

# IDENTYFIKACJA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA EFEKTYWNOŚĆ ŁAŃCUCHA LOGISTYKI ZWROTNEJ ZUŻYTEGO SPRZĘTU ELEKTRYCZNEGO I ELEKTRONICZNEGO

Piotr NOWAKOWSKI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę funkcjonowania łańcucha logistyki zwrotnej zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEE) w Polsce. Wskazane zostały podstawowe ogniwa, w których może dochodzić do zmniejszenia efektywności zbiórki. Czynniki, które decydują o poziomie zbiórki, zostały podzielone na społeczne – podejmowanie decyzji o sposobach pozbycia się ZSEE z gospodarstw domowych oraz ekonomiczne – wpływające na koszty prowadzenia zbiórek przez odpowiedzialne firmy. Wskazane zostały zalecenia niezbędne do poprawy efektywności, co ma szczególne znaczenie dla Polski, która została ujęta w znowelizowanej Dyrektywie WEEE w grupie państw o przedłużonym okresie uzyskania poziomu zbiórki ZSEE wynoszącego 65% sprzętu umieszczonego na rynku do roku 2021.

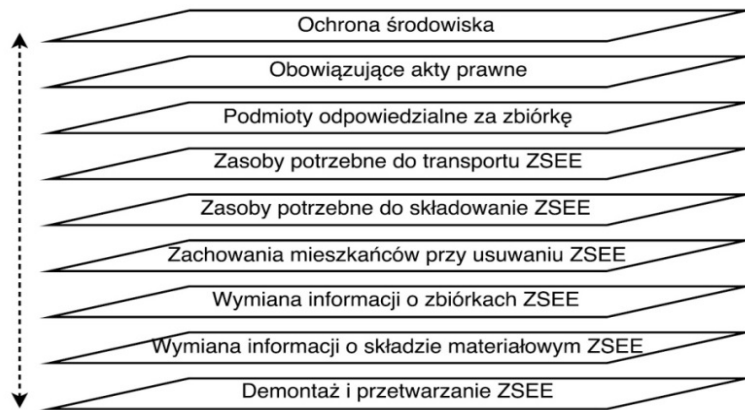
**Słowa kluczowe:** łańcuch logistyki zwrotnej, efektywność, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, zbiórka i przetwarzanie ZSEE

## 1. Interdyscyplinarny charakter problemów gospodarowania ZSEE

Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny w dyrektywie Unii Europejskiej (UE) [1] został wyodrębniony jako grupa odpadów, która nie może być usuwana wraz z odpadami komunalnymi. Prawo to zostało wdrożone w Polsce po uchwaleniu Ustawy [2]. Sprzęt ten zawiera materiały nadające się do recyklingu, ale także zawiera materiały niebezpieczne. W dyrektywie określono dokładny sposób funkcjonowania systemu. Wprowadzony został podział na producentów i dystrybutorów sprzętu elektrycznego i elektronicznego (SEiE), firmy zajmujące się zbiórką i firmy zajmujące się recyklingiem. Istotną rolę biorą również mieszkańcy – od których rozpoczyna się łańcuch logistyki zwrotnej ZSEE.

Zagospodarowanie ZSEE jest jednym z ciekawszych tematów badawczych, ponieważ występują tu różne oddziaływania na kilku platformach i które można analizować w ujęciu interdyscyplinarnym [3]. Zostało to przedstawione na rysunku 1. Zakres oddziaływań systemu obejmuje ochronę środowiska naturalnego, zachowania mieszkańców usuwających odpady ZSEE z gospodarstw domowych, a także wymianę informacji pomiędzy firmami odpowiedzialnymi za przeprowadzenie zbiórek, prowadzących demontaż i przetwarzanie sprzętu oraz zakłady odpowiedzialne za recykling sprzętu. Zakres wymogów i odpowiedzialności uczestników systemu określa ustawa o ZSEE, a szczegółowe rozwiązania zawarte są w rozporządzeniach ministerialnych.

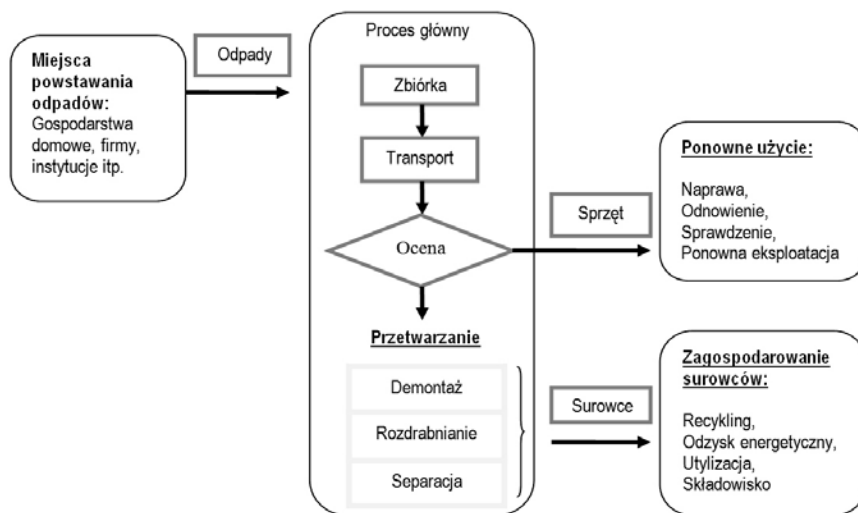
Wymogiem dyrektywy WEEE jest prowadzenie sprawozdawczości polegającej na przygotowaniu krajowych rocznych raportów dotyczących SEiE umieszczonego na rynku i ZSEE zebranego z rynku. Raporty te przesyłane są do Eurostatu.



