

**Katarzyna Sicińska**

katarzyna.sicinska@its.waw.pl

**Dorota Hitczenko**

dorota.hitczenko@its.waw.pl

Instytut Transportu Samochodowego

## **ANALIZA MODELU SYSTEMU ODZYSKU WIĄZEK PRZEWODÓW ELEKTRYCZNYCH POCHODZĄCYCH Z POJAZDÓW WYCOFANYCH Z EKSPLOATACJI**

W artykule przedstawiono analizę modelowania systemu odzysku wiązek przewodów elektrycznych pochodzących z pojazdów wycofanych z eksploatacji w Polsce wraz z przedstawieniem optymalnej lokalizacji dla zakładów odzysku. W modelowaniu przyjęto dwa warianty obliczeń ilości odpadów wiązek przewodów elektrycznych. W pierwszym wariantcie założono, że liczba złomowanych pojazdów wynosi 300 tys. rocznie czyli tyle ile faktycznie zagospodarowano pojazdów w 2011 roku., a w drugim 800 tys. sztuk rocznie czyli wielkość strumienia PWE (pojazdy wycofane z eksploatacji) przy założeniu, że wszystkie pojazdy trafiają do oficjalnej sieci recyklingu. Do obliczeń przyjęto ponadto dwa założenia dotyczące ilości wymontowywanych wiązek przewodów elektrycznych i wynikające z tego masy odpadów miedzi i otuliny z polichlorku winylu. W pierwszym założeniu przyjęto, że z każdego pojazdu wymontowuje się 5 kg wiązek, a w drugim, że masa wymontowanych wiązek wynosi 10 kg.

Słowa kluczowe: recykling, pojazd wycofany z eksploatacji, wiązki przewodów elektrycznych

## ***ANALYSIS OF A SYSTEM OF RECOVERY OF ELECTRICAL WIRING LOOMS COMING FROM VEHICLES WITHDRAWN FROM THE OPERATION***

*The article presents an analysis of the modelling of the system to recover electric wiring looms coming from end-of-life vehicles in Poland together with the presentation of the optimal location for the recovery plants. In the modelling, two variants of calculating the amount of waste of electrical wiring harnesses were adopted. In the first variant, it was assumed that the number of scrapped vehicles is 300,000 annually, i.e the number of vehicles actually processed in 2011, and in the second 800,000 cars per year or the size of the ELV stream (end-of-life vehicles) assuming that all vehicles end up in the official recycling network. In addition, two assumptions were made for calculations regarding the amount of removed electrical wiring looms and the resulting mass of copper and polyvinyl chloride casing waste. In the first assumption, it was assumed that 5 kg of wiring looms are removed from each vehicle, and in the second, the mass of removed wiring is 10 kg.*

*Key words: Recycling, end-of life vehicle, wiring harness*

## 1. Wstęp

Do dynamicznego rozwoju gospodarczego świata jaki obserwujemy w ostatnich kilku dekadach w ogromnym stopniu przyczynia się transport, w tym przemysł motoryzacyjny. W 2015 r. żyło 7,3 miliarda ludzi i zarejestrowanych było ponad 1,1 miliarda pojazdów tzn., że 1 samochód przypadał średnio na 6,5 osoby. Prognozuje się, że w 2022 roku liczba pojazdów zwiększy się do 1,5 miliarda. Eksploatacja tak ogromnej ich liczby, powoduje nie tylko ekspansywne wykorzystanie surowców naturalnych, wyczerpywanie nośników energii, ale również wzmożoną emisję spalin do atmosfery i powstawania ogromnej ilości odpadów.

W Polsce w roku 2015 zarejestrowanych było ponad 24 mln pojazdów, z tego 84% (20 723 423) stanowiły samochody osobowe. Struktura wiekowa samochodów osobowych kształtowała się następująco: samochody nowe (do 5 lat) stanowiły 9,2%, samochody „w wieku średnim” (od 6 do 15 lat) - 35,4%, a samochody najstarsze (16 lat i więcej) - 55,4% (dane GUS) [7]. Najstarsze samochody to grupa pojazdów przeznaczonych potencjalnie do recyklingu, a ich liczba to ważna informacja służąca do oceny rentowności sieci demontażu pojazdów wycofanych z eksploatacji (PWE).

Pojazdy są, z jednej strony cennym źródłem surowców wtórnych, a z drugiej po wycofaniu z eksploatacji stają się odpadami i generują duże obciążenie dla środowiska. Unia Europejska Dyrektywą 2000/53/EC w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji (PWE), wprowadziła dla producentów i podmiotów odpowiedzialnych za przetwarzanie odpadów z PWE obowiązek osiągnięcia 95% poziomu odzysku i 85% recyklingu masy pojazdów wycofanych z eksploatacji [5].

Dla wielkości parku samochodowego w Polsce, zgodnego z danymi bazy CEP (Centralna Ewidencja Pojazdów) w 2011 r. szacowana liczba złomowanych samochodów powinna wynosić około 800 tys. sztuk rocznie [9]. Należy jednak zaznaczyć, że jest to liczba wszystkich wycofywanych pojazdów demontowanych zarówno w oficjalnej sieci recyklingu jak i poza nią. Do oficjalnie działających stacji demontażu w 2012 r. przekazano jedynie 350 tys. pojazdów [2].

Według danych SGM Magnetics<sup>1</sup>, w jednym PWE jest średnio 16,6 kg wiązek przewodów elektrycznych, w której zawartość miedzi wynosi 10 kg, a reszta 6,6 kg to PVC.

Jak wynika z ankiety przeprowadzonej przez stowarzyszenie FORS<sup>2</sup> w 2011 r. [1], jedynie połowa autoryzowanych stacji demontażu w kraju wymontowuje okablowanie z pojazdów i to nie w całości, a jedynie w ilości do 10 kg z jednego PWE. Pozostałość z wiązek oraz całość okablowania z pojazdów trafiających do stacji nie demontujących wiązek przekazywana jest do młynów przemysłowych, gdzie odzyskuje się metale, natomiast reszta z braku technicznych możliwości nie podlega odzyskowi i tworzy odpad.

