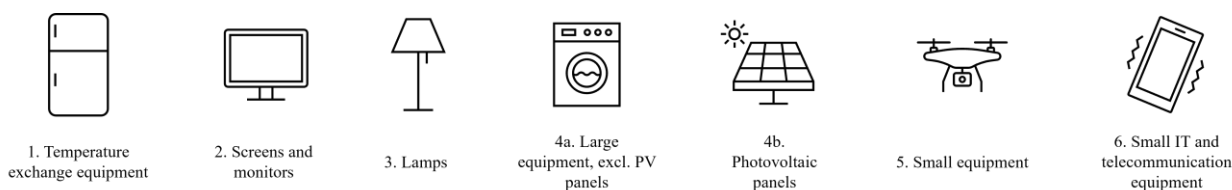
### ГЛАВА 1. ОБЗОР НА ГЛОБАЛНИЯ ПРОБЛЕМ С ЕЛЕКТРОННИТЕ ОТПАДЪЦИ

#### 1.1. Какво означава терминът електронен отпадък?

##### 1.1.1. Регионални дефиниции

Анализирани са дефинициите на Европейския Съюз, Норвегия, Швейцария, Съединени американски щати, Гана, Нигерия, Руанда, Бурунди, Кения, Танзания, Уганда, Южен Судан, Индия, Китай, Япония и Австралия.

Анализът показва, че дефиницията приета от най-много страни е тази описана в ОЕЕО Директивата на Европейския Съюз, позната още като категориите ЕС-6.



Фигура 1-1 Категориите ЕС-6.

##### 1.1.2. Институционални дефиниции

Анализирани са дефинициите за е-отпадък на инициативата „StEP“, организацията „РАСЕ“ и класификацията „UNU-KEYS“. Установено е че класификацията „UNU-KEYS“ е най-подходяща за целите на това дисертационно изследване поради подробното разграничаване на отделните категории електронни устройства и връзките между тази класификация и други съвременни класификации.

##### 1.1.3. Дефиницията за е-отпадък използвана в тази дисертация

Предвид факта, че повечето електронни отпадъци се генерират, когато потребителят реши да изхвърли своето електронно устройство и многото фактори, които могат да повлияят на това решение, не е изненадващо защо е толкова трудно да се дефинира терминът „електронен отпадък“. Въпреки това, правилното дефиниране на този термин е от съществено значение.

Твърде конкретното определение на електронните отпадъци в правните текстове може да създаде възможности за неправилно управление на електронните отпадъци, например чрез изнасянето им в държави, които нямат закони за безопасно рециклиране на електронни отпадъци. Дефиницията на инициативата StEP за електронни отпадъци гласи, че всички електронни продукти и техните части, изхвърлени от собственика, са електронни отпадъци, но както (Onyara, 2020) отбелязва, включването на думата „собственик“ в определението означава, че електронните продукти, изхвърлени от някой, който не е техен собственик, не са електронни отпадъци по това определение.

За съжаление, това създава парадокс за инженерите и юристите, тъй като инженерите имат нужда от много специфична дефиниция на електронните отпадъци, за да разработят технически решения за тяхната автоматична обработка, но от правна гледна точка, колкото по-специфична е дефиницията, толкова по-неадаптивна е тя към променящите се обстоятелства.

Класификацията UNU-KEYS е уникална в това отношение, тъй като предлага специфична класификация на електронните отпадъци, която е същевременно свързана с по-общата класификация ЕС-6. Класификацията ЕС-6 е част от Директивата за ОЕЕО на ЕС, чието определение за електронни отпадъци е прието от много страни и гарантира правната сигурност на директивата. Успехът на Директивата за ОЕЕО се подкрепя и от факта, че Европа е континентът с най-висок процент на формално събрани и рециклирани електронни отпадъци в света от 42,5%.

Поради тези причини, в дисертационния труд е избрано да се използва определението за електронни отпадъци, намиращо се в Директивата за ОЕЕО на ЕС, но UNU-KEYS класификацията е избрана да се използва за по-специфичното класифициране на различните видове е-отпадъци.

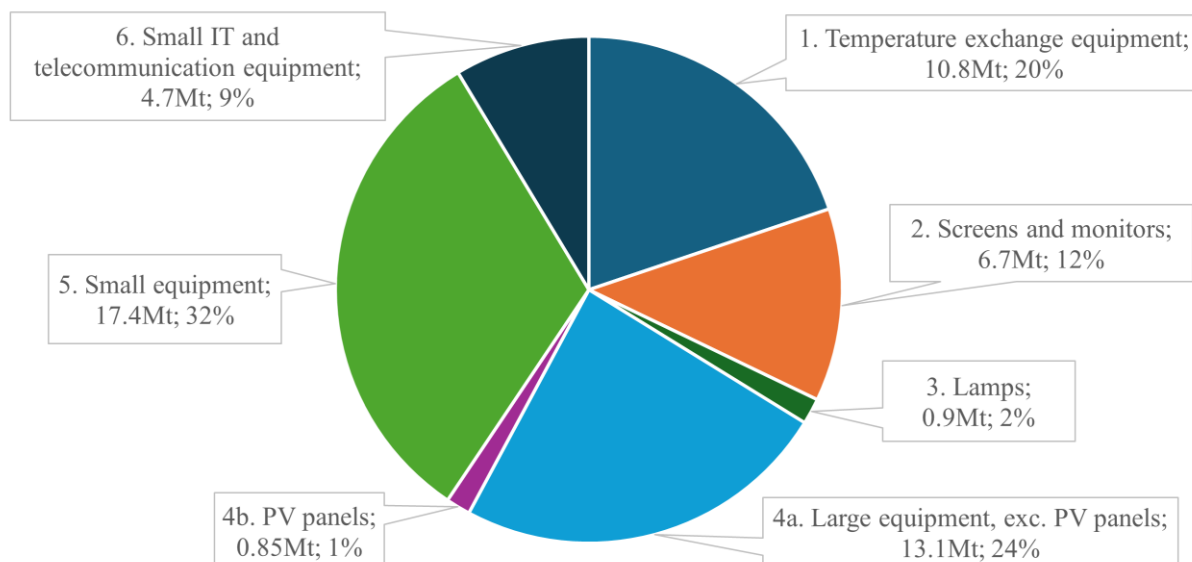
## **1.2. Въздействието на електронните отпадъци**

### **1.2.1. Върху човешкото здраве**

Неправилните практики за рециклиране на електронни отпадъци, които са често срещани в неформалния сектор, представляват заплаха за здравето на всички, които са изложени на токсичните вещества, които се съдържат в електронните отпадъци. (Forti et al., 2020) твърдят, че „отделните химични вещества в електронните отпадъци, като олово, живак, кадмий, хром, PCBs, PBDEs и PAHs, са известни с това, че оказват сериозна вреда на почти всяка органична система“. Най-новите изследвания в тази област установиха, че нерегламентираното рециклиране на електронни отпадъци е свързано с неблагоприятни последици за здравето на деца и възрастни.

### **1.2.2. Върху околната среда**

От 53,6 милиона метрични тона (Mt) електронни отпадъци, с изключение на фотоволтаични панели, генерирани през 2019 г., само 9,3 Mt са били официално рециклирани, което оставя 44,3 Mt неотчетени. Предполага се, че между 7 и 20% са били експортирани, а 8% са били изхвърлени в контейнерите за отпадъци и впоследствие са били изхвърлени в сметища или изгорени. Подобно неправилно обработване на електронните отпадъци замърсява земната, водната и атмосферната среда поради различните опасни вещества, съдържащи се в потока от електронни отпадъци, като живак, бромирани забавители на горенето (BFR), кадмий, олово, хром и газове, нарушаващи озоновия слой, като хлорофлуоровъглеродороди (CFC) и хидрохлорофлуоровъглеродороди (HCFC), които имат и висок потенциал за глобално затопляне.



Фигура 1-2 – Глобално разпределение на ЕС-6 категориите по тегло за 2019г.

ТАБЛИЦА 1-1 – ПОТЕНЦИАЛНА ТОКСИЧНОСТ НА КАТЕГОРИИТЕ ЕС-6.

1. Temperature exchange equipment	2. Screens and monitors	3. Lamps	4a. Large equipment, excl. PV panels	4b. Photovoltaic panels	5. Small equipment	6. Small IT and telecommunication equipment
Висока	Средна	Висока	Средна	Висока	Средна	Средна

ТАБЛИЦА 1-2 – ПОЛЗИ ЗА ОКОЛНАТА СРЕДА ОТ РЕЦИКЛИРАНЕТО НА КАТЕГОРИИТЕ ЕС-6.

1. Temperature exchange equipment	2. Screens and monitors	3. Lamps	4a. Large equipment, excl. PV panels	4b. Photovoltaic panels	5. Small equipment	6. Small IT and telecommunication equipment
Висока	Средна	Средна	Средна	Висока	Висока	Висока

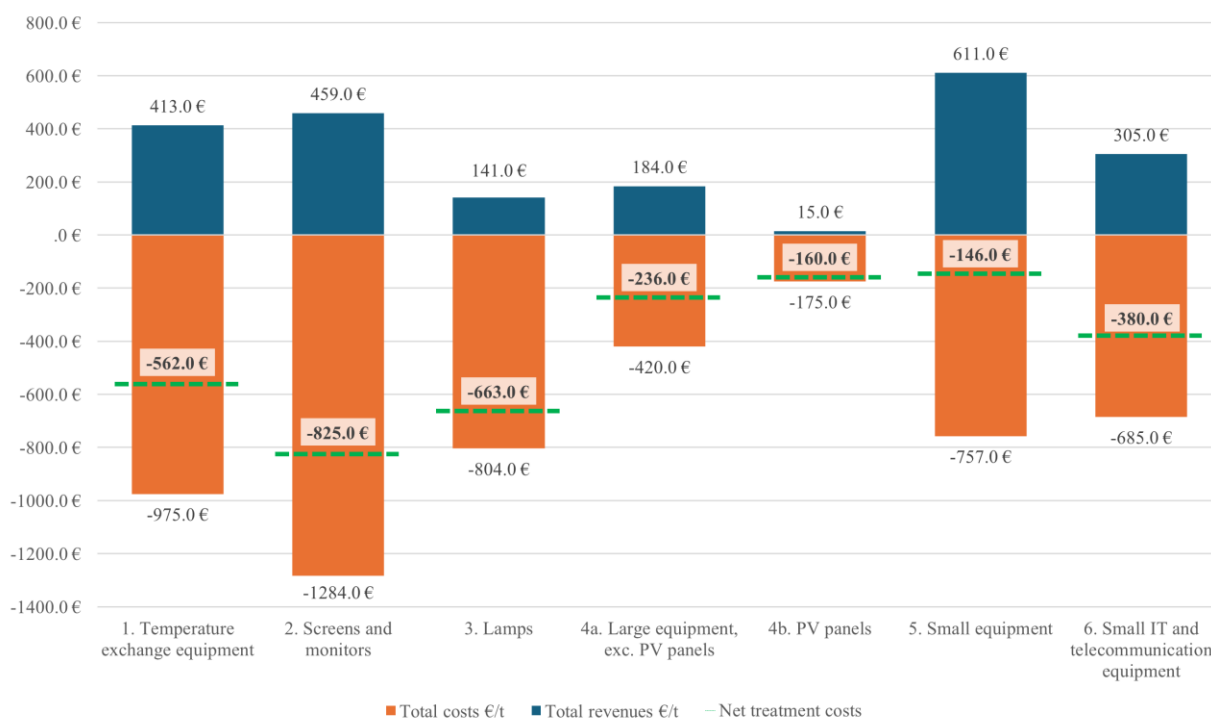
### 1.2.3. Върху икономиката

Икономическите ползи от правилното рециклиране на електронни отпадъци включват стойността на възстановените материали, генерирането на електрическа и топлинна енергия и създаването на работни места.