Rys. 1. Platformy oddziaływań w łańcuchu logistyki zwrotnej ZSEE  
(źródło: opracowanie własne)

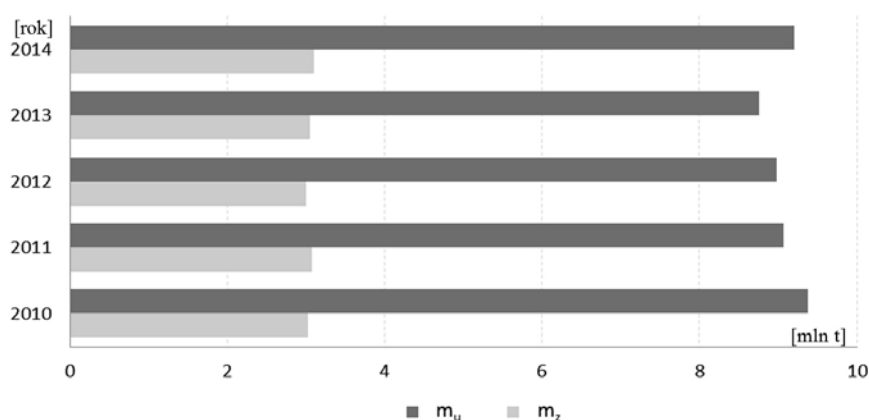
Ze względu na ograniczenia i trudności z wymaganą przez prawo zbiórką sprzętu sprzedawanego na rynku przez dystrybutorów i producentów, powstały organizacje odzysku ZSEE, które mają na celu wspomaganie tych firm. Organizacje odzysku przejmują odpowiedzialność za zbiórkę tego sprzętu, a także za prowadzenie kampanii informacyjnych i edukacyjnych w celu podniesienia świadomości społecznej w kierunku właściwego sposobu postępowania z ZSEE.

Łańcuch logistyki zwrotnej ZSEE został przedstawiony na rysunku 2. Obejmuje on procesy związane ze zbiórką, składowaniem, transportem, przeładunkiem, demontażem i separacją surowców powstałych po demontażu [4].



Rys. 2. Schemat procesu logistyki zwrotnej  
(źródło: opracowanie własne. na podst. [4,1])

Proces główny składa się z podprocesów: zbiórki, transportu i przetwarzania. W firmach trudniących się zbiórką lub zakładach przetwarzania możliwa jest weryfikacja sprzętu i jego ocena – czy może on być ponownie użytkowany [5]. Większość sprzętu trafia jednak do pełnego demontażu i recyklingu materiałowego. Dane te gromadzone przez Eurostat pozwalają uzyskać dokładną informację o efektywności funkcjonowania łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE. Każdy kraj członkowski UE zbiera dane o masie sprzętu elektrycznego i elektronicznego umieszczonego na rynku w [t] oraz masie zebranego ZSEE. Masa sprzętu umieszczonego na rynku  $m_u$  i zebranego ZSEE  $m_z$  w latach 2010-2014 została przedstawiona na rysunku 3[6]. Charakterystyczne są niewielkie wahania poziomu masy sprzętu zbieranego z rynku, co w konsekwencji daje wartość około 35% masy nowego sprzętu umieszczonego na rynku.



Rys. 3. Masa sprzętu elektrycznego i elektronicznego wprowadzonego i zużytego zebranego w UE w latach 2010-2015 (źródło: opracowanie własne na podstawie [6])

ZSEE został podzielony na dziesięć grup (tabela 1). Obowiązujący do 2018 r. podział daje duże możliwości oceny zagospodarowania poszczególnych grup ZSEE. Od 2018 r. liczba grup zostanie zmniejszona do sześciu, które będą zawierały [7]:

1. Sprzęt działający na zasadzie wymiany temperatury,
2. Ekrany, monitory i sprzęt zawierający ekrany o powierzchni większej niż 100 cm<sup>2</sup>,
3. Lamy
4. Sprzęt wielkogabarytowy (którykolwiek z zewnętrznych wymiarów > 50 cm),
5. Sprzęt małogabarytowy (żaden z zewnętrznych wymiarów nie przekracza 50 cm),
6. Małogabarytowy sprzęt informatyczny i telekomunikacyjny (żaden z zewnętrznych wymiarów nie przekracza 50 cm).

Znowelizowana dyrektywa WEEE wprowadza wysoki wymagany poziom zbiórki ZSEE – 65% sprzętu umieszczonego na rynku, który ma być osiągnięty w Polsce do 2021 r.

## 2. Efektywność łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE

Efektywność łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE może być wyrażona za pomocą wskaźnika masy proporcji sprzętu zebranego do umieszczonego na rynku (1):

$$W_{em} = \frac{m_z}{m_u} \quad (1)$$

gdzie:  $W_{em}$  – wskaźnik określający efektywność łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE na podstawie mas sprzętu,

$m_{zu}$  – masa sprzętu zebranego z rynku [t],

$m_{su}$  – masa sprzętu umieszczonego na rynku [t].

Dane o masie sprzętu elektrycznego i elektronicznego umieszczonego na rynku i zużytego zebranego dla poszczególnych grup z 2015 r. zebrano w tablicy 1 [8].