Bazując na danych pochodzących ze stacji demontażu przyjęto dwa warianty obliczeń ilości odpadów wiązek przewodów elektrycznych. W pierwszym wariantcie założono, że liczba złomowanych pojazdów wynosi 300 tys., a w drugim 800 tys. sztuk rocznie. Do obliczeń przyjęto ponadto dwa założenia dotyczące ilości wymontowywanych wiązek przewodów elektrycznych i wynikające z tego masy odpadów miedzi i otuliny z polichlorku winylu. Pierwsze założenie zakłada demontaż 5 kg z każdego PWE. Drugie

---

<sup>1</sup> SGM Magnetics – włoska firma projektująca systemy do separacji materiałowej odpadów

<sup>2</sup> Forum Recyklingu Samochodów – największe stowarzyszenie zrzeszające oficjalnie działające stacje demontażu w Polsce

założenie związane jest z nadchodzącą zmianą wymogów prawnych dotyczących recyklingu PWE. Obowiązek podwyższenia od stycznia 2015 r. wskaźników odzysku i recyklingu odpowiednio do 95% i 85% masy pojazdu, zmusi stacje demontażu do zwiększonego odzysku odpadów. Przyjęto zatem do obliczeń wariant zakładający, że z wszystkich pojazdów wymontowuje się 10 kg wiązek.

## **2. Sieć recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji w Polsce**

Sieć recyklingu PWE w Polsce obejmuje: stacje demontażu, punkty zbierania pojazdów, młyny przemysłowe oraz specjalistyczne zakłady recyklingu materiałowego [9].

### *Stacje demontażu i punkty zbierania*

Funkcjonująca w kraju w 2012 r. liczba 792 oficjalnych stacji demontażu jest za duża w porównaniu z podażą PWE do nich przekazywanych. Mała podaż PWE w oficjalnej sieci jest związana z działającą w kraju tzw. „szarą strefą” demontażu, w której zagospodarowana jest większość wycofywanych z użytkowania pojazdów. Natomiast 126 punktów zbierania pojazdów, których głównym celem jest poprawa dostępności sieci dla właścicieli pojazdów jest liczbą zbyt małą. W Polsce na jeden punkt zbierania przypada statystycznie ponad 6 stacji demontażu.

### *Strzepiarki, inaczej młyny przemysłowe*

W kraju funkcjonuje 11 strzepiarek o łącznym potencjale przerobowym ponad 1,2 mln ton rocznie, które odzyskują złom z wyrobów zawierających metale żelazne oraz metale nieżelazne. Instalacje nie są wyposażone w technologie służące do segregacji frakcji niemetalowych, co powoduje, że około 20-25% masy złomu samochodowego dostarczanego do strzepiarki jest składowana.

Problemem, poza niewystarczającym potencjałem stanowi również ich lokalizacja, głównie w centralnej Polsce i na Śląsku. Województwa zachodniopomorskie, pomorskie, warmińsko-mazurskie, podlaskie, lubuskie nie mają dostępu do strzepiarek na własnym terenie.

### *Zakłady recyklingu materiałowego*

W Polsce problemem istniejącej sieci jest brak wystarczającej liczby zakładów recyklingu materiałowego zapewniających odzysk i recykling zdemontowanych w stacjach demontażu odpadów. Liczba zakładów recyklingu części i materiałów z PWE, jak i ich potencjał i lokalizacja (o charakterze lokalnym) jest niedostatecznie rozwinięta. Zaplecze zakładów zlokalizowane jest głównie w południowej i zachodniej części kraju, w szczególności na Śląsku, w Wielkopolsce i na Mazowszu.

## **3. Obecna sytuacja w zakresie zbiórki i odzysku odpadów wiązek przewodów elektrycznych z pojazdów wycofanych z eksploatacji w Polsce**

W Polsce odzysk wiązek przewodów elektrycznych z PWE jest na słabym poziomie. Powodem jest niewystarczająca ilość wsadu do instalacji prowadzących recykling materiałowy, a także brak w strzepiarkach instalacji do separacji tworzyw sztucznych od metalu.

Średnio w Polsce jedynie, z co drugiego samochodu osobowego wycofywanego z eksploatacji w stacji demontażu wymontowuje się wiązki przewodów elektrycznych [1], których w pojeździe o masie 1061,5 kg jest około 16,6 kg (10 kg miedzi i 6,6 kg izolacji z tworzyw sztucznych) [3]. Nie zdemontowane wiązki przekazywane są wraz z wrakiem pojazdu do strzepienia. Najnowocześniejsza strzepiarka w Polsce znajdująca się w Hucie

Zawiercie nie prowadzi specjalistycznego recyklingu okablowania pojazdu, odzyskuje wyłącznie zawarte w nim metale nieżelazne [4].

Wymontowane wiązki z PWE, poddawane są procesom recyklingu materiałowego w stacji demontażu lub w zakładzie recyklingu materiałowego, gdzie podlegają separacji, w wyniku, której oddziela się otulinę stanowiącą 40% masy od miedzi stanowiącej 60% masy przyjętych odpadów. Proces polega na rozdrobnieniu całej wiązki, a następnie mechanicznej separacji miedzianego drutu od osłonki z tworzywa sztucznego. Usunięty z izolacji polimer będący polichlorkiem winylu, w postaci granulatu jest dalej przetwarzany w procesach produkcyjnych. Miedź powstała po usunięciu izolacji oraz złączy i styków okablowania, może być ponownie wykorzystana w przemyśle [8].

#### **4. Modelowanie systemu odzysku wiązek przewodów elektrycznych**

##### **4.1 Modelowanie matematyczne i procedura badawcza**

Celem modelowania jest zaproponowanie krajowego systemu odzysku wiązek przewodów elektrycznych przy uwzględnieniu dostępności sieci istniejących podmiotów zajmujących się przetwarzaniem odpadów z PWE oraz przy założeniu określonych wielkości podaży odpadów i określonych kosztów działalności. Celem procedury badawczej modelowania sieci odzysku było wyznaczenie lokalizacji przedsiębiorstw odzyskujących otulinę PVC z wiązek przewodów elektrycznych (powstałą w zakładach recyklingu metali nieżelaznych i wymieszaną z frakcją lekką dającą kompozyt w zakładzie odzysku), przy minimalnych kosztach i przepływach materiałowych pomiędzy przedsiębiorstwami w łańcuchu technologicznym. Efektem modelowania było wskazanie lokalizacji zakładów odzysku, oszacowanie całkowitych kosztów systemu oraz określenie przepływów materiałowych pomiędzy uczestnikami systemu.