Електронните отпадъци се наричат от много експерти „градска мина“ поради съдържанието на много ценни материали, които, ако бъдат рециклирани, могат да се използват като вторични материали. Някои от ценните материали, които се съдържат в електронните отпадъци, са благородни метали (напр. злато, сребро, платина, паладий, рутений, родий, иридий и осмий), критични метали (напр. мед, кобалт, паладий, индий, германий, бисмут и антимон) и некритични метали (напр. алуминий, желязо). (Forti et al., 2020) докладват, че стойността на суровините в глобалното количество електронни отпадъци, генерирани през 2019 г., с изключение на



фотоволтаичните панели, „е приблизително 57 милиарда щатски долара“, където „желязото, медта и златото допринасят най-вече за тази стойност“. С настоящия официален процент на събиране и рециклиране от 17,4% „суровина на стойност 10 милиарда щатски долара се възстановява по екологично съобразен начин от електронни отпадъци в световен мащаб и 4 милиона тона суровини могат да бъдат предоставени за рециклиране“. Въз основа на данни от Magalini et al., категорията на електронните отпадъци в ЕС-6 с най-високи приходи от рециклиране и най-ниски нетни разходи за обработка е „5. Малко оборудване“. Разходите и приходите от рециклиране на един тон от всяка от категориите електронни отпадъци в ЕС-6 са показани на фигура 1-3.



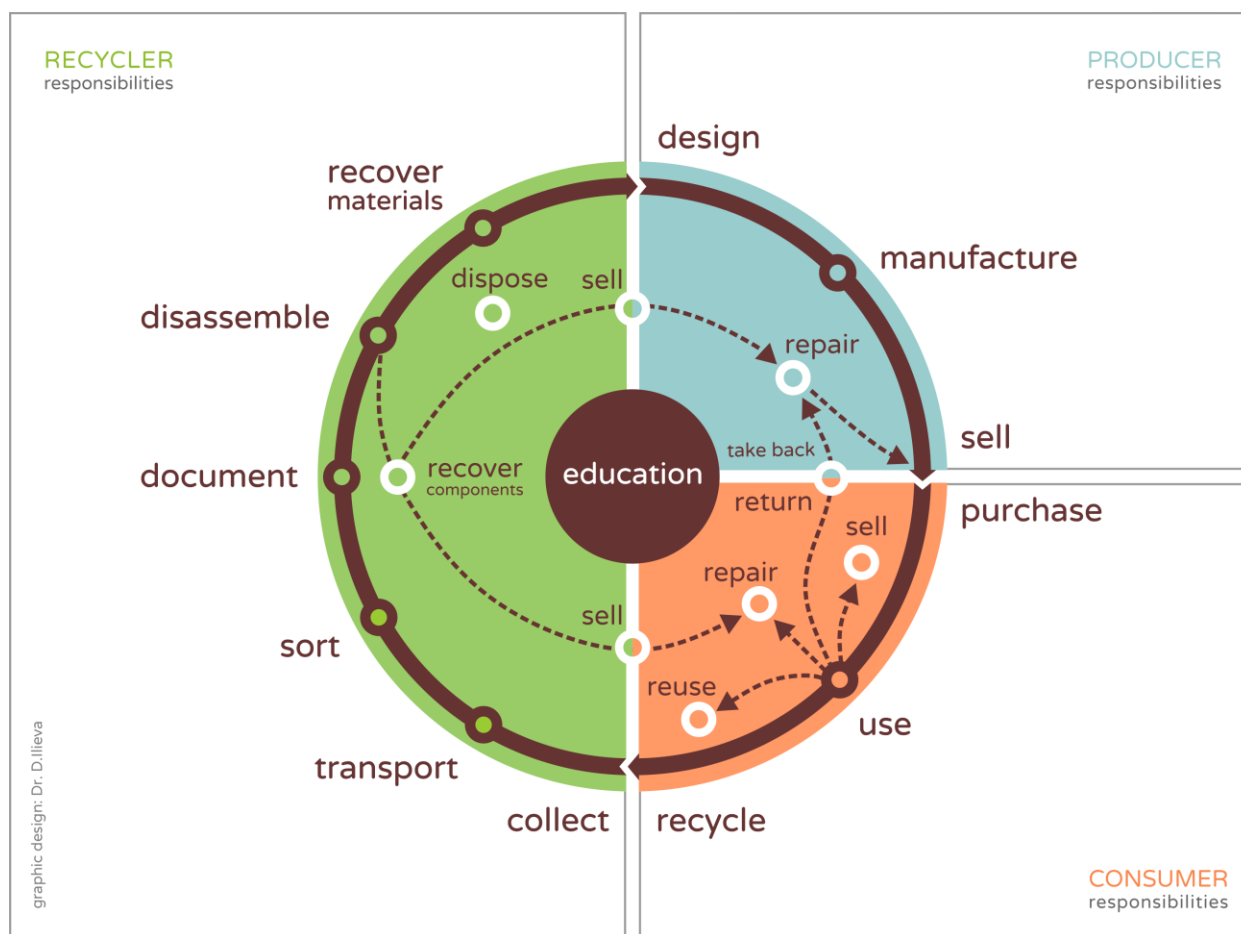
Фигура 1-3 – Разходите и приходите от рециклиране на един тон от всяка ЕС-6 категория.

#### 1.2.4. Обзор на ограничаващите фактори при управлението на е-отпадъци

В резултат от извършеният литературен обзор се установи, че основните процеси в жизнения цикъл на електронните отпадъци са проектиране, производство, продажба, закупуване, използване, рециклиране, събиране, транспортиране, сортиране, документирание, разглобяване и извличане на материали. Освен това е установено, че трите основни участника в управлението на електронните отпадъци са производителят, потребителят и рециклирацията. Основните отговорности на производителя са да проектира електронните устройства по начин, който улеснява рециклирането им, да произвежда и продава електронни устройства по екологичен начин и да предлага система за обратно приемане и ремонт на използвана техника. Основните отговорности на потребителя са отговорно да закупува и използва

електронни устройства, да удължава полезния живот на електронните устройства чрез повторна употреба, ремонт, продажба или връщане на своето използвано устройство и в краен случай да рециклира своето използвано устройство, вместо да го изхвърля с други отпадъци. След като потребителят даде своето използвано устройство за рециклиране и то стане е-отпадък, отговорност на рециклиращия е да събере, транспортира, сортира, документира и разглоби електронните отпадъци, да извлече ценните им компоненти и материали и да изхвърли безопасно вредните материали. Обучението относно отговорното производство, използване и рециклиране на електронни устройства е споделена отговорност между трите участника.

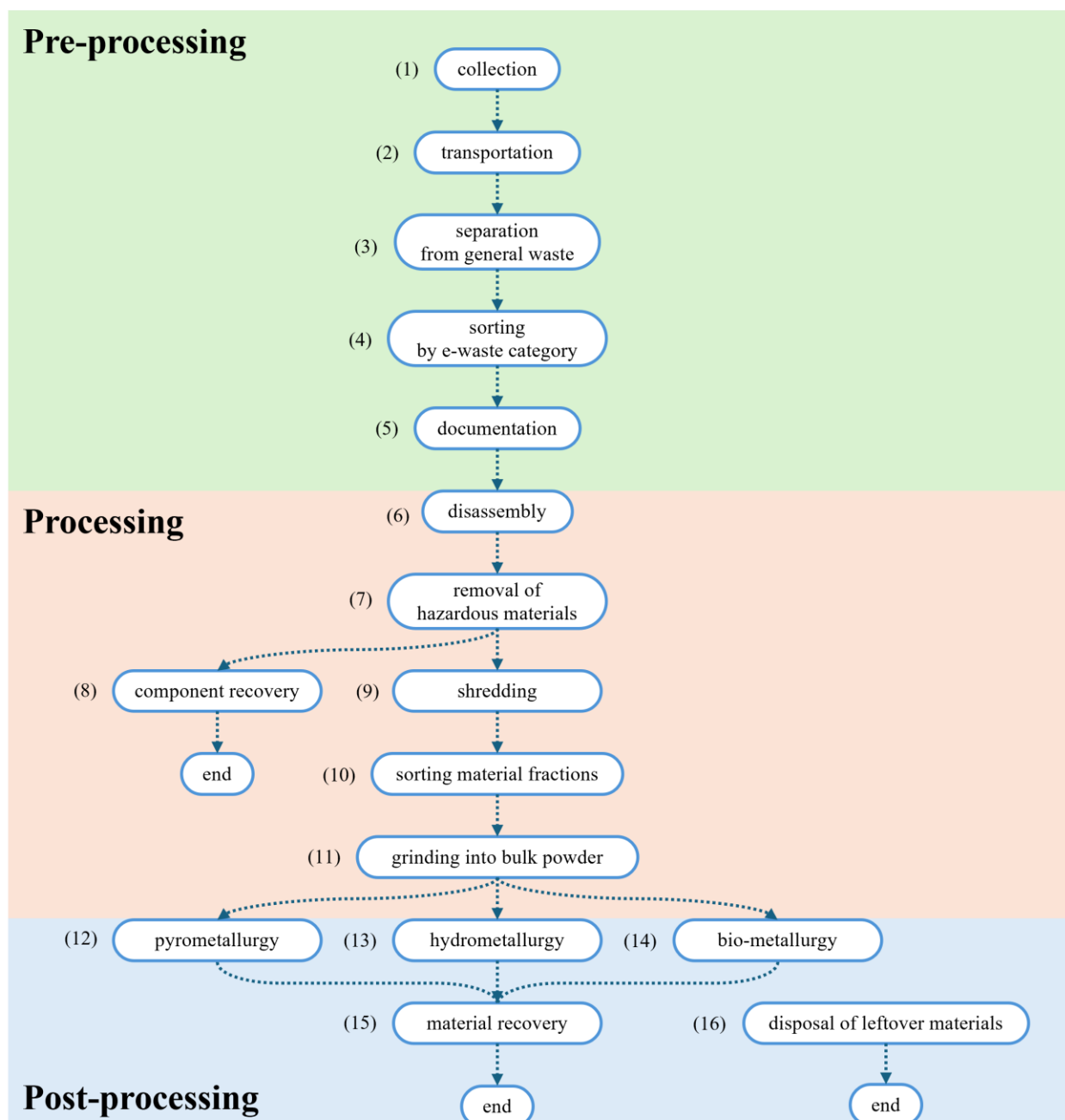
За по-добро разбиране на жизнения цикъл на електронните отпадъци, участниците в него и техните отговорности е създадена Фигура 1-4.