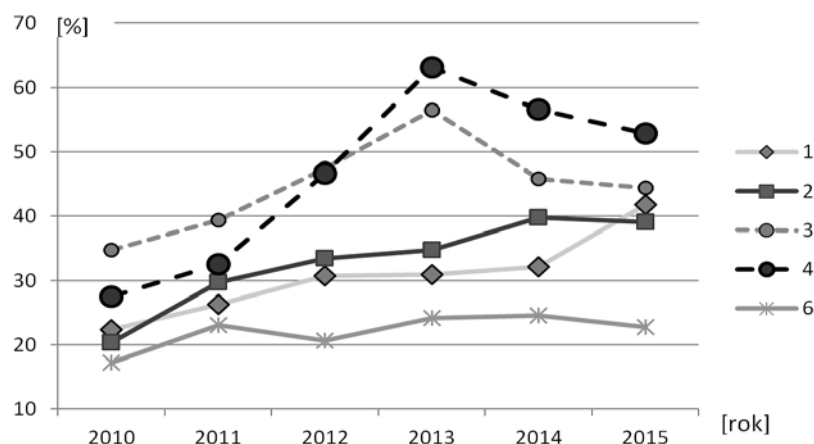
Tab. 1. Masa sprzętu umieszczonego i zebranego z rynku w Polsce w 2015 roku dla poszczególnych grup i wskaźnik efektywności

Grupa sprzętu	$m_{su}$ [t]	$m_{sz}$ [t]	$m_z/m_u$ [%]
1. Wielkogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego	265840	111232	41.84
2. Małogabarytowe urządzenia gospodarstwa domowego	50159	19589	39.05
3. Sprzęt teleinformatyczny i telekomunikacyjny	54998	24433	44.42
4. Sprzęt audiowizualny	40812	21589	52.89
5. Sprzęt oświetleniowy	36798	6359	29.21
6. Narzędzia elektryczne i elektroniczne	48923	11120	22.79
7. Zabawki, sprzęt rekreacyjny i sportowy	8505	3324	39.08
8. Wyroby medyczne	4003	540	13.50
9. Przyrządy do nadzoru i kontroli	6219	849	13.65
10. Automaty do wydawania	2612	126	4.81
		Średnia	<b>38.38</b>

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8]

Pierwsza grupa – wielkogabarytowy sprzęt (np. lodówki, pralki) jest wykorzystywany w ponad 95% gospodarstw domowych [9]. Urządzenia te mają znaczną masę i dlatego sumaryczna wartość masy sprzętu umieszczonego na rynku jest największa. Grupy 2-6 stanowią główny udział pozostałego sprzętu powszechnie używanego przez mieszkańców a także firmach. Średnia efektywność zbiórki dla wszystkich grup wynosi w Polsce ok. 38%.

Podział na 10 grup daje duże możliwości analizy poszczególnych strumieni grup sprzętu i pozwala ocenić czy zbiórka prowadzona jest w sposób efektywny. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany poziomu efektywności zbiórki ZSEE dla pięciu grup (tab. 1 – grupy 1-4 i grupa 6), z których pochodzi znaczna większość sprzętu w gospodarstwach domowych i firmach. Charakterystyczny jest wzrost zbiórki wielkogabarytowego sprzętu. Odgrywają w tym rolę dwa czynniki. Pierwszy z nich wiąże się z łatwością oddania sprzętu po zakupie i dostawie nowego do miejsca zamieszkania lub siedziby firmy. Jest to wygodny sposób na usunięcie starego sprzętu, a dodatkowo firmy dostarczające sprzęt wykorzystują te same pojazdy i pracowników.



Rys. 4. Zmiany poziomu efektywności zbiórki ZSEE w Polsce w latach 2010-2015 dla grup generujących największy strumień masy odpadów.

Innym wskaźnikiem oceny efektywności łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE jest miara rezultatów konkretnych działań, np. przychodów w stosunku do poniesionych nakładów. W ujęciu ekonomicznym może być wyrażona, jako iloraz (2) [10]:

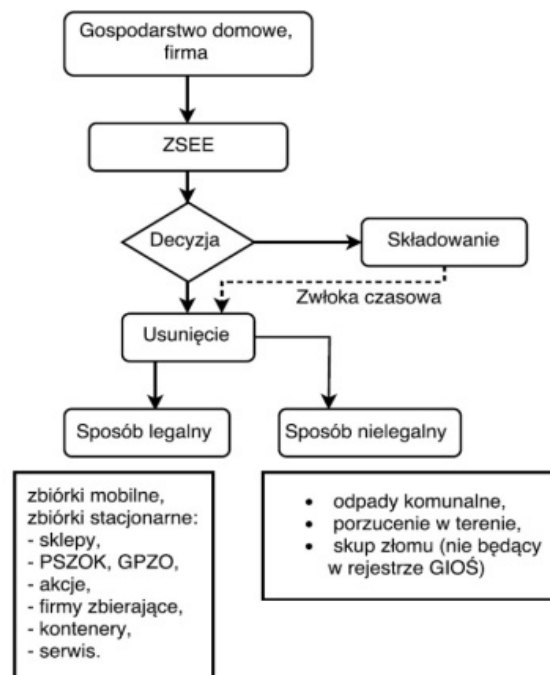
$$W_e = \frac{E}{N} \quad (2)$$

gdzie:  $W_e$  – wskaźnik efektywności,  
 $E$  – uzyskane efekty np. przychody [PLN],  
 $N$  – poniesione nakłady np. koszty [PLN].