W opracowaniu systemu organizacji zagospodarowania wiązek przewodów elektrycznych wymontowywanych z pojazdów wycofanych z eksploatacji posłużono się modelem matematycznym, który następnie został zaimplementowany w aplikacji komputerowej. Skonstruowany model odwzorowuje system sieci odzysku, określa jego elementy, a także ograniczenia oraz wskazuje funkcję kryterium optymalizacji wyników.

Modelowanie sieci odzysku wiązek obejmowało cztery etapy. Do etapów tych należały:

##### *1. Identyfikacja problemu*

Identyfikacja problemu wymagała opisu stanu obecnego oraz określenia zakresu modelowania i celu. W opracowaniu, zakres modelowania obejmował wskazanie nowych miejsc lokalizacji podmiotów (spośród dowolnych lokalizacji równoznacznych z gminami).

##### *2. Tworzenie modelu*

Kolejnym krokiem było właściwe konstruowanie modelu. Warunkiem zbudowania modelu było szczegółowe zbadanie systemu i określenie jego elementów. Następnie odwzorowano jego strukturę poprzez przedstawienie elementów systemu oraz powiązań między podmiotami na podstawie rzeczywistych przepływów w sieci oraz zidentyfikowano charakterystyki elementów (np. potencjalnych miejsc lokalizacji, kosztów działalności), czyli cech mających wpływ na funkcjonowanie modelu. Struktura modelu odzwierciedla relacje pomiędzy elementami modelu oraz wyznacza granice pomiędzy badanym obszarem systemu a jego otoczeniem.

##### *3. Implementacja modelu w celu wykorzystania do poszukiwania rozwiązań problemów decyzyjnych*

W kolejnym kroku opracowany model matematyczny został zaimplementowany komputerowo tak, aby mógł służyć jako praktyczne narzędzie wyznaczania lokalizacji przedsiębiorstw i kształtowania sieci odzysku wiązek przewodów.

#### *4. Zastosowanie modelu do wyznaczenia lokalizacji przedsiębiorstw, kosztów i wielkości przepływów materiałowych*

Gotową aplikację wykorzystano następnie do wskazania optymalnych miejsc lokalizacji przedsiębiorstw przy spełnieniu określonych ograniczeń oraz przy uwzględnieniu rzeczywistych parametrów sieci.

W ujęciu szczegółowym na formułowanie zadania optymalizacyjnego składały się następujące czynności [12]:

- określenie, jakie wielkości są wielkościami zadanymi stanowiącymi dane wejściowe zadania (parametry),
- określenie zmiennych decyzyjnych poprzez wyznaczenie szukanych wielkości,
- ustalenie warunków ograniczających, które musi spełniać rozwiązanie zadania (ograniczenia),
- zdefiniowanie funkcji kryterium, według której oceniane będą rozwiązania dopuszczalne wyznaczone poprzez warunki ograniczające i umożliwiającej wyznaczenie rozwiązania optymalnego lub zapewniającej osiągnięcie celu badań.

Na etapie konstruowania modelu, po zidentyfikowaniu charakterystyk i relacji pomiędzy poszczególnymi podmiotami i otoczeniem, należało określić parametry i ograniczenia modelu. Ograniczenia są odzwierciedleniem dostępności zasobów decydenta np. posiadanego potencjału przerobowego oraz wymogów jakie muszą spełniać proponowane rozwiązania np. zapewnienie przerobu wszystkich odpadów. Układ warunków ograniczających generuje zbiór tzw. decyzji dopuszczalnych. Zatem rozwiązania dopuszczalne zadania optymalizacyjnego są taką kombinacją zmiennych decyzyjnych, które spełniają wszystkie ograniczenia zadania. Ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych wybiera się następnie rozwiązanie optymalne.

Kolejnym krokiem było określenie funkcji kryterium, stanowiącej bazę oceny proponowanych rozwiązań, która jest powiązana z wcześniej określonym celem modelowania. Funkcja ta mierzy stopień osiągnięcia celu. Poszukiwanie rozwiązania optymalnego polega na znalezieniu takiej kombinacji zmiennych spośród zbioru dopuszczalnych rozwiązań, przy której funkcja kryterium osiąga wartość ekstremalną. Wartość ekstremalna może być wartością minimalną (np. dla funkcji celu opartej na kosztach) lub maksymalną (np. dla funkcji celu opartej na przychodach).

Implementacja komputerowa wymagała zastosowania jednej z metod dokładnych lub metod heurystycznych, które są algorytmami poszukującymi przybliżonych rozwiązań problemu.

Metody dokładne polegają na obliczaniu wartości funkcji kryterium dla całego zbioru rozwiązań. Zadania optymalizacyjne lokalizacji podmiotów sieci recyklingu można rozwiązać dokładnie tylko dla relatywnie niewielkiej liczby danych wejściowych i zmiennych decyzyjnych, a złożoność problemów wyklucza stosowanie w praktyce tego typu metod.

Metody heurystyczne polegają na zastosowaniu inteligentnych, opartych na doświadczeniu bądź obserwacjach, reguł postępowania mających skrócić proces znalezienia zadowalającego rozwiązania, w sytuacjach kiedy nie można przejrzeć całej przestrzeni rozwiązań [11]. Metody heurystyczne pozwalają na wygenerowanie satysfakcjonujących rozwiązań, które jednak mogą odbiegać od rozwiązań optymalnych.