Фигура 1-4 – Жизнен цикъл на електронните отпадъци, участниците в него и техните отговорности.

В резултат на направения литературен обзор са установени следните процеси за управление на електронни отпадъци: събиране, транспортиране, отделяне от битовите отпадъци, сортиране по категории електронни отпадъци, документиране, разглобяване, отстраняване на опасни материали, възстановяване на компоненти, раздробяване, сортиране на материални фракции, смилане на насипен прах, възстановяване на материали чрез

пиро-/хидро-/био-металургичен процес и накрая изхвърляне на остатъчните материали. Тези констатации са обобщени на Фигура 1-5.



Фигура 1-5 – Процеси за управление на е-отпадъци.

Установено е, че основните ограничаващи фактори за автоматизиране на тези процеси са липсата на машинно четими характеристики на електронните отпадъци (например QR кодове), трудностите при разглобяването на електронните отпадъци поради използването на лепила и други неблагоприятни за рециклиране конструктивни решения и сложността на потока от електронни отпадъци, т.е. множеството видове продукти от електронни отпадъци и техните индивидуални изисквания за рециклиране.

### **1.3. Как вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци могат да допринесат за решаването на глобалния проблем с електронните отпадъци?**

#### **1.3.1. Необходимост от вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци**

Едно от основните предизвикателства пред управлението на електронните отпадъци, което може да бъде адресирано чрез вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци, е липсата на данни за електронните отпадъци. Получаването на по-добри данни за електронните отпадъци може не само да помогне за увеличаване на официалния процент на рециклиране на електронни отпадъци, но и да намали генерирането на електронни отпадъци, които са двата основни аспекта на глобалния проблем с електронните отпадъци. (Forti et al., 2020) твърдят, че „Разработването на стабилни политики и правни инструменти може да бъде постигнато само с по-добри данни за електронните отпадъци. Разбирането на количествата и потоците на електронните отпадъци предоставя основа за наблюдение, контрол и в крайна сметка предотвратяване на незаконно транспортиране, изхвърляне и неправилно третиране на електронни отпадъци.“. Вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци могат да се използват за получаване на по-добри данни за електронни отпадъци, като се използват за разработване на AIoT системи и внедряването им в ключови области за генериране на електронни отпадъци. (Forti et al., 2020) твърдят, че: „На глобално ниво подобрите данни ще помогнат за минимизиране на генерирането на електронни отпадъци в резултат на преглед на предизвикателствата и наличие на основа за извършване на целенасочени политически интервенции.“. Тези твърдения се подкрепят и от Magalini et al., които заключават, че „трябва да се разработи подобро събиране на данни, анализ и разбиране, както и обща методология, за да се изведе ясна, добре дефинирана и постижима правна цел, която впоследствие да стимулира по-голямо събиране на ОЕЕО в Европа.

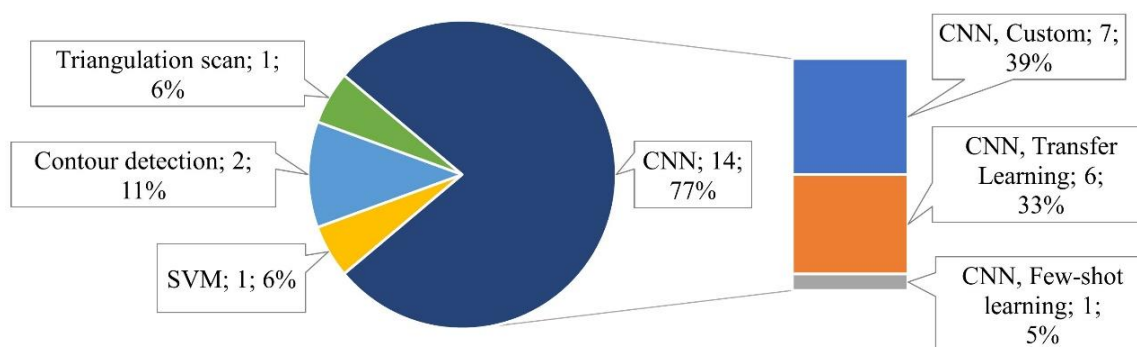
Друго предимство на вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци е, че те са значително по-енергийно ефективни в сравнение със сървърните решения. Освен това вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци могат да помогнат за увеличаване на създаването на работни места. Използването на тези системи за получаване на по-добри данни за електронните отпадъци ще увеличи разбирането ни за потенциалните нужди от рециклиране и ремонтване на електронни отпадъци, което „дава възможност за прогнозиране на потенциалното създаване на зелени работни места в секторите за ремонт и рециклиране“ (Forti et al., 2020).

Вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци могат да имат фундаментално положително въздействие върху глобалния проблем с електронните отпадъци чрез създаване на нови възможности за автоматизиране на процеси за управление на електронни отпадъци като събиране, документиране, мониторинг, сортиране по време на събиране,

локализиране на опасни електронни отпадъци и др. За да се разберат по-добре възможностите на тези системи, е направен структуриран обзор на литературата за най-съвременните вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци.

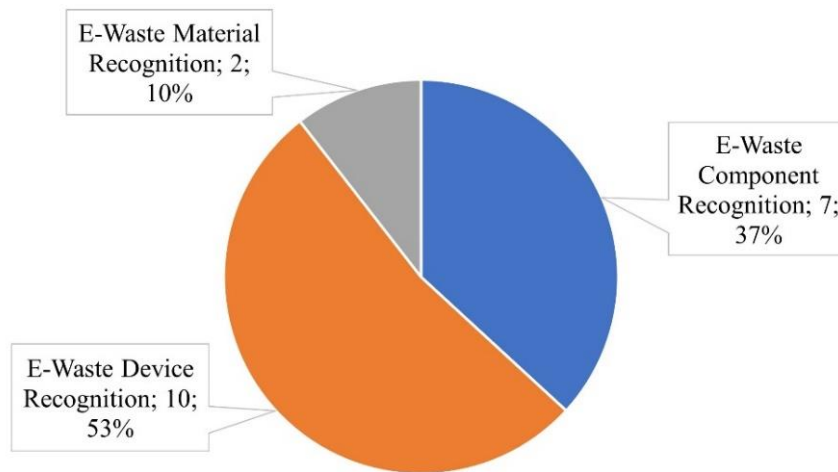
### 1.3.2. Обзор на най-съвременните вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци

За да се анализират текущите най-съвременни вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци, е извършено структурирано литературно проучване с помощта на модела за население, интервенция, сравнение, резултат (PICO). Целта на този обзор е да се разбере по-добре как са проектирани най-новите вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци. Поради тази причина се създаде шаблон за анотация на литературни източници, който съдържа седем въпроса за всеки прегледан литературен източник. Тези въпроси са: (1) какъв метод е използван за разпознаване на електронните отпадъци, (2) какъв хардуер е използван, (3) какъв набор от данни е използван, (4) колко типове обекти на електронни отпадъци (т.е. класове) може системата да разпознае, (5) колко ефективно системата изпълнява задачата си, (6) за каква цел е разработена системата за разпознаване на електронни отпадъци и (7) в кой процес на управление на електронни отпадъци е приложена.



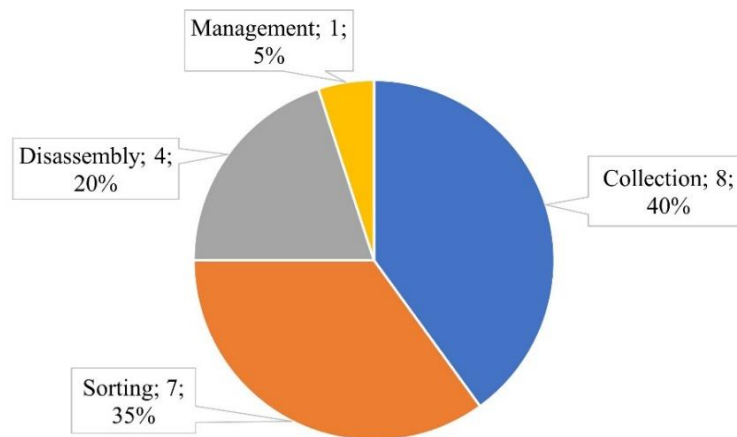
Фигура 1-6 – Методи за разпознаване на е-отпадъци.

Най-често използваният метод за разпознаване на е-отпадъци е с конволюционна невронна мрежа.