Dla firm zbierających ZSEE główny przychód pochodzi ze sprzedaży surowców pozyskanych w wyniku demontażu i przetwarzania do zakładów recyklingowych. Zaliczają się do nich głównie metale i tworzywa sztuczne [11].

Po zakończeniu eksploatacji SEiE, w wyniku jego uszkodzenia lub utraceniu własności eksploatacyjnych, użytkownicy powinni pozbyć się go w sposób legalny. Sposoby legalnego pozbycia się sprzętu określa dyrektywa UE [1]. Punkty zbiórki do których można dostarczyć ZSEE stanowią sklepy (supermarkety) z nowym sprzętem, punkty selektywnej zbiórki odpadów – w powiatowym lub gminnym punkcie zbiórki odpadów (PSZOK, GPZO) i zakłady serwisowe sprzętu [12]. Inną formą sposobu zbierania ZSEE są tzw. zbiórki mobilne. Charakteryzują się przejazdem wzdłuż określonej trasy pojazdu należącego do firmy zbierającej i odbierającej wystawiony przed domostwo sprzęt lub odbierający sprzęt uprzednio zgłoszony do odbioru przez mieszkańców. Innym sposobem zbierania sprzętu jest zapewnianie pojemników lub kontenerów ustawionych w określonych lokalizacjach.

Mieszkańcy podejmując decyzję o usunięciu sprzętu – wybierają wspomniane wyżej możliwości, ale często dochodzi do nielegalnego pozbycia się odpadów. Polega to na oddaniu ZSEE w punkcie skupu złomu, porzuceniu w terenie, lub usunięciu go wraz z odpadami komunalnymi. Innym sposobem postępowania z ZSEE, który ogranicza jego strumień do recyklingu, jest jego składowanie w firmie lub gospodarstwie domowym [13].



Rys. 5. Sposoby postępowania ze zużytym sprzętem  
(źródło: opracowanie własne)

ZSEE usuwany z gospodarstw domowych i firm musi być oddany w całości, niedopuszczalne jest również prowadzenie jego demontażu w pośrednich punktach przeładunkowych lub firmach tymczasowo magazynujących odpady. Demontaż ZSEE może odbywać się jedynie w wyspecjalizowanych przedsiębiorstwach upoważnionych do prowadzenia rozbiórki – firmy takie określone są w Ustawie o ZSEE jako zakłady przetwarzania. W Polsce funkcjonują firmy duże, o zdolnościach przetwórczych kilkudziesięciu tysięcy ton ZSEE na rok, a także firmy mniejsze mające potencjał do kilkuset ton na rok [8]. W dużych firmach demontaż jest prowadzony częściowo ręcznie, a następnie na zautomatyzowane liniach.

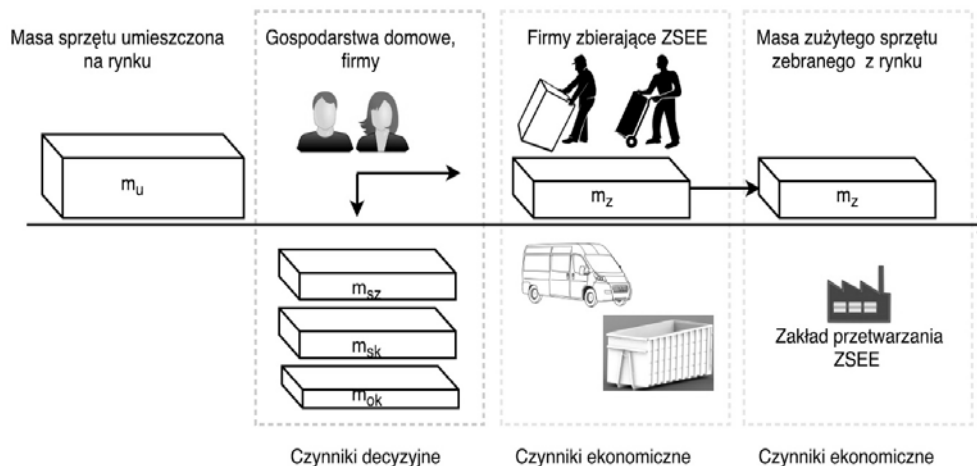
Do czynników, które zmniejszają masę odpadów trafiających do zakładów demontażu i przetwarzania ZSEE należą (rys. 6):

- usuwanie sprzętu poprzez nieoficjalne kanały:
  - do punktów skupu złomu (masa  $m_{sz}$ ),
  - umieszczanie ZSEE w odpadach komunalnych (masa  $m_{ok}$ ),
- składowanie odpadów w gospodarstwach domowych lub firmach (masa  $m_{sk}$ ).

Masa odpadów, która trafia do zakładów przetwarzania wyrażona jest jako  $m_z$  i jest to wartość podawana w raportach GIOŚ.

Do punktów skupu złomu najczęściej trafia duży sprzęt np. pralki, suszarki, kuchnie i zmywarki. Obecnie egzekwowany jest zakaz związany z nie przyjmowaniem sprzętu chłodniczego w takich punktach.

Wraz z odpadami komunalnymi mieszkańcy usuwają sprzęty małe, z grupy AGD, oświetleniowego, mały sprzęt informatyczny, zasilacze itp. [13].