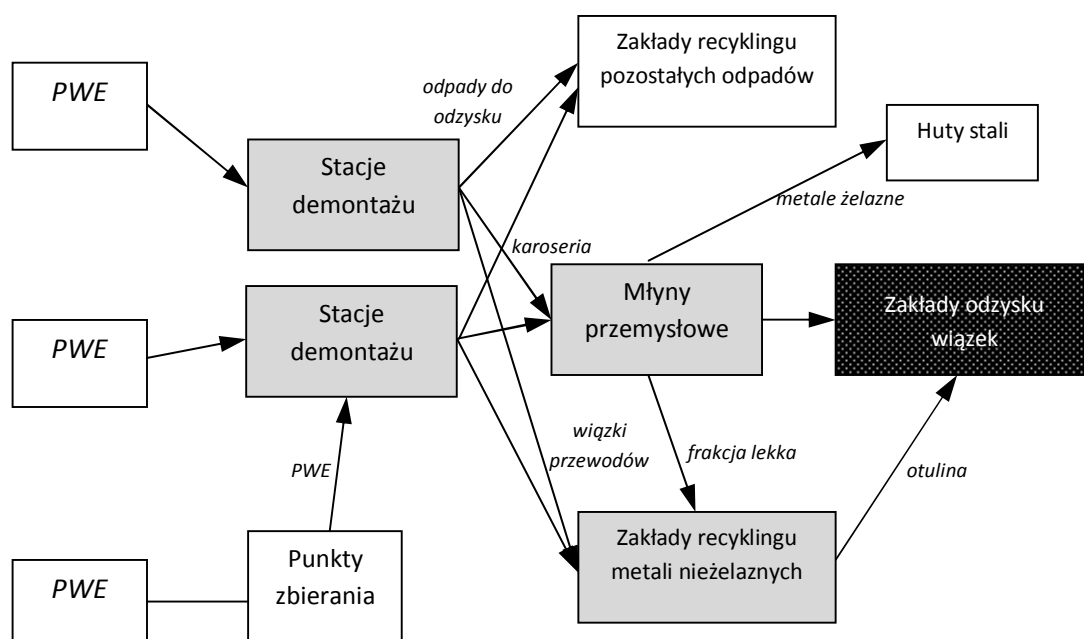
W celu praktycznego zastosowania przedstawionego modelu matematycznego wybrano kombinację dwóch metod heurystycznych, tzw. hybrydowego algorytmu ewolucyjnego będącego połączeniem procedur charakterystycznych dla algorytmów genetycznych oraz metody przeszukiwania lokalnego.

Podstawowe cechy algorytmów genetycznych można przedstawić na następującym przykładzie [6,10]: populacja początkowa tworzona w sposób losowy jest następnie modyfikowana za pomocą operatorów różnicowania (np. krzyżowania), dzięki czemu powstają nowe rozwiązania; w dalszym etapie następuje selekcja rozwiązań prowadzona w taki sposób, że do kolejnej generacji przechodzą rozwiązania najlepsze, które są następnie powielane, a najgorsze się eliminuje; algorytm działa do momentu, aż zostanie spełniony zdefiniowany z góry warunek zatrzymania, polegający na wygenerowaniu określonej liczby rozwiązań albo przekroczeniu określonego czasu.

Z kolei istotą drugiej wykorzystanej w algorytmach ewolucyjnych metody, tj. metody przeszukiwania lokalnego jest to, że zamiast przeszukiwać całą przestrzeń potencjalnych rozwiązań skupiamy się na lokalnym sąsiedztwie jakiegoś konkretnego rozwiązania [10].

#### 4.2. Problem decyzyjny

Problemem decyzyjnym w modelowaniu jest wyznaczenie miejsc lokalizacji przedsiębiorstw zajmujących się odzyskiem otuliny z wiązek przewodów elektrycznych przy założeniu minimalizacji kosztów systemu (na koszty systemu składają się koszty funkcjonowania przedsiębiorstw zajmujących się odzyskiem otuliny oraz koszty transportu odpadów będących wsadem do instalacji odzysku) oraz wyznaczeniu przepływów materiałowych pomiędzy przedsiębiorstwami w łańcuchu technologicznym. System odzysku wiązek obejmuje następujące podmioty: stacje demontażu/punkty zbierania, młyny przemysłowe, zakłady recyklingu metali nieżelaznych, zakłady odzysku wiązek przewodów elektrycznych (w skrócie zakłady odzysku, OW). Powiązania między przedsiębiorstwami przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przedsiębiorstwa sieci odzysku wiązek przewodów elektrycznych i powiązania między nimi  
 Fig. 1. Enterprises of electrical wiring looms recovery networks and connections between them

Pojazdy wycofane z eksploatacji przekazywane są przez właścicieli do stacji demontażu lub punktu zbierania. W stacjach demontażu demontuje się części nadające się do dalszego użytku, następnie elementy i podzespoły przeznaczone do recyklingu materiałowego (w tym wiązki przewodów elektrycznych), a karoseria przesyłana jest do strzępienia w młynach przemysłowych, w których oddziela się metale żelazne i nieżelazne, natomiast pozostałości w postaci frakcji lekkiej najczęściej przekazuje się na składowiska odpadów. Wiązki przewodów elektrycznych przewożone są do zakładów recyklingu metali nieżelaznych, gdzie otulina oddzielana jest od miedzi. Otulinę przekazuje się np. do zakładów odzysku wiązek, gdzie z mieszanki granulatu otuliny i frakcji lekkiej uzyskanej w młynach przemysłowych, powstaje kompozyt.

Z punktu widzenia projektowanego systemu, na lokalizację zakładów odzysku wiązek oraz na przepływy między przedsiębiorstwami mają więc wpływ lokalizacja i przerób zakładów recyklingu metali nieżelaznych oraz młynów przemysłowych. Z kolei lokalizacja i przepływy ze stacji demontażu decydują o ilości odpadów trafiających do zakładów recyklingu i młynów przemysłowych, a tym samym decydują o ich przerobie.