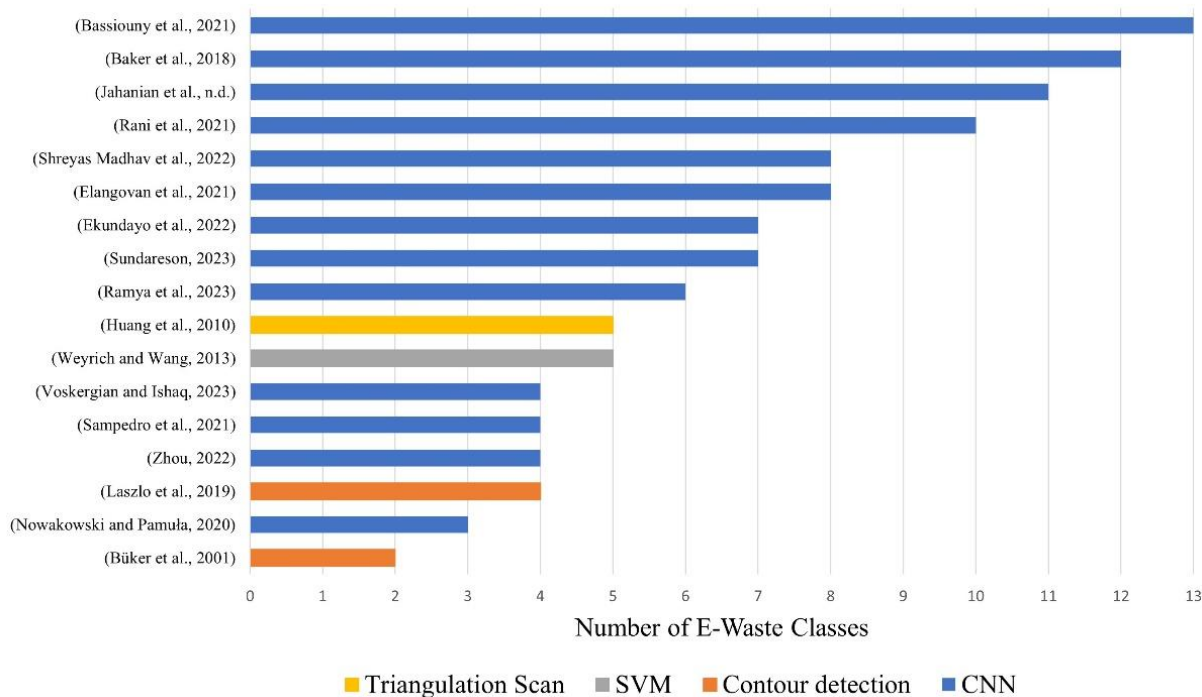
Фигура 1-7 – Цели на разгледаните системи за разпознаване на е-отпадъци.

Вградените системи за автоматично разпознаване на е-отпадъци са най-често проектирани да разпознават цели устройства.



Фигура 1-8 – Процесите по управление на е-отпадъци където системите за разпознаване намират приложение.

Вградените системи за разпознаване на е-отпадъци намират най-често приложение при процесите събиране и сортиране на е-отпадъци.

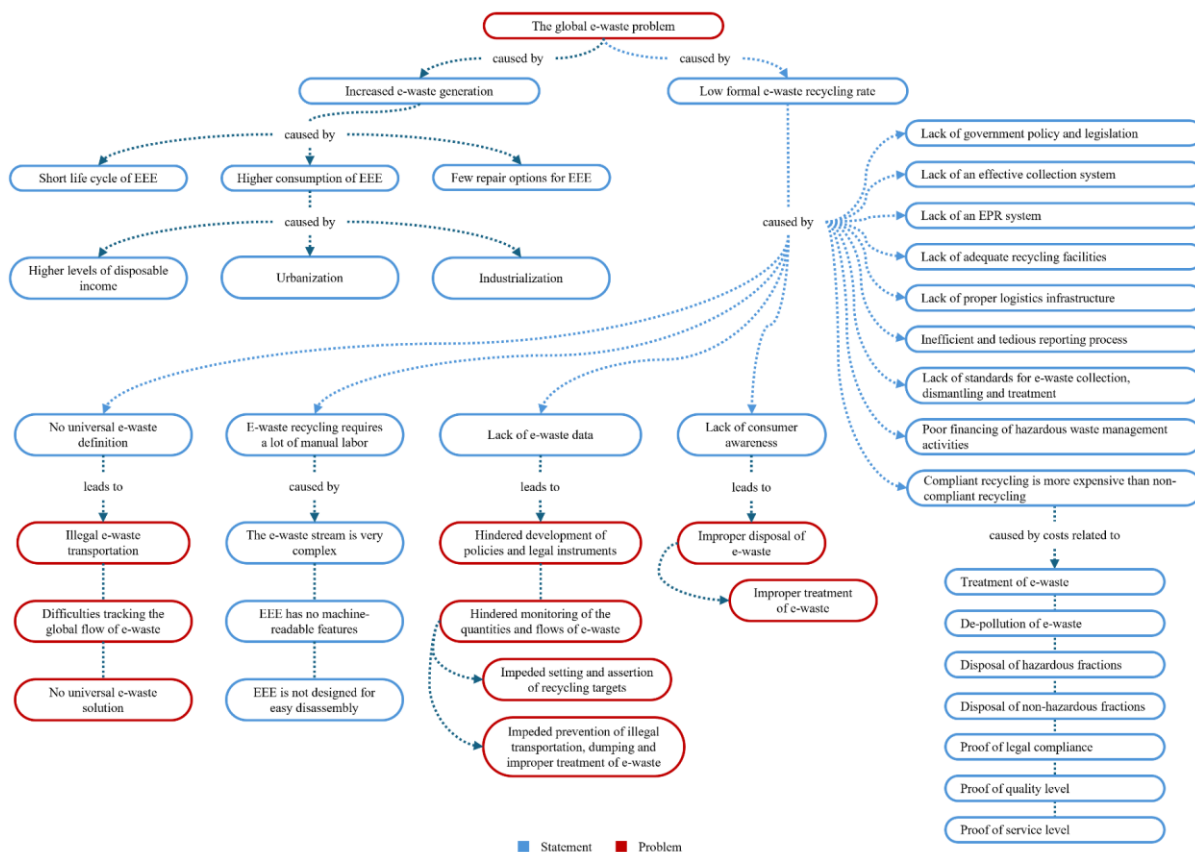


Фигура 1-10 – Сравнение между методите за разпознаване и броя разпознаваеми устройства.

Системите, способни да разпознават най-голям брой устройства, са тези, използващи конволуционна невронна мрежа, за да извършват разпознаването.

#### 1.4. Обобщение на глобалния проблем с електронните отпадъци, цел и задачи на дисертацията

Глобалният проблем с електронните отпадъци се характеризира с факта, че човечеството генерира повече електронни отпадъци, отколкото рециклира. Това поставя два въпроса: „Защо генерирането на електронни отпадъци се е увеличило?“ и „Защо нивото на формално рециклираните електронни отпадъци е толкова ниско?“. Отговорите на тези въпроси, както и основните причини за глобалния проблем с електронните отпадъци, са обобщени на Фигура 1-11.



Фигура 1-11 – Обобщение на глобалния проблем с електронните отпадъци и причините за него.

В резултат на това изследване, липсата на данни за електронните отпадъци е идентифицирана като една от основните причини за глобалния проблем с електронните отпадъци. По-добрите данни за електронните отпадъци могат да се използват за намаляване на генерирането на електронни отпадъци и за увеличаване на степента на рециклиране. Освен това по-добрите данни за електронните отпадъци биха могли да стимулират създаването на работни места в секторите на ремонтване и рециклиране. Последните постижения в областта на EdgeAI и AIoT технологиите позволяват да се обмисли използването на евтини и нискоенергийни вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци, за да се съберат автоматично повече данни за електронни отпадъци. Най-новите вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци показват обещаващи резултати, но те са много ограничени в броя на разпознаваемите обекти на електронни отпадъци и като цяло са неоптимизирани за поставената задача.

Ето защо целта на тази дисертация е да се анализира текущото състояние на вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци и да се разработят методите и средствата, необходими за оптимизиране на тяхната производителност, на базата на които да се създаде нова подобрена вградена система за автоматично разпознаване на електронни отпадъци. За постигането на тази цел са определени следните шест задачи:



1) Да се анализира глобалния проблем с електронните отпадъци и намерят основните му причини.

2) Да се проучи и анализира състоянието на съвременните вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци.

3) Да се разработи вградена система за разпознаване на електронни отпадъци, базирана на най-добрите практики на текущото състояние на техниката.

4) Да се разработят методите и средствата, необходими за измерване и оптимизиране на производителността на тази система.

5) Да се създаде набор от данни за електронни отпадъци за обучение на конволюционни невронни мрежи въз основа на класификацията UNU-KEYS.

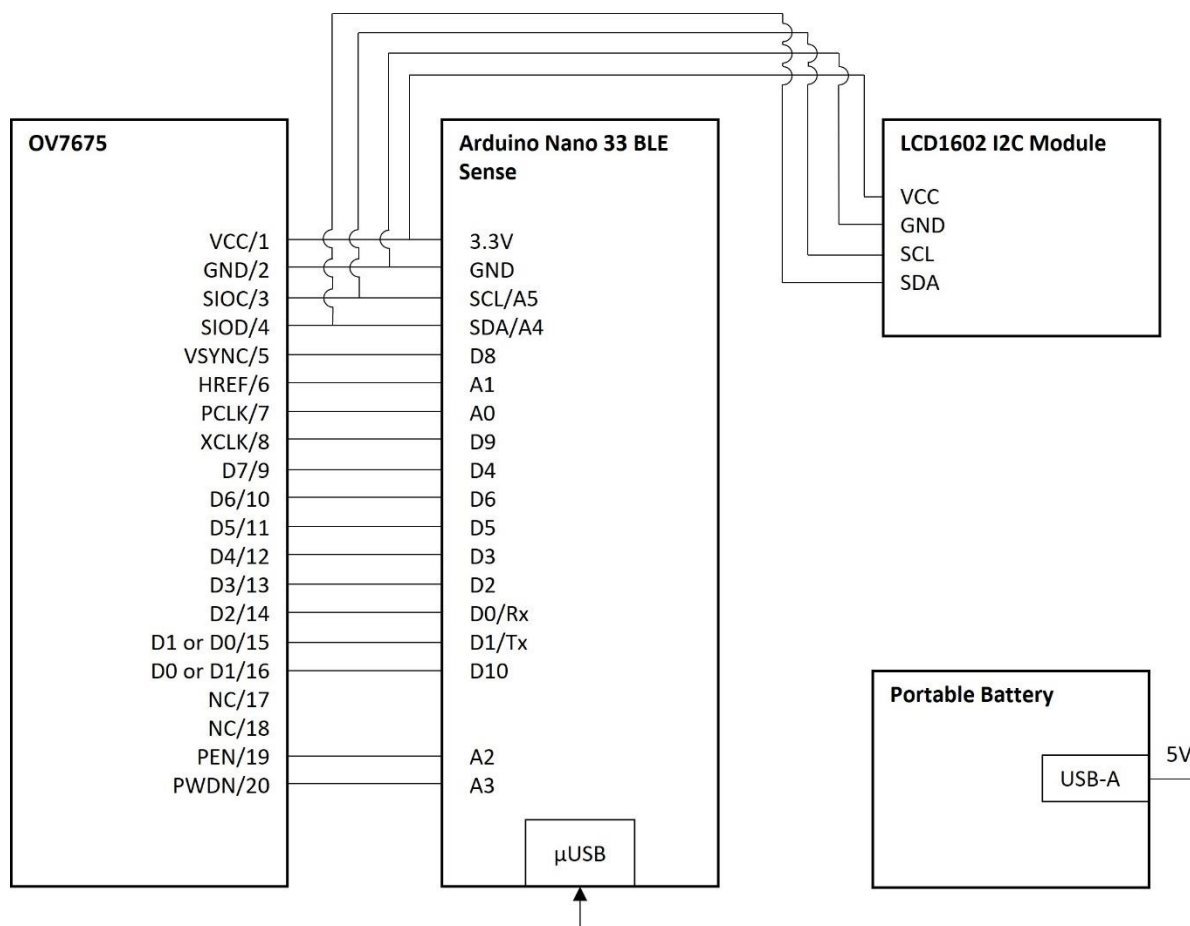
6) Да се измери ефективността на предложените методи и средства за оптимизация като се приложат на разработената система.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТВАНЕ НА ВГРАДЕНА СИСТЕМА ТИП „EDGEAI“ ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ ОТПАДЪЦИ**