Rys. 6. Podział czynników oddziałujących na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE (źródło: opracowanie własne)

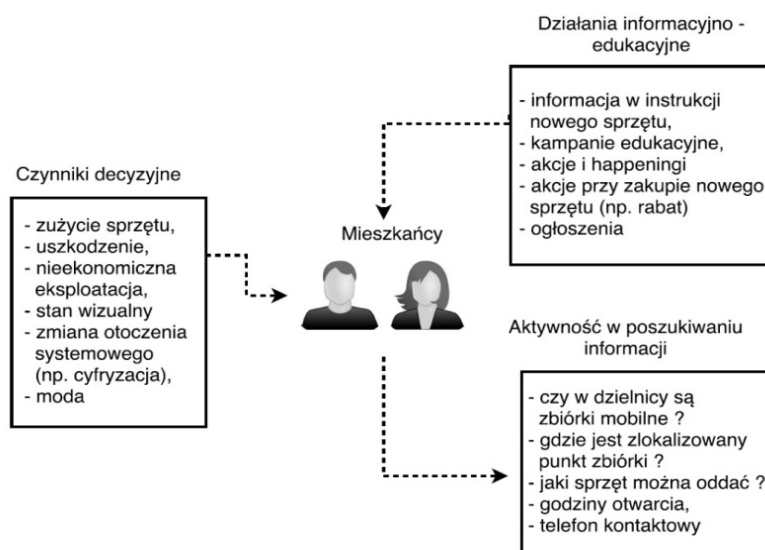
Na rysunku 6 zostały przedstawione grupy czynników wpływających na zmniejszenie strumienia zbiórki i obniżenie efektywności łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE. Zaliczają się do nich czynniki decyzyjne wynikające z zachowania mieszkańców. Drugą grupę tworzą czynniki ekonomiczne wpływające na zbiórkę, demontaż i przetwarzanie sprzętu.

### 3. Czynniki decyzyjne wpływające na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej

Decyzja o usunięciu sprzętu z gospodarstwa domowego poprzedzona jest oceną sprzętu. Do najczęściej występujących powodów oceny sprzętu przed jego usunięciem zaliczają się: utrata własności eksploatacyjnych poprzez uszkodzenie lub znaczne zużycie. Innym powodem może być stan wizualny, porysowana obudowa, ślady korozji itp. Zmiana otoczenia systemowego występuje zwłaszcza dla sprzętu informatycznego, w którym wymagania nowych wersji aplikacji są zbyt duże dla pierwotnej konfiguracji procesora, pamięci operacyjnej lub karty graficznej. Modą kierują się osoby, które uważają, że używają np. modelu telefonu nie jest akceptowane przez otoczenie (rys.7) [14].

Organizacje odzysku ZSEE, producenci i firmy odpowiedzialne za zbiórkę partycypują w przygotowaniu materiałów informacyjnych, a także kampaniach informacyjno-edukacyjnych w celu uświadomienia użytkowników sprzętu, że po zakończeniu jego eksploatacji powinien być usunięty w sposób właściwy i w legalny sposób. Pozytywna odpowiedź na przekazane informacje skutkuje wyborem możliwości legalnego pozbycia się sprzętu przez poszukiwanie lokalizacji punktu zbiórki lub kontaktu z firmą zbierającą [15].

W tablicy 2 zebrano główne czynniki decyzyjne i charakterystykę oddziaływania na efektywność zbiórki ZSEE.



Rys.7. Czynniki decyzyjne i reakcje mieszkańców w usuwaniu ZSEE (źródło: opracowanie własne)

Tab. 2. Czynniki decyzyjne wpływające na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej zbiórki ZSEE (Źródło: opracowanie własne)

Czynnik	Charakterystyka
Lokalizacja i dostępność punktów zbiórki	Punkty zbiórki powinny być łatwo dostępne i zlokalizowane w miejscach często odwiedzanych. Godziny otwarcia powinny obejmować porę wieczorną.
Harmonogramy Zbiórki mobilnej	Zbiórka mobilna powinna być prowadzona zgodnie z harmonogramem. Najlepszą opcją jest powtarzalność, co wpływa na zapamiętanie przez mieszkańców terminów odbioru ZSEE.
Nastawienie przyjazne środowisku	Respektowanie odrębnego sposobu zbiórki powoduje chęć legalnego i w konsekwencji przyjaznego dla środowiska usunięcia odpadów. Przy braku zainteresowania ochroną środowiska odpady ZSEE są usuwane wraz z odpadami komunalnymi lub porzucenie.
Edukacja	Działania edukacyjne należy prowadzić dla wszystkich grup wiekowych. Programy edukacyjne obejmują młode pokolenie i niewiele jest programów dla grup celowych w wieku średnim.
Możliwość uzyskania korzyści	Dla wielu osób możliwość pozbycia się sprzętu wielkogabarytowego (np. pralki, zmywarki) wiąże się z możliwością dodatkowego przychodu, np. w punktach skupu złomu. Sposób ten choć prowadzony nieoficjalnym kanałem pozwala na recykling metali. Masa ZSEE przechodząca przez punkt skupu złomu omija rejestr, ale docelowo trafia do huty.



#### 4. Czynniki ekonomiczne wpływające na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej

Do przeprowadzenia zbiórki ZSEE w sposób efektywny niezbędne jest przygotowanie niezbędnych zasobów. W łańcuchu logistyki zwrotnej należy przygotować dwa podstawowe ogniwa zapewniające właściwe składowanie i transport odpadów. Dla małego ZSEE, składowanie może odbywać się w pojemnikach ustawionych w miejscach często odwiedzanych przez mieszkańców. Są one często umieszczane w wielu placówkach sieci handlowych i dyskontach. Pojemniki średnie w postaci skrzyń i pojemników siatkowych stosuje się w punktach zbiórek komunalnych, a także w większych marketach ze sprzętem elektrotechnicznym. Duże kontenery stalowe – o pojemności 34-36 m<sup>3</sup> ustawione są na zapleczach supermarketów i firm zbierających ZSEE. Umożliwiają załadunek i składowanie dużego sprzętu.