W szczegółowym ujęciu zadania jakie należało podjąć w celu rozwiązania problemu decyzyjnego można przedstawić w następujący sposób:

- określenie wielkości przerobu PWE w poszczególnych stacjach demontażu,
- wyznaczenie kosztów transportu na wszystkich połączeniach tj. transportu wiązek przewodów elektrycznych między stacjami demontażu a zakładami recyklingu metali nieżelaznych, transportu karoserii między stacjami demontażu a młynami przemysłowymi, transportu otuliny między zakładami recyklingu metali nieżelaznych a zakładami odzysku wiązek oraz transportu frakcji lekkiej między młynami przemysłowymi a zakładami odzysku wiązek,
- wyznaczenie wielkości kosztów stałych i zmiennych funkcjonowania zakładów odzysku wiązek przewodów elektrycznych,
- przeprowadzenie komputerowej symulacji przepływów odpadów pochodzących z PWE pomiędzy stacjami demontażu a zakładami recyklingu metali nieżelaznych oraz stacjami demontażu a młynami przemysłowymi,
- budowa modelu matematycznego służącego optymalizacji lokalizacji zakładów odzysku i kształtowania przepływów między przedsiębiorstwami należącymi do sieci,
- implementacja komputerowa modelu matematycznego,
- wyznaczenie lokalizacji zakładów odzysku wiązek oraz określenie wielkości przepływów pomiędzy przedsiębiorstwami oraz kosztów funkcjonowania systemu.

### **4.3. Model matematyczny**

Rozwiązanie zadania optymalizacyjnego obejmowało dwa etapy tj. symulację przepływu PWE oraz odpadów do zakładów recyklingu i młynów przemysłowych (I etap) oraz optymalizację lokalizacji zakładów odzysku wiązek wraz ze wskazaniem przepływów do tych przedsiębiorstw (II etap).

#### ***I etap - symulacja***

Pierwszy etap polegał na dokonaniu symulacji przepływów: PWE do stacji demontażu, pomiędzy stacjami demontażu a zakładami recyklingu metali nieżelaznych, w których następowało oddzielenie otuliny wiązek od metali oraz między stacjami demontażu i młynami przemysłowymi.

Na początku symulacji obliczono liczbę PWE zagospodarowanych w poszczególnych stacjach demontażu na podstawie danych dotyczących liczby zarejestrowanych pojazdów, struktury ludności oraz wskaźnika recyklingu PWE, a następnie dokonano przydziału

strumienia PWE do najbliższych stacji demontażu proporcjonalnie do ich potencjału przerobowego.

W dalszym etapie na podstawie liczby PWE zagospodarowanych w stacjach demontażu dokonano symulacji przepływów do młynów przemysłowych i zakładów recyklingu metali nieżelaznych.

## II etap - optymalizacja

Drugi etap miał na celu wyznaczenie lokalizacji, a tym samym liczby przedsiębiorstw zajmujących się odzyskiem wiązek przewodów elektrycznych. Poszukiwano zatem zbioru **OW** zakładów odzysku wiązek, określono fizyczne wielkości przepływów oraz koszty funkcjonowania systemu.

### 4.4. Parametryzacja modelu

#### 4.4.1. Istniejąca infrastruktura sieci

Jako podstawę organizacji systemu odzysku wiązek przewodów elektrycznych przyjęto funkcjonowanie 792 stacji demontażu. Łączny roczny potencjał przerobowy oszacowano na 1 709 000 PWE. Ponadto system uzupełniało 11 młynów przemysłowych o potencjale przerobowym 1 220 000 ton odpadów rocznie. W kalkulacji przyjęto, że połowa potencjału przerobowego jest wykorzystywana do strzępienia pojazdów, co daje łącznie 610 000 ton odpadów). Listę młynów przemysłowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Młyny przemysłowe działające w Polsce

Table 1

*Industrial mills operating in Poland*

	Nazwa	Lokalizacja (gmina, województwo)	Potencjał przerobowy w tonach	Potencjał przerobowy PWE w tonach
1	Stena	Swarzędz, wielkopolskie	150 000	75 000
2	Centrozłom	Oława, dolnośląskie	150 000	75 000
3	Scrapena	Herby, śląskie	150 000	75 000
4	CMC Zawiercie	Zawiercie, śląskie	480 000	240 000
5	Olszański	Pruszków, mazowieckie	50 000	25 000
6	WtórSteel	Stalowa Wola, podkarpackie	50 000	25 000
7	Złompol	Tarczyn, mazowieckie	50 000	25 000
8	Olmot	Tarnowskie Góry, śląskie	30 000	15 000
9	Polcopper	Śmigiel, wielkopolskie	30 000	15 000
10	Mag Ferrum	Nowy Sącz, małopolskie	30 000	15 000
11	Sonnenfeld	Grudziądz, kujawsko- pomorskie	50 000	25 000
	<b>Razem</b>		<b>1 220 000</b>	<b>610 000</b>

Trzecią grupą podmiotów uzupełniających sieć odzysku wiązek stanowią zakłady recyklingu metali nieżelaznych (oddzielają otulinę przewodów od metalowych rdzeni). W modelowaniu uwzględniono 30 przedsiębiorstw tego typu o łącznym potencjale przerobowym 215 310 ton odpadów rocznie, przy czym na potrzeby modelowania założono, że przedsiębiorstwa te są w stanie przyjąć 76 837 ton wiązek rocznie, co przedstawiono w tabeli 2.