### **2.1. Методология**

#### **2.1.1. Хардуер и софтуер**

Вградената система за разпознаване на електронни отпадъци е разработена използвайки комплекта „Arduino Tiny Machine Learning Kit“, който се състои от Arduino Nano 33 BLE Sense, камера модула „OV7675“ и специален „Arduino Shield“, който свързва тези компоненти. Освен това дисплей-модулът LCD1602 I2C от Waveshare е избран за визуализиране на резултатите от класификацията, тъй като е съвместим с нивото на напрежение от 3,3V на микроконтролера. Захранването се доставя на системата от преносима 3.7V/Li-Po батерия с изход от 5V, 1A през USB-A и типичен капацитет от 5100mAh/18.87Wh. Блоквата схема на системата е показана на Фигура 2-1.



Фигура 2-1 – Блокова схема на вградената система за разпознаване на е-отпадъци.

Edge Impulse е софтуер като услуга, който предоставя цялостна верига от инструменти за разработване на Machine Learning (ML) модели, оптимизирани за вградени устройства. Той предоставя инструменти за събиране, аотиране и обработка на данни, както и обучение на модели, тестването им и инсталирането им. Моделите, обучени на тази платформа, могат да бъдат експортирани като преносими C++ библиотеки или в този случай като библиотека на Arduino, което позволява на обучените модели да работят на микроконтролера, без да му е необходима интернет връзка или връзка със сървър.

### 2.1.2. Обучение на модела

Поради малките изисквания на моделите за класификация на цели изображения спрямо моделите за откриване на обекти и моделите за семантична сегментация, моделът за класификация на цели изображения MobileNetV1 се избира за тази система. Моделът е обучен върху малък набор от данни с три класа „фон“, „слушалки“ и „неизвестно“, който се състои от общо 202 снимки.

ТАБЛИЦА 2-3 – МАТРИЦА НА НЕТОЧНОСТИТЕ НА МОДЕЛА ВЪРХУ ТЕСТОВИЯТ НАБОР ОТ ДАННИ.

Предсказано \ Реално	Фон	Слушалки	Неизвестно
Фон	7	1	0
Слушалки	0	20	3
Неизвестно	2	2	9

### 2.1.3. Оценка на ефективността на модела

Използвайки данните от матрицата на неточностите могат да бъдат пресметнати точността на системата (Accuracy), както и параметрите Precision, Recall, F1-Score и Total Accuracy използвайки формулите (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) и (2.5).

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2.1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.3)$$

$$F1-score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (2.4)$$

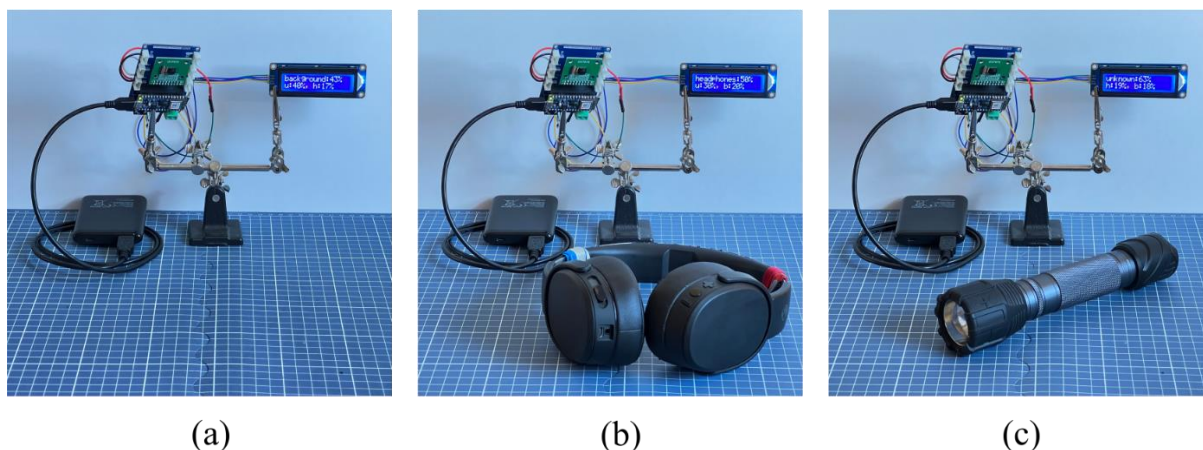
$$Total Accuracy = \frac{\sum_{i=0}^N TP_i}{TP_0 + TN_0 + FP_0 + FN_0} \quad (2.5)$$

където

$N$  е общият брой класове

$ii$  е индексният номер

## 2.2. Резултати



Фигура 2-5 – Вградената система за разпознаване на е-отпадъци: (а) клас “фон” правилно класифициран с 43% увереност на модела, (b) клас “слушалки” правилно класифициран с 50% увереност, и (c) клас “неизвестно” правилно класифициран с 63% увереност.

Ниските проценти на увереност са причинени от малкия набор от данни за обучение и близкото разположение на обектите до камерата, което доведе до частичното им излизане извън зрителното поле на камерата. Ниските проценти на увереност и ниските резултати за точност на модела показват необходимост от по-голям набор от данни за обучение.

Моделите за класификация на изображения са подходящи за случаи за разпознаване на електронни отпадъци, при които устройството за електронни отпадъци се снима изолирано от други обекти. Например в интелигентни контейнери за боклук, които са способни автоматично да сортират обекта, изхвърлен от потребителя. От друга страна, моделите за откриване на обекти са способни да разпознават различни видове електронни отпадъци и да локализируют позицията им в едно и също изображение. Тези възможности правят моделите за откриване на обекти по-подходящи за задачи за събиране на данни за електронни отпадъци от колкото моделите за класифициране на изображения.

## ГЛАВА 3. АНАЛИЗ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА РАЗРАБОТЕНАТА СИСТЕМА

### 3.1. Методология

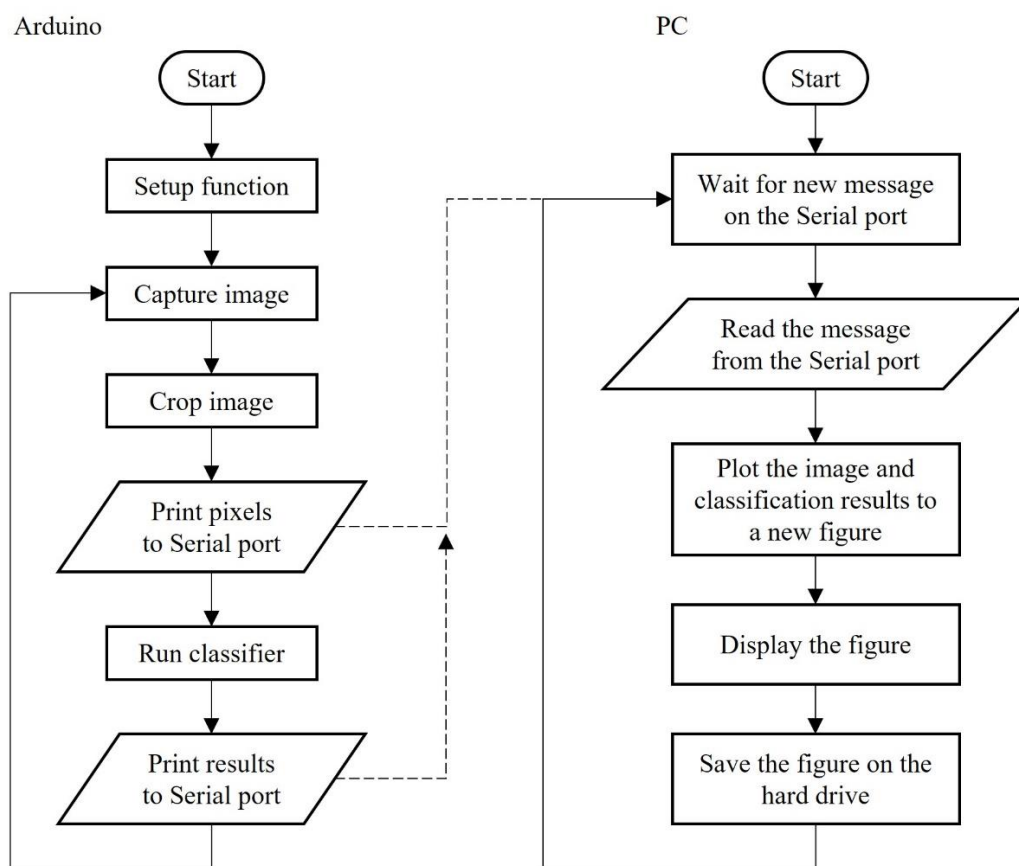
#### 3.1.1. Инструмент за визуализиране и запаметяване на изходните данни от системата

Вградената система, както е описана досега, само снима изображение и подава неговите пиксели към модела на вградения изкуствен интелект, който класифицира изображението и извежда резултата от класификацията на серийния монитор. Вградената система не визуализира заснетото изображение, което затруднява определянето дали обектът е в зрителното поле (FOV) на камерата, дали е добре осветен или дори на фокус. Поради това ограничение няма начин визуално да се съпостави резултатът от класификацията с изображението, на което е базиран. Освен това резултатите

от класификацията се извеждат, но не се записват. За решаването на тези проблеми е разработен софтуерен инструмент с цел визуализиране на изображението и съответната му класификация в реално време, както и запазване на получената фигура в енергонезависима памет. За да се избегне натоварването на вградената система с тази задача, инструментът за визуализация и запазване е разработен за компютър с езика Python и с библиотеката „matplotlib“.