Do transportu odpadów wykorzystuje się pojazdy dostawcze. Mają one pojemność przestrzeni ładunkowej od 8 do 20 m<sup>3</sup>. Pojazdy te służą do odbioru ZSEE w zbiórkach mobilnych, a także obsługujących sieci sklepów, których klienci oddają stary sprzęt. Do transportu kontenerów wykorzystywane są kontenerowce hakowe.

Bez względu na wybór pojazdów i kontenerów, w celu ograniczenia kosztów konieczne jest zastosowanie algorytmów służących do optymalizacji tras. Dotyczy to zwłaszcza zbiórek mobilnych [16].

##### 4.1. Czynniki wpływające na efektywność zbiórki ZSEE

Do wyznaczenia efektywności zbiórki ZSEE, można wykorzystać wskaźnik efektywności ekonomicznej  $W_{ez}^{s,t}$ , w którym uwzględniono proces transportu i składowania wyrażony wzorem (3) [17]:

$$W_{ez}^{s,t} = \frac{\sum_{i=1}^{lu} p_i}{\sum_{m=1}^{lk} k_m^s + \sum_{n=1}^{lp} k_n^t} \quad (3)$$

gdzie:  $W_{ez}^{s,t}$  – wskaźnik efektywności ekonomicznej składowania w kontenerze s i transportu ZSEE pojazdem t

$p_i$  – przychód z zebranej masy  $i$ -tego zużytego sprzętu [PLN],

$lu$  – liczba zebranych zużytych urządzeń,

$k_m^s$  – koszty składowania dla kontenera [PLN],

$lk$  – liczba obsługiwanych kontenerów,

$k_n^t$  – koszty transportu dla pojazdu [PLN],

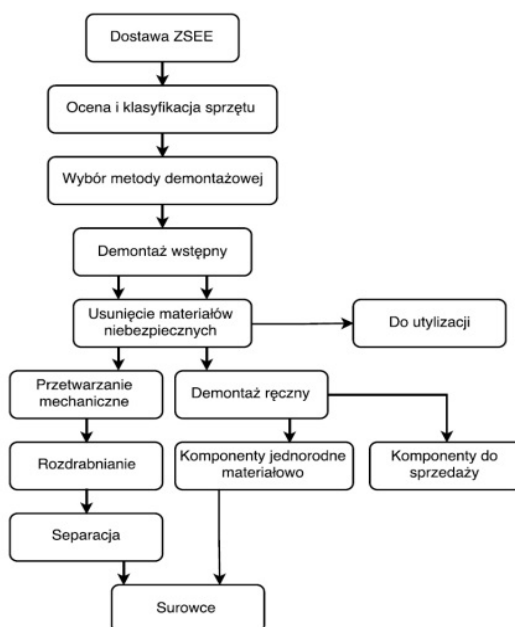
$lp$  – liczba wykorzystanych pojazdów do zbiórki,

Przy stosowaniu pojemników należy uwzględnić koszt amortyzacji, ewentualnie dzierżawy terenu, na którym jest on ustawiony, a także obsługi pojemnika. W wyznaczeniu kosztów transportu należy uwzględnić amortyzację pojazdu, koszty operacyjne (np. paliwo, ubezpieczenia, przeglądy, naprawy itp.), a także koszty osobowe. Do prowadzenia zbiórki mobilnej firmy wykorzystują dwóch pracowników ze względu na potrzebę wynoszenia ciężkiego sprzętu z gospodarstw domowych. Do obsługi kontenerowca hakowego wystarczy tylko kierowca.

Po stronie przychodów występuje potencjalna wartość sprzedaży ZSEE do zakładów recyklingowych. Jest ona bardzo zróżnicowana w zależności od rodzaju sprzętu. W praktyce często jest kalkulowana w zależności od ujednoczonej grupy sprzętu. Firma zbierająca odpady uzyskuje przychód z przekazanej do zakładu demontażu i przetwarzania wielkości masy ZSEE np. lodówek, pralek, drobnego sprzętu itp.

#### 4.2. Czynniki wpływające na efektywność demontażu i przetwarzania ZSEE

Po przewiezieniu zebranego ZSEE do zakładu przetwarzania następuje jego demontaż. W zależności od typu sprzętu stanowiska i linie mogą się od siebie znacznie różnić [14, 18]. Schemat postępowania z ZSEE w zakładzie demontażu i przetwarzania został przedstawiony na rysunku 8.



Rys. 8. Kroki postępowania ze sprzętem przeznaczonym do demontażu w zakładzie przetwarzania (źródło: opracowanie własne na podst.[1,20] )

Głównym celem jest uzyskanie surowców o wysokim stopniu czystości, które zostaną wysłane do zakładów recyklingowych (np. huty stali, miedzi itp.). W wielu aktualnie stosowanych rozwiązaniach technologicznych uzyskuje się stopień czystości frakcji powyżej 90% [19].

Po klasyfikacji grupy sprzętu, zostaje on przetransportowany na specjalistyczną linię demontażową w zakładzie. Ze względu na specyfikę budowy sprzętu powinno funkcjonować kilka linii [21]. Wymagania ustawy o ZSEE, jako jeden z celów demontażu stawiają eliminację substancji niebezpiecznych z urządzeń. Zaliczają się do nich: czynniki chłodnicze w chłodziarkach, zamrażarkach i klimatyzatorach, luminofor w ekranach kineskopowych, kondensatory elektrolityczne, baterie i akumulatory w innym sprzęcie.