Tabela 2

Zakłady recyklingu metali nieżelaznych działające w Polsce

Table 2

*Non-ferrous metal recycling plants operating in Poland*

	Nazwa	Lokalizacja (gmina, województwo)	Potencjal przerobowy w tonach	Potencjal przerobowy wiązek w tonach
1	Betamet	Opalenica, wielkopolskie	850	283
2	Wtór-Pol Brzoza	Nowa Wieś, kujawsko-pomorskie	1 200	400
3	Polcopper Śmigiel	Śmigiel, wielkopolskie	7 000	2 333
4	Polcopper Poznań	Poznań, wielkopolskie	7 000	2 333
5	Polcopper Dąbrowa Górnica	Dąbrowa Górnica, śląskie	7 000	2 333
6	Polcopper Wolsztyn	Wolsztyn, wielkopolskie	7 000	2 333
7	Polcopper Gostyń	Gostyń, wielkopolskie	7 000	2 333
8	Polcopper Rawicz	Rawicz, wielkopolskie	7 000	2 333
9	Polcopper Wrocław	Wrocław, dolnośląskie	7 000	2 333
10	Polcopper Ostrzeszów	Ostrzeszów, wielkopolskie	7 000	2 333
11	Polcopper Wronki	Wronki, wielkopolskie	7 000	2 333
12	Polcopper Stęszew	Stęszew, wielkopolskie	7 000	2 333
13	Polcopper Zielona Góra	Zielona Góra, lubuskie	7 000	2 333
14	Polcopper Brzoza	Nowa Wieś, kujawsko-pomorskie	7 000	2 333
15	Karmil	Inowrocław, kujawsko-pomorskie	20	7
16	Karen	Poraj, śląskie	10	3
17	Filmar	Komorniki, wielkopolskie	20	7
18	BSK Return	Zawiercie, śląskie	10	3
19	Stena Włocławek	Włocławek, kujawsko-pomorskie	7 200	2 400
20	Stena Inowrocław	Inowrocław, kujawsko-pomorskie	7 200	2 400
21	Stena Żory	Żory, śląskie	7 200	2 400
22	KGHM Głogów	Głogów, dolnośląskie	20 000	6 667
23	Odlewnia Szopienice	Katowice, śląskie	20 000	6 667
24	Frontal Konin	Konin, wielkopolskie	20 000	6 667
25	Walcownia Dziedzice	Czechowice-Dziedzice, śląskie	20 000	6 667
26	Hutmen Wrocław	Wrocław, dolnośląskie	20 000	6 667
27	Gruba Recykling	Wejherowo, pomorskie	2 400	2 400
28	Polblume	Góra Kalwaria, mazowieckie	2 400	2 400
29	Metal Punkt	Myślenice, małopolskie	2 400	2 400
30	Kat metal	Ujazd, opolskie	400	400
			215 310	76 837

#### 4.4.2. Wielkość strumienia odpadów

W modelowaniu wykorzystano dwie wielkości strumienia odpadów PWE: 300 000 PWE i 800 000 PWE oraz dwa warianty demontażu 5 kg i 10 kg wiązek z każdego pojazdu. W wariantcie demontażu 5 kg wiązek powstają 3 kg metali nieżelaznych i 2 kg odpadów otuliny, a w wariantcie dla 10 kg wiązek – 6 kg metali nieżelaznych i 4 kg

odpadów otuliny. Ilość odpadów otuliny i metali nieżelaznych z wiązek przewodów elektrycznych przy podaży 300 000 i 800 000 PWE przedstawiono w tabeli 3.

Ilości odpadów z wiązek przewodów elektrycznych

Tabela 3

*Quantities of waste from wiring looms*

Table 3

	Podaż 300 tysięcy PWE		Podaż 800 tysięcy PWE	
	5 kg wiązek	10 kg wiązek	5 kg wiązek	10 kg wiązek
Wiązki przewodów elektrycznych [kg]	1 500 000	3 000 000	4 000 000	8 000 000
Otulina [kg]	600 000	1 200 000	1 600 000	3 200 000
Metale nieżelazne [kg]	900 000	1 800 000	2 400 000	4 800 000

W założeniu przyjęto, że pozostała po demontażu karoseria (przekazywana do młynów przemysłowych) o średniej masie 676 kg daje do 67 kg frakcji lekkiej, co stanowi około 10% wsadu do młyna. Frakcja lekka jest odbierana przez zakłady odzysku wiązek jako uzupełnienie wsadu z otuliny. Proporcja wsadu do instalacji jest równa 50%-50%, a potencjał przerobowy instalacji wynosi 1 200 ton w skali roku.

Pozostałe parametry tj. koszty funkcjonowania zakładów odzysku wiązek i transportu odpadów przyjęto zgodnie z danymi z pracy doktorskiej K. Sicińskiej pt. *System odzysku wiązek przewodów elektrycznych z pojazdów wycofanych z eksploatacji* [13].

#### 4.5. Optymalna lokalizacja zakładów odzysku

##### 4.5.1. Wyniki optymalizacji dla strumienia 300 tysięcy PWE

###### *Wariant demontażu 5 kg wiązek z PWE*

Dla podaży 300 000 pojazdów, przy założeniu, że z jednego wymontuje się 5 kg wiązek, co daje 2 kg otuliny z każdego PWE, do zagospodarowania jest 600 000 kg granulatu PVC rocznie. Do tego dokłada się tyle samo frakcji lekkiej, więc łączny przerób powinien wynieść 1 200 000 kg (1 200 ton), zatem do zagospodarowania całości odpadów z otuliny wystarczy jeden zakład odzysku wiązek o przerobie 1 200 ton.

W wyniku optymalizacji, na lokalizację tego zakładu odzysku wiązek wybrano gminę Herby w województwie śląskim. Zakład powinien współpracować z jednym młynem przemysłowym, Scrapena Herby. Otulina powinna być dostarczana z 27 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 1-11, 13-25, 27-30, tabela 2).

Analizę kosztów funkcjonowania zakładu przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Analiza kosztów systemu dla podaży 300 000 PWE i głębokości demontażu 5 kg wiązek

Table 4

*Analysis of the system costs for the supply of 300,000 ELVs and the removal of 5 kg wiring looms*

Rodzaj kosztów	Wartość PLN	Udział w całości kosztów
Koszty transportu otuliny z zakładów recyklingu	167 100	4,6%
Koszty transportu frakcji lekkiej MP-OW	17 280	0,5%
Koszt działalności zakładu odzysku wiązek	3 435 400	94,9%
<b>Suma kosztów systemu</b>	<b>3 619 780</b>	<b>100%</b>

###### *Wariant demontażu 10 kg wiązek z PWE*

Dla podaży 300 000 pojazdów i przy założeniu, że z jednego pojazdu wymontowuje się 10 kg wiązek, co daje 4 kg otuliny z każdego PWE, do zagospodarowania jest 1 200 000

kg granulatu PCV rocznie. Do tego dokłada się tyle samo frakcji lekkiej, więc łączny przerób powinien wynieść 2 400 000 kg odpadów, co oznacza, że do zagospodarowania całości odpadów należy uruchomić dwa zakłady odzysku wiązek o przerobie 1 200 ton każdy.