Фигура 3-1 – Примерна фигура генерирана от инструмента за визуализиране и запазване.



Фигура 3-2 – Блоков алгоритъм на работа на вградената система (отляво) и паралелно на това инструмента за визуализация и запазване (отдясно).

### 3.1.2. Метод за измерване на класификационната производителност

За да се изчисли ефективността на класификацията на системата, са извършени 100 класификации за всеки клас изображения от различни разстояния, ъгли и при различни условия на осветление. Полученият набор от данни съдържа общо 300 изображения и е наречен „набор от експериментални данни“. След това коректността на всяка класификация е оценена ръчно чрез анализ на резултатите, генерирани от инструмента за визуализация и запазване. В резултат на тази оценка се създаде матрица на неточността, която сравнява прогнозираните стойности за всеки клас с действителните стойности. Параметрите Accuracy, Precision, Recall, F1-score и Total Accuracy на системата са получени от тази матрица на неточността използвайки уравненията (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) и (2.5). Резултатите са представени в Таблица 3-2.

ТАБЛИЦА 3-2 – ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТ НА МОДЕЛА ВЪРХУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИЯ НАБОР ОТ ДАННИ.

	Фон	Слушалки	Неизвестно
Accuracy	94.00%	87.67%	87.67%
Precision	91.00%	74.80%	93.15%
Recall	91.00%	95.00%	68.00%
F1-Score	91.00%	83.70%	78.61%
Total accuracy		84.67%	

### 3.1.3. Метод за измерване на бързодействието

Бързодействието на разработената система се определя като времето за изпълнение на един програмен цикъл, което зависи от продължителността на три операции: заснемане на изображение, предаване на пикселни данни и класификация. Функцията "micros()" е използвана за изчисляване на продължителността на тези три операции. С този метод продължителността на всеки процес може да бъде изчислена с точност от най-малко четири микросекунди, а получените стойности се отпечатват на серийния порт.

Общата продължителност на един програмен цикъл е 2,89 секунди, като средната продължителност на заснемане на изображение, отпечатване на неговите пикселни данни към серийния порт и извършване на класификация е съответно 1,96 секунди, 0,12 секунди и 0,81 секунди.

### 3.1.4. Метод за измерване на използваната памет

Паметта за Arduino Nano 33 BLE Sense може да бъде разделена на две категории: флаш памет, която съхранява програмния код, и SRAM, която съхранява временни данни или данни по време на изпълнение. Arduino Nano 33 BLE Sense има 1MB Flash и 256kB SRAM памет.

Измерването на използваната флаш памет на Arduino е тривиално, защото се отпечатва в конзолата в Arduino IDE всеки път, когато програмата се компилира.

SRAM се разпределя динамично, следователно функциите за проследяване на паметта на Mbed OS, са използвани за измерване на използваната SRAM по време на инициализация на програмата, заснемане на изображение, предаване на пикселни данни и класификация.

Извършените измервания на паметта показаха, че се използва 42,44% от наличната Flash памет. Пиковото използване на “stack” паметта е 7,25%, а пиковото използване на “heap” паметта е 14%. Въпреки че тези резултати показват, че има налична памет за побиране на по-голям модел на вграденото устройство, допълнителни подобрения могат да бъдат направени за намаляване на използваната памет, като например чрез намаляване на броя отпечатани съобщения. Това ще освободи повече SRAM. Като алтернатива може да се използва функцията „Serial.print(F(...))“ за съхраняване на текста на съобщенията във флаш памет, вместо в SRAM, като по този начин се запазват съобщенията, без да се заема SRAM. Друг вариант би бил просто да се използва микроконтролер с повече налична памет.

### **3.1.5. Метод за измерване на консумираната мощност**

Консумацията на енергия е измерена с Power Profiler Kit II (PPK2) от Nordic Semiconductor. PPK2 има обхват на измерване на ток от 200nA до 1A с превключване на динамичния обхват, което автоматично намалява напрежението на натоварването, когато системата консумира по-малко енергия, например, когато превключи в режим на заспиване, като по този начин предотвратява прекъсване. Разделителната способност на инструмента е между 100nA и 1mA в зависимост от текущия диапазон на измерване. Инструментът също има честота на дискретизация от 100ksps, което е достатъчно високо, за да открие пикове. И накрая, PPK2 може да се използва като логически анализатор, тъй като има осем цифрови входа, които могат да се четат едновременно. Тази функция се използва за измерване на консумацията на енергия на вградената система по време на трите основни операции на програмния цикъл.

Средната консумация на ток за един програмен цикъл е 33.19mA. Средната консумация на ток по време на процеса на заснемане на изображение е 32,85 mA. Той се повишава до 33,35 по време на предаване на пикселни данни и накрая достига 33,97mA по време на класификация.

Консумацията на енергия може да бъде намалена чрез намаляване на честотата на класификациите и поставяне на Arduino микроконтролера в режим на сън между класификациите. Светодиодът на захранването и всички неизползвани сензори също могат да бъдат изключени, за да се пести енергия.

## **ГЛАВА 4. СЪЗДАВАНЕ НА НАБОР ОТ ДАННИ С АНОТИРАНИ СНИМКИ НА ЕЛЕКТРОННИ ОТПАДЪЦИ**

Настоящите набори от данни за електронни отпадъци не са достатъчно разнообразни за целите на събирането на данни за електронни отпадъци и не са структурирани според конкретна класификация на електронните отпадъци.

В резултат на това моделите за компютърно зрение, обучени на тези набори от данни, имат значително ограничени възможности за откриване на обекти и дори могат да бъдат неефективни в региони, чието определение за електронни отпадъци не съответства с обектите, които системата може да открива. За справяне с тези проблеми е предложен нов набор от данни за електронни отпадъци, който е структуриран с помощта на класификацията UNU-KEYS.

Според прегледаната литература това е най-големият и най-разнообразен набор от данни за електронни отпадъци до момента, състоящ се от 19 613 снимки, 28 941 анотации и 77 класа, където всеки клас представлява един визуално отличителен тип електронно устройство. Най-същественото предимство на предложения набор от данни обаче е, че той е структуриран около класификацията UNU-KEYS. Тази структурна разлика гарантира съвместимостта на този набор от данни с регионалните дефиниции за електронни отпадъци и го прави идеален за приложения, изискващи откриване на различни видове електронни отпадъци, като например събиране на данни за електронни отпадъци, документация на електронни отпадъци, планиране на събирането на е-отпадъци, сортиране на е-отпадъци и отделяне на е-отпадъци от други потоци отпадъци. Този набор от данни не различава марки или модели от един и същи тип устройство, което го прави по-малко подходящ за приложения за разглобяване на електронни отпадъци. Наборът от данни може да бъде подобрен чрез увеличаване на броя на класовете на всяка UNU-KEY категория и чрез добавяне на повече анотирани изображения към понастоящем недостатъчно представените класове.

Предложеният набор от данни е направен с отворен достъп с разрешителен лиценз CC by 4.0, така че да може да се използва за стимулиране на научния прогрес в областта на автоматичното разпознаване на електронни отпадъци, с крайната цел решаване на глобалния проблем с електронните отпадъци. Наборът от данни е достъпен онлайн на <https://universe.roboflow.com/electronic-waste-detection/e-waste-dataset-r0ojc>.

За да се оцени качеството на предложения набор от данни, върху него е обучен модел за откриване на обекти с архитектурата „Roboflow 3.0 Fast“. Моделът има следните параметри: mAP е 69,8%, неговият Precision е 71,1%, а Recall е 67,9%. Тези стойности могат да се повишат чрез увеличаване на броя на анотираните изображения в слабо представените класове или чрез изключването им от процеса на обучение. Въпреки това моделът успешно открива устройства за електронни отпадъци в реалния свят, както е показано на Фигура 4-8.





Фигура 4-8 – Тестване на модела Roboflow 3.0, обучен върху небалансирания набор от данни.

На Фигура 4-8 е показана снимка, направена в район за събиране на отпадъци в Магдебург, Германия. Снимката е анализирана от обучената модел за откриване на електронни отпадъци. Въпреки че хладилникът е заснет отзад, което е важно, тъй като повечето хладилници в набора от данни са заснети отпред, въпреки че е по-малък тип хладилник от тези, които се намират в набора от данни, и въпреки че има графити върху него, моделът за откриване на електронни отпадъци все пак успя да го открие с 42% процент на увереност. Класът „Хладилник“ съответства на UNU-KEY „0108 - Хладилници“ и на категорията на ЕС-6 „1. оборудване за температурен обмен“.