Linia demontażowa urządzeń chłodzących powinna umożliwić usunięcie czynnika chłodzącego (w starszych instalacjach m.in. freonu) nie tylko występującego w części roboczej, ale też z pianki poliuretanowej. Do jej spieniania stosuje się ten sam czynnik, który wypełnia instalację roboczą.

W odrębny sposób należy demontować ekrany kineskopowe. Stanowią one malejący strumień odpadów, ze względu na zakończenie produkcji telewizorów i monitorów tego typu. Najważniejsze jest usunięcie luminoforu, który zawiera związek fosforu. Jest to możliwe po uprzednim odcięciu części frontowej szkła kineskopu.

Inne linie po usunięciu baterii lub akumulatorów ze sprzętów pozwalają na skierowanie ZSEE do zautomatyzowanego demontażu.

Usunięcie niebezpiecznych substancji wpływa również na jakość i czystość surowców wyjściowych – co pozwala uzyskać większe przychody z ich sprzedaży do zakładów recyklingowych.

Na liniach demontażowych wykorzystywane są strzępiarki do rozdrobnienia urządzeń i ich podzespołów. Następnie stosuje się separację magnetyczną, wiroprowadową i grawitacyjną. Jako surowce wyjściowe uzyskuje się stal, miedź, aluminium, tworzywa sztuczne i szkło.

Niektóre urządzenia nie są demontowane w Polsce lub prowadzony jest tylko częściowy demontaż, mający na celu uzyskanie jednorodnej grupy podzespołów. Zalicza się do nich sprzęt z grupy teleinformatycznej. Komponenty pozyskane z tych urządzeń zawierają metale szlachetne i metale ziem rzadkich. Na skalę przemysłową odzyskiem tych metali zajmują się firmy zagraniczne np. Umicore, Boliden i Aurubis [22].

Wskaźnik efektywności ekonomicznej demontażu i przetwarzania ZSEE dla określonej linii technologicznej  $W_d^t$  wyrażony jest za pomocą równania (4) [17],

$$W_d^t = \frac{\sum_{i=1}^j p_i}{\sum_{i=1}^j (k_d + k_{ps})_i} \quad (4)$$

gdzie:  $W_d^t$  – wskaźnik efektywności demontażu i przetwarzania sprzętu zgodnie z technologią  $t$ ,

$p_i$  – przychód ze sprzedaży surowców do zakładów recyklingowych dla  $i$ -tego zużytego sprzętu [PLN],

$j$  – liczba urządzeń do demontażu w zakładzie,

$k_d$  – koszty demontażu i przetworzenia dla  $i$ -tego zużytego sprzętu [PLN],

$k_{ps}$  – koszty pozyskania  $i$ -tego sprzętu od firm zbierających odpady [PLN].

Wskaźnik efektywności całkowitej  $W_{cp}$  dla wszystkich linii działających w zakładzie demontażowym jest wyrażony zależnością (5).

$$W_{cp} = \sum_{t=1}^{lt} \alpha_t \cdot W_d^t \quad (5)$$

gdzie:  $W_{cp}$  – wskaźnik efektywności całkowitej,

$\alpha_t$  – procent sprzętu demontowanego wg  $t$ -tej technologii,

$lt$  – liczba wykorzystanych technologii demontażu w zakładzie.

Po demontażu urządzeń i pozyskaniu frakcji końcowych w postaci surowców lub podzespołów zakład przetwarzania ZSEE może uzyskać przychód zależny od aktualnych cen rynkowych na surowce.

Na koszty demontażu i przetworzenia ZSEE wpływają koszty amortyzacji linii, koszty energii i koszty obsługi urządzeń. Odrębną grupę stanowią koszty pracownicze. W demontażu ZSEE znajdują zatrudnienie osoby niewykwalifikowane lub więźniowe (demontaż ręczny) i osoby wysoko wykwalifikowane do nadzoru linii technologicznej. Charakterystykę głównych czynników wpływających na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej z punktu widzenia ekonomii przedstawia tablica 3.

Tab. 3. Czynniki ekonomiczne wpływające na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej zbiórki ZSEE (źródło: opracowanie własne)

<i>Czynnik</i>	<i>Charakterystyka</i>
Rozmieszczenie pojemników	Pojemniki powinny być dostosowane do sprzętu, który jest usuwany. Pozostawione bez nadzoru mogą ułatwić kradzież składowanego ZSEE. Osoba odpowiedzialna za nadzór musi zgłaszać ich napełnienie. Do opróżniania pojemników z wielu lokalizacji niezbędne jest oprogramowanie z optymalizacją tras.
Projektowanie tras mobilnych	Konieczne jest projektowanie tras dostosowanych do prognozowanej liczby ZSEE do oddania. Trasy muszą być zaprojektowane w sposób optymalny – wpływa to na liczbę pojazdów i pracowników przeznaczonych do obsługi trasy.
Wymiana informacji między producentami a zakładami demontażu	Wymaganie to jest stawiane producentom sprzętu, choć do tej pory nie udało się osiągnąć skutecznej metody wymiany informacji stosowanej na szeroką skalę.
Wybór metod demontażu	Metody demontażu wymagają sprawnej kadry pracowników i wydajnych linii przetwarzania. W zależności od kosztów pracy i aktualnych cen na giełdach można dostosować tzw. głębokość demontażu do zewnętrznych warunków rynkowych.