W wyniku optymalizacji na lokalizację zakładów odzysku wiązek wybrano gminy Swarzędz (zakład 1) i Zawiercie (zakład 2), w których funkcjonują młyny przemysłowe.

Zakład 1 powinien współpracować z młynem przemysłowym Stena, a otulina powinna być dostarczana do niego z 21 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 1-4, 6-18, 20, 22, 24, 27 – tabela 2). Zakład 2 powinien współpracować z młynem CMC Zawiercie i z 6 zakładami recyklingu metali nieżelaznych (nr 5, 19, 21, 23, 25, 26 – tabela 2).

Całkowite koszty funkcjonowania systemu przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5  
Analiza kosztów systemu dla podaży 300 000 PWE i głębokości demontażu 10 kg wiązek

Table 5  
Analysis of the system costs for the supply of 300,000 ELVs and the removal of 10 kg wiring looms

Rodzaj kosztów	Wartość PLN	Udział w całości kosztów
Koszty transportu otuliny z zakładów recyklingu	156 600	2,2%
Koszty transportu frakcji lekkiej MP-OW	34 560	0,5%
Koszt działalności zakładu odzysku wiązek	6 871 800	97,3%
<b>Suma kosztów systemu</b>	<b>7 062 960</b>	<b>100%</b>

#### 4.5.2. Wyniki optymalizacji dla strumienia 800 tysięcy PWE

##### Wariant demontażu 5kg wiązek z PWE

Dla podaży 800 000 pojazdów i przy założeniu, że z jednego pojazdu wymontowujemy 5 kg wiązek, które są przekazywane do zakładów recyklingu metali dając 2 kg otuliny z każdego PWE, należy zagospodarować 1 600 000 kg granulatu w ciągu roku. Do tego dokładamy tyle samo frakcji lekkiej, zatem łączny przerób zakładów odzysku powinien wynieść 3 200 000 kg, a żeby zagospodarować całość odpadów z otuliny w kraju powinny funkcjonować trzy zakłady odzysku wiązek.

W wyniku optymalizacji na lokalizację zakładów odzysku wiązek wybrano gminy Grudziądz (zakład 1), Tarnowskie Góry (zakład 2) i Śmigiel (zakład 3), w których funkcjonują młyny przemysłowe.

Zakład 1 powinien współpracować z młynem przemysłowym Sonnenfeld, a otulina powinna być dostarczana do niego z 4 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 17, 18, 24, 25 – tabela 2). Zakład 2 powinien współpracować z młynem Olmet oraz z 9 zakładami recyklingu metali nieżelaznych (nr 5, 14, 16, 19, 21, 23, 25-27 – tabela 2), a zakład 3 z młynem Polcopper i 15 zakładami recyklingu metali nieżelaznych (nr 1-4, 6-13, 15, 20, 22 – tabela 2). Całkowite koszty funkcjonowania systemu przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6  
Analiza kosztów systemu dla podaży 800 000 PWE i głębokości demontażu 5 kg wiązek

Table 6  
Analysis of the system costs for the supply of 800,000 ELVs and the removal of 5 kg wiring looms

Rodzaj kosztów	Wartość PLN	Udział w całości kosztów
Koszty transportu otuliny z zakładów recyklingu	155 200	1,6%
Koszty transportu frakcji lekkiej MP-OW	46 068	0,5%
Koszt działalności zakładu odzysku wiązek	9 366 200	97,9%
<b>Suma kosztów systemu</b>	<b>9 567 468</b>	<b>100%</b>

*Wariant demontażu 10 kg wiązek z PWE*

Dla podaży 800 000 pojazdów i przy założeniu, że z jednego pojazdu wymontowujemy 10 kg wiązek, które są przekazywane do zakładów recyklingu metali dając 4 kg otuliny z każdego PWE, należy zagospodarować 3 200 000 kg granulatu w ciągu roku. Po dodaniu frakcji lekkiej oznacza to, że zakłady odzysku powinny przerobić 6 400 000 kg odpadów. Zatem w celu zagospodarowania całości odpadów z otuliny należy uruchomić sześć zakładów odzysku wiązek.

Każdy z zakładów odzysku wiązek powinien być zlokalizowany w gminie, w której funkcjonuje młyn przemysłowy, a otulina powinna być dostarczana w następujący sposób: do zakładu w Tarnowskich Górach z 7 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 5, 14, 16, 19, 21, 23, 27 – tabela 2), do zakładu w Grudziądzu z 5 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 2, 13, 17, 18, 24 – tabela 2), do zakładu w Tarczynie z 1 zakładu recyklingu metali nieżelaznych (nr 25 – tabela 2), do zakładu w Zawierciu z 3 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 5, 25, 26 – tabela 2), do zakładu w Swarzędzu z 4 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 4, 11, 15, 22 – tabela 2), do zakładu w Śmigielu z 9 zakładów recyklingu metali nieżelaznych (nr 1, 3, 6-10, 12, 20 – tabela 2), Całkowite koszty funkcjonowania systemu przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Analiza kosztów systemu dla podaży 800 000 PWE i głębokości demontażu 10 kg wiązek

Table 7

*Analysis of the system costs for the supply of 300,000 ELVs and the removal of 10 kg wiring looms*

Rodzaj kosztów	Wartość PLN	Udział w całości kosztów
Koszty transportu otuliny z zakładów recyklingu	134 200	0,7%
Koszty transportu frakcji lekkiej MP-OW	92 136	0,5%
Koszt działalności zakładu odzysku wiązek	18 732 400	98,8%
<b>Suma kosztów systemu</b>	<b>18 558 736</b>	<b>100%</b>

**4.6. Analiza porównawcza wyników optymalizacji**

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji oraz analizy ekonomicznej i modelowania sieci odzysku wiązek stwierdzono, że w Polsce powinno funkcjonować od 1 do 6 zakładów odzysku wiązek przewodów elektrycznych o potencjale 1 200 t/rok.

Każdy zakład odzysku wiązek powinien współpracować tylko z jednym, najbliższym położonym młynem przemysłowym (najlepiej w tej samej gminie) dostarczającym frakcję lekką i wieloma zakładami dostarczającymi granulatu.

Natomiast niezależnie od podaży PWE oraz głębokości demontażu liczba zakładów recyklingu metali nieżelaznych dostarczających otulinę do przerobu jest taka sama i jest równa 27; to najbardziej efektywny wariant struktury sieci minimalizujący koszty jej funkcjonowania tj. zapewniający przetwarzanie założonej ilości odpadów przy minimalnym koszcie transportu (tabela 8).

Tabela 8

Analiza porównawcza optymalnej struktury systemu odzysku wiązek w Polsce

Table 8

Comparative analysis of the optimal structure of the wiring looms recovery system in Poland

	Podaż 300 tysięcy PWE		Podaż 800 tysięcy PWE	
	5 kg wiązek	10 kg wiązek	5 kg wiązek	10 kg wiązek
Liczba zakładów odzysku	1	2	3	6
Średni przerób zakładu odzysku w kg	1 199 920	1 199 919	1 066 432	1 066 432
Liczba współpracujących młynów przemysłowych	1	2	3	6
Liczba współpracujących zakładów recyklingu metali nieżelaznych	27	27	27	27

Całkowity koszt systemu wynosi od 3,6 milionów PLN rocznie dla podaży 300 000 PWE i demontażu 5 kg wiązek z jednego PWE do 19 milionów PLN rocznie dla podaży 800 000 PWE i demontażu 10 kg wiązek (tabela 9).

Koszty transportu frakcji lekkiej zmieniają się wprost proporcjonalnie do ilości zagospodarowanej frakcji, gdyż transporty te realizowane są w takich samych jednostkach ładunkowych, a zakłady odzysku zawsze zlokalizowane są w pobliżu młynów przemysłowych. Z kolei koszty transportu otuliny zmniejszają się wraz z rosnącym przerobem, co wynika z realizacji większych transportów o niższych jednostkowych kosztach zmiennych oraz z krótszych odległości.

Tabela 9

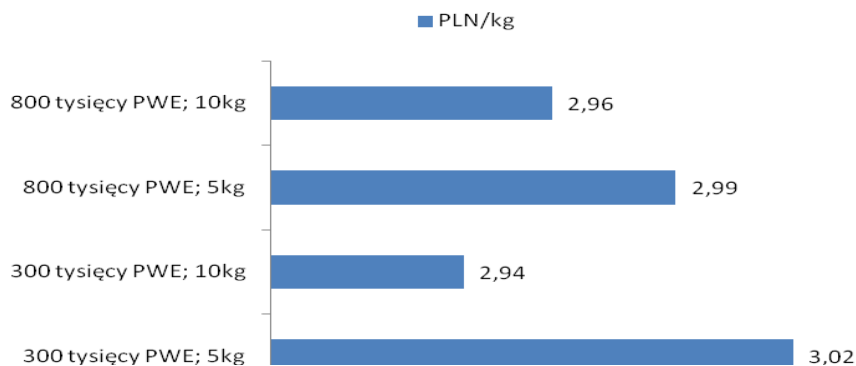
Analiza porównawcza kosztów systemu odzysku wiązek w Polsce

Table 9

Comparative analysis of the costs of the the wiring looms recovery system in Poland

	Podaż 300 tysięcy PWE		Podaż 800 tysięcy PWE	
	5 kg wiązek	10 kg wiązek	5 kg wiązek	10 kg wiązek
Koszty transportu otuliny	167 100	156 600	155 200	134 200
Koszty transportu frakcji lekkiej	17 280	34 560	46 068	92 136
Koszty funkcjonowania zakładów odzysku	3 435 400	6 871 800	9 366 200	18 732 400
Całkowite koszty systemu	3 619 780	7 062 960	9 567 468	18 958 736

Najbardziej efektywny ekonomicznie w przeliczeniu na jednostkę masy jest wariant głębokiego demontażu przy podaży pojazdów na poziomie 300 000 PWE (rys. 2). Podobnie, choć nieznacznie droższy jest jednostkowy koszt zagospodarowania kilograma odpadu w wariantcie głębokiego demontażu dla podaży 800 tysięcy PWE. W obu przypadkach głębszy demontaż i tym samym większe transporty otuliny przy tej samej podaży pojazdów powodują zmniejszenie jednostkowych kosztów transportu i tym samym obniżają całkowite koszty funkcjonowania systemu. Najmniej korzystny jest wariant płytkiego demontażu dla podaży 300 000 PWE.



Rys. 2. Porównanie kosztów przerobu 1 kg odpadów w zależności od przyjętych założeń  
Fig. 2. Comparison of the processing costs of 1 kg of waste depending on the assumptions made

## 5. Wnioski

Analiza modelu systemu odzysku wiązek przewodów elektrycznych z pojazdów wycofanych z eksploatacji wykazała, że:

- najbardziej optymalny jest system obejmujący od 1 do 6 zakładów odzysku wiązek elektrycznych, w zależności od wielkości podaży odpadów,
- głęboki demontaż (10 kg wiązek z każdego PWE) pozwala na uzyskanie mniejszych jednostkowych kosztów zagospodarowania odpadów w stosunku do demontażu płytkiego (5 kg wiązek/PWE),
- płytki demontaż (5 kg wiązek z każdego PWE) jest najmniej efektywny ekonomicznie, z uwagi na to, że potencjał przerobowy otwartych zakładów odzysku nie jest optymalnie wykorzystany,
- najbardziej efektywny ekonomicznie w przeliczeniu na jednostkę masy jest wariant głębokiego demontażu przy podaży pojazdów na poziomie 300 000 PWE.

Każdy sposób wykorzystania pojazdów wycofanych z eksploatacji przynosi podwójne korzyści, z jednej strony poprzez zagospodarowanie odpadów, które w innym przypadku musiałyby być deponowane