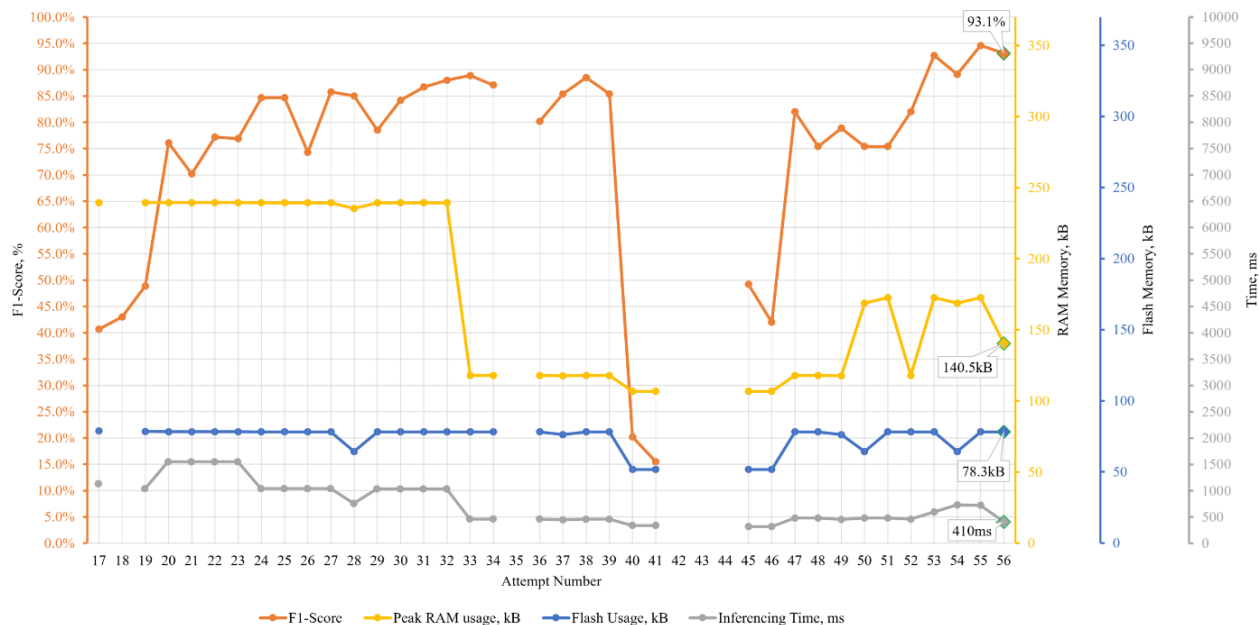
## ГЛАВА 5. ОПТИМИЗИРАНЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛНОСТТА НА ВГРАДЕНА СИСТЕМА ЗА РАЗПОЗНАВАНЕ НА ЕЛЕКТРОННИ ОТПАДЪЦИ

### 5.1. Обучаване на модела „FOMO“ за откриване на е-отпадъци

Производителността на вградената система за разпознаване на електронни отпадъци е подобрена в следните области: способност за разпознаване на електронни отпадъци, точност, използване на памет, бързодействие и консумация на енергия.

Тези подобрения са направени чрез балансиране на новосъздадения анотиран набор от данни за е-отпадъци, замяна на класификационния модел

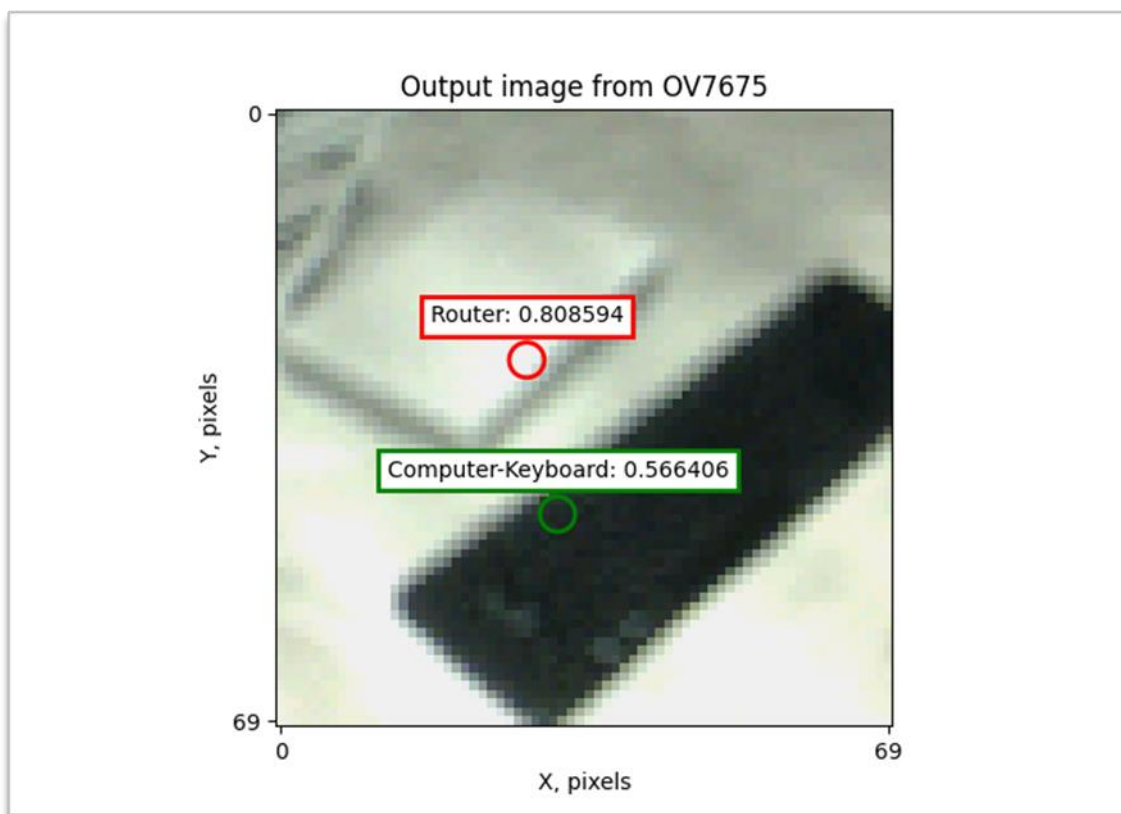
MobileNetV1 с най-съвременния ML алгоритъм FOMO за ограничено разпознаване на обекти от е-отпадъци, щателно конфигуриране на параметрите му и чрез оптимизиране на кода на програмата, качена на микроконтролера. Процесът на оптимизация на алгоритъма FOMO е показан на Фигура 5-12.



Фигура 5-12 – Оптимизиране на F1-Score, нужна памет и време за откриване на обекти на модела FOMO.

Факторите, за които се установи, че оказват най-голямо влияние върху производителността на системата, са балансът на набора от данни, избраните класове за разпознаване, скоростта на обучение, броят на циклите на обучение, резолюцията на изображението и сложността на модела, която включва стойността на множителя на ширината, броя на плътните слоеве, броя на филтрите във всеки слой, тежестта, предадена на обектите, и точката на прекъсване на MobileNetV2 (върху който е базиран алгоритъмът FOMO).

След инсталирането на оптимизирания модел FOMO върху Arduino Nano 33 BLE Sense, инструментът за визуализация и запамяване се модифицира така, че да работи с новия вид изходни данни на системата, които вече включват координатите на откритите обекти в изображението.



Фигура 5-14 – Визуализация на изходните данни от оптимизирания модел FOMO, работещ на Arduino Nano 33 BLE Sense. Моделът успешно открива локацията на два различни обекта в едно изображение и ги класифицира правилно.

Резолюцията на изображението на оптимизираната система е 70x70px, което е по-ниско от резолюцията 96x96px на първоначалната система, описана в Глава 2. Независимо от това, оптимизираната система е способна точно да открива множество обекти от различни видове в един и същи кадър, както се вижда на Фигура 5-14.

Софтуерът за тази система е направен с отворен код с разрешителен лиценз Apache 2.0 и е достъпен онлайн на адрес: <https://studio.edgeimpulse.com/public/367229/live>.

## 5.2. Сравняване на производителността на оптимизираната система с тази от Глава 2.

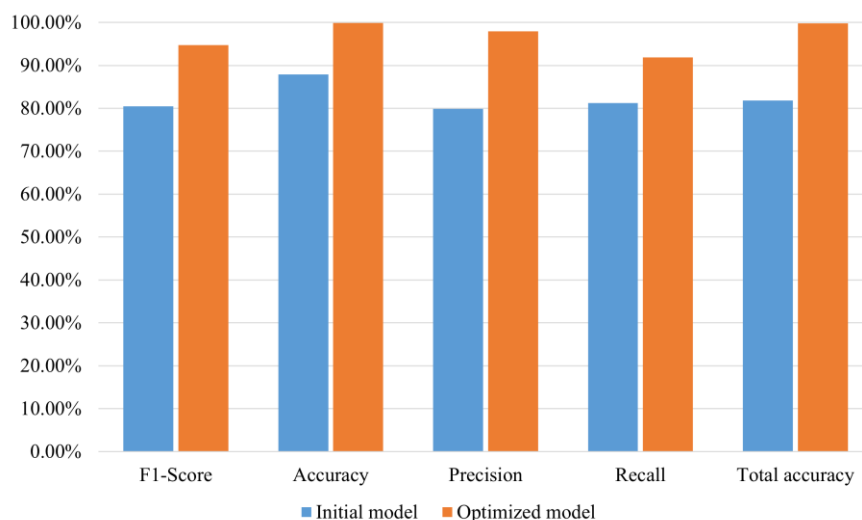
### 5.2.1. Сравняване на способностите на разпознаване на е-отпадъци

Вградената система, представена в Глава 2, извършва класификация на изображенията, докато оптимизираната система извършва ограничено откриване на обекти в изображенията.

Оптимизираната система понастоящем може да открива два вида устройства - компютърни клавиатури и рутери, снимани на всякакъв фон, докато първоначалната система може да класифицира само един вид устройство - слушалки, снимани на определен фон.

## 5.2.2. Сравняване на точност

Сравнявайки резултатите на оптимизирания модел върху невиджани данни с резултатите на първоначалния модел върху невиджани данни, става ясно, че оптимизираният модел превъзхожда първоначалния модел по всеки показател за оценка на класификационната производителност, както е показано на Фигура 5-17.

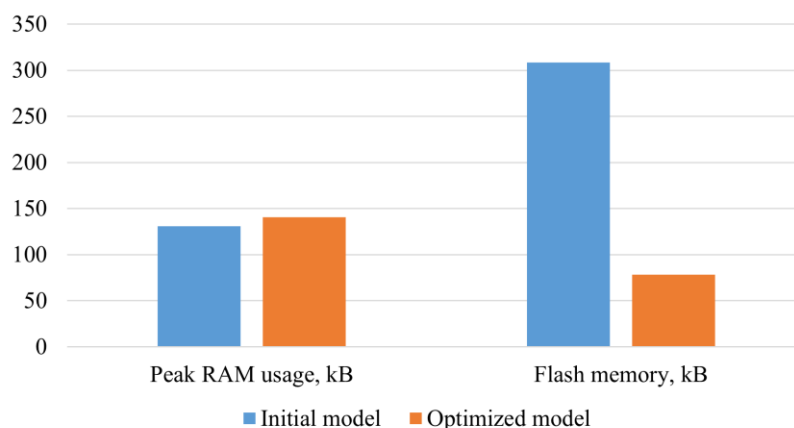


Фигура 5-17 – Сравнение на класификационната производителност на първоначалния модел от Глава 2. и оптимизирания FOMO модел.

Това вероятно се дължи на по-големия и по-балансиран набор от данни, оптимизираните параметри на конфигурацията и по-усъвършенствания MobileNetV2, използван от FOMO, в сравнение с модела MobileNetV1, използван от първоначалния модел от Глава 2.

## 5.2.3. Сравняване на използвана памет

Използваната RAM и Flash памет на класификационния модел от Глава 2 и оптимизирания FOMO модел от Глава 5 са сравнени на Фигура 5-18.



Фигура 5-18 – Сравнение на нужната памет на класификационния модел от Глава 2. и оптимизирания FOMO модел.

Резултатите показват, че оптимизираният FOMO модел изисква 9,6 kV повече RAM, но използва 229,9 kV (-74,6%) по-малко флаш памет. Това се дължи на намалената разделителна способност на изображението и броя на слоевете в архитектурата FOMO.

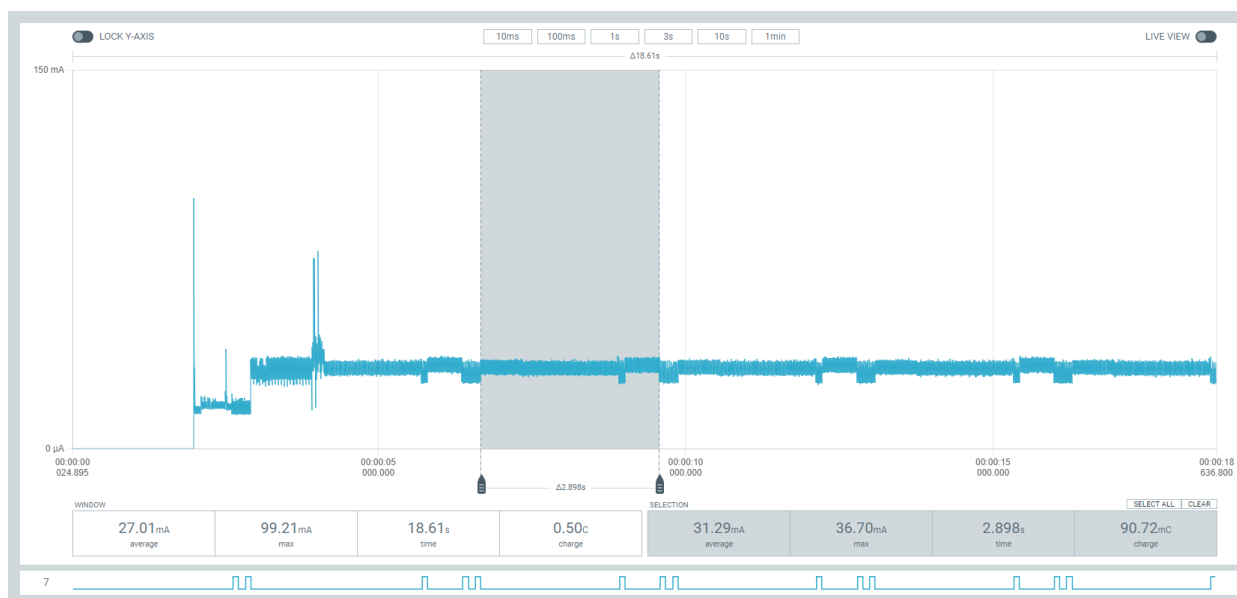
#### 5.2.4. Сравняване на бързодействието

Времето за обработка на изображенията в оптимизираната система е 2241ms, а времето за откриване на обекти е 560ms. Общата продължителност на един програмен цикъл за оптимизираната система е 2801ms, което е с 89ms по-бързо от оригиналната система от Глава 2.

#### 5.2.5. Сравняване на консумираната мощност

Консумацията на енергия на оптимизираната FOMO система е намалена програмно чрез деактивиране на неизползваните сензори на Arduino Nano 33 BLE Sense, изключване на всички светодиоди и изключване на I2C pull-up резисторите.

Средната консумация на енергия на оптимизираната вградена система за един програмен цикъл е намалена до 31,29 mA, което е с 1,9 mA (-5,72 %) по-малко от първоначалната система. Средната консумация на енергия по време на обработката на изображенията е 31,26 mA и се увеличава до средно 32,05 mA по време на откриване на обекти, като пикът е 36,70 mA. Консумацията на енергия на оптимизираната система по време на обработката на изображенията е с 1,59 mA (-4,84 %) по-ниска от тази на първоначалната система по време на същия процес и с 1,92 mA (-5,65 %) по-ниска от тази на първоначалната система по време на класификацията.



Фигура 5-19 – Консумирана мощност на оптимизираната вградена система за разпознаване на е-отпадъци. Снимка от приложението nrF Connect на PPK2.

## НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- 1) Анализирани са глобалният проблем с електронните отпадъци и са посочени основните причини за него.
- 2) Анализирани са съвременните вградени системи за разпознаване на електронни отпадъци.
- 3) Установено е, че все още не е създадена вградена система за разпознаване на е-отпадъци, използваща UNU-KEYS класификацията. Предложено е това да се направи с цел осигуряване на съвместимостта между класификационните резултати на системата и различните регионални дефиниции на термина е-отпадък.
- 4) Създаден е най-големият и най-разнообразен набор от данни с анотирани снимки на електронни отпадъци до момента. Наборът от данни е структуриран използвайки класификацията UNU-KEYS и понастоящем е единственият набор от данни за електронни отпадъци, който съдържа анотирани изображения от всяка една UNU-KEYS категория. Наборът от данни е направен свободно достъпен с лиценз „CC BY 4.0“.
- 5) Разработена е вградена система за разпознаване на електронни отпадъци и е оценена нейната производителност. Описана е методологията за разработване на системата и методологията за оценка на нейната производителност. Резултатите могат да се използват като еталон за разработване на подобни системи в бъдеще.
- 6) Оптимизирана е вградената система за разпознаване на електронни отпадъци, използвайки моделът „FOMO“. Моделът е обучен върху балансиран набор от данни с анотирани снимки на електронни отпадъци, структуриран около класификацията UNU-KEYS. Системата е оптимизирана въз основа на изводите от литературния обзор и анализа на експерименталните резултати, направени в хода на дисертацията.
- 7) Разработен е софтуерен инструмент за измерване на точността на вградените системи за разпознаване на електронни отпадъци, наречен „Инструмент за визуализация и запамяване“. Инструментът е написан на езика „Python“ и използва библиотеката „matplotlib“.
- 8) Разработена е компактна и нискобюджетна вградена система за разпознаване на електронни отпадъци. Системата е базирана на „Arduino Nano 33 BLE Sense“, а кодът ѝ е с отворен достъп с разрешителен лиценз Apache 2.0.
- 9) Описани са ефектите от балансирането на набора от данни и конфигурирането на параметрите на модела „FOMO“ върху неговата точност, бързодействие и нужна памет.

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ТАБЛИЦА 6-1 – СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ

Индекс	Цитат	Глава
A1, 2022	D. Iliev, ‘Electronic waste management: A review of the limiting factors and robotic solutions’, 12th FDIBA Conference, vol. 6, 2022.	1
A2, 2023	D. I. Iliev and M. B. Marinov, ‘Embedded System for E-Waste Recognition Using Computer Vision’, in 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria: IEEE, Sep. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ET59121.2023.10278614.	2
A3, 2023	D. I. Iliev and M. B. Marinov, ‘Performance Analysis of an Embedded System for E-Waste Recognition’, in 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria: IEEE, Sep. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ET59121.2023.10279353.	3
A4, 2023	D. Iliev, ‘A Review of Embedded Systems for E-Waste Recognition’, FDIBA Conference 2023, vol. 7, Dec. 2023.	1
A5, 2024	D. Iliev, M. Marinov and F. Ortmeier, “A Proposal for a New E-Waste Image Dataset Based on the UNU-KEYS Classification”, 2024 23 <sup>rd</sup> International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2024	4
A6, 2024	D. I. Iliev and M. B. Marinov ‘Optimizing an embedded system for e-waste object detection’, in 2024 XXXIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria: IEEE, Sep. 2024, pp. to appear	5

## SUMMARY

### METHODS AND TOOLS FOR OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF EMBEDDED SYSTEMS FOR ELECTRONIC WASTE RECOGNITION

Dimitar Iliev Iliev

The global e-waste problem is becoming an increasingly larger threat to the environment, human health and the economy. Although there are many factors contributing to this problem, one of the most significant factors is the lack of e-waste data. In 2019, 44.3Mt (82.6%) of the global e-waste quantity was not documented. The development of tools for automatic e-waste recognition are necessary in order to increase the amount of recycled e-waste. Automatic e-waste recognition can have significant benefits for several e-waste management processes, such as e-waste documentation, e-waste separation from other waste streams, e-waste sorting, collection, disassembly and e-waste data acquisition in general. However, e-waste is often found outside of controlled environments, therefore the e-waste recognition system must be able to operate in those environments. Embedded systems for e-waste recognition have the necessary properties to work under those conditions, however their limited performance capabilities currently make them a non-viable option.

The goal of this dissertation is to address this issue by developing methods and tools for optimizing the performance of embedded systems for e-waste recognition. This goal has been achieved by completing the following six objectives, described across five chapters. First the global e-waste problem and its underlying causes have been analyzed in depth. As a result of this analysis, it has been found that embedded systems for e-waste recognition must be compliant with many different regional definitions of the term “e-waste” due to the lack of a globally accepted definition for this term. Instead of creating separate e-waste recognition systems for each region, the solution proposed in this dissertation is to use the UNU-KEYS e-waste classification in the development of the optimized embedded system for e-waste recognition to ensure its compatibility with regional e-waste definitions through the links between them and the UNU-KEYS classification. Second, the current state-of-the-art embedded systems for e-waste recognition have been reviewed and analyzed. Third, on the basis of this analysis, a novel embedded system for e-waste recognition has been developed. Fourth, the performance of the system has been measured and optimization methods have been suggested. Fifth, an e-waste dataset for object detection based on the UNU-KEYS classification has been developed. Sixth, the embedded system for e-waste recognition has been optimized using the suggested methods. The results show that every measured performance metric of the optimized system has been improved substantially compared to the initial system, which proves the validity of the proposed methods and tools.