## 5. Wnioski

Na efektywność łańcucha logistyki zwrotnej ZSEE wpływa wiele czynników. Oprócz czynników zewnętrznych niezależnych od poziomu zbiórki, do których zaliczają się: koszty pracy i ceny rynkowe skupu surowców, można wyróżnić dwie grupy czynników: decyzyjne i ekonomiczne.

Czynniki decyzyjne wpływają na ilość sprzętu usuwanego z gospodarstw domowych i firm. Od zachowania użytkowników sprzętu – mieszkańców i pracowników firm zależy wielkość strumienia odpadów skierowana do legalnych kanałów zbiórki, składowana w domostwach, sprzedawana w punktach skupu złomu i usuwana z odpadami komunalnymi. Konieczne jest udoskonalenie kampanii edukacyjnych i informacyjnych ukierunkowane na główne grupy decyzyjne.

Efektywność ekonomiczna zbiórki zależy od liczby pojemników, pojazdów i obsługi do odbioru określonej masy strumienia odpadów z rynku. Zbyt duża liczba pojemników i pojazdów wpływa na zmniejszenie efektywności, a często akcje zbierania ZSEE

wykonywane są na tym samym obszarze przez dwie lub więcej konkurencyjnych firm. Powoduje to powstanie nadmiernych kosztów w stosunku do uzyskanej masy odpadów do przetworzenia.

Efektywność demontażu i przetwarzania ZSEE z reguły jest wysoka, ze względu na uzyskanie frakcji surowców o czystości powyżej 90%. Czynniki, które mogą ją obniżyć zależą od cen rynkowych surowców, kosztów pracy i zbyt małej ilości sprzętu do demontażu dla zakładu o dużej wydajności przetwarzania.

## Literatura

1. European Union. "Directive 2002/96/EC of The European Parliament and of The Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)," 2003. [28-10-2014].
2. Dziennik Ustaw Nr 185 Poz. 1494-5, "Ustawa z dnia 29 lipca 2005 r. o zużyтым sprzęcie elektrycznym i elektronicznym." 2005.
3. Huisman J., Magalini F.: "2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)." United Nations University, 2007.
4. Bendkowski J., Wengierek M.: „Procesy logistyczne w gospodarce odpadami.” Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2002.
5. Szołtysek J.: „Logistyka zwrotna.” Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań, 2009.
6. Eurostat European Commission.: "Waste electrical and electronic equipment (WEEE)," <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/weee>. [01-12-2016].
7. European Union.: "Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)Text with EEA relevance - LexUriServ.do."
8. Główny Inspektor Ochrony Środowiska.: "Raporty o funkcjonowaniu systemu gospodarki zużyтым sprzętem elektrycznym i elektronicznym 2010-2015". <http://www.gios.gov.pl/pl/gospodarka-odpadami/zuzyty-sprzet-elektryczny-i-elektroniczny> [05-12-2016]
9. Główny Urząd Statystyczny.: „Gospodarstwa domowe w 2011 roku – wyniki spisu ludności i mieszkań 2011.”, Warszawa 2012.
10. Adamczyk J. K., Nehring A.: „Efektywność przedsiębiorstw sprywatyzowanych.” Wyd. Akademii Ekonomicznej, Kraków, 1995.
11. Cholewa M., Kulczycka J., Smol M., The e-waste management system in Poland. *Economic and Environmental Studies*. 16(4 (40)):599–619, 2016.
12. Dziennik Ustaw 2015 poz. 1688.: "Ustawa z dnia 11 września 2015 r. o zużyтым sprzęcie elektrycznym i elektronicznym" 2015.
13. Nowakowski, P., "The influence of residents' behaviour on waste electrical and electronic equipment collection effectiveness." *Waste Management & Research. Waste Management and Resources*, vol. 34 no. 11 p.1126-1135, 2016.
14. Nowakowski P.: „Logistyka recyklingu zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Od projektowania po przetwarzanie.” Monografia, Gliwice : Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2015.
15. Nowakowski P.: "Towards improvement of information system in collection waste electrical and electronic equipment - case study of Poland." *Logistyka Odzysku* nr 1, s. 86-90, 2015.

16. Król, A., Nowakowski, P., Mrówczyńska, B.: „How to improve WEEE management? Novel approach in mobile collection with application of artificial intelligence.” *Waste Management* 50, p. 222–233, 2016.
17. Nowakowski P. Wyznaczanie efektywności łańcucha logistyki zwrotnej na przykładzie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. *Logistyka* 2015 nr 2, dysk optyczny (CD-ROM) s. 655-665, dod.: *Logistyka - nauka*.
18. Cui, J., Forssberg E.: “Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 99, no. 3, pp. 243–263, 2003.
19. Cui J., Zhang L.: “Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review.”, *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228-256, 2008.
20. Zhang L., Xu Z., “A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment”, *Journal of Cleaner Production*, 127, 19-36, 2016
21. Liu, X., M. Tanaka, and Y. Matsui, “Economic evaluation of optional recycling processes for waste electronic home appliances” *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 1, pp. 53–60, 2009.
22. Willner J, Fornalczyk A. 2012. „Złom elektroniczny jako źródło metali szlachetnych.” *Przemysł Chemiczny*. 91(4):517–22.

Dr inż. Piotr NOWAKOWSKI  
Wydział Transportu, Katedra Logistyki i Transportu Przemysłowego  
Politechnika Śląska  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice  
tel./fax: (0-32) 6034149  
e-mail: Piotr.Nowakowski@polsl.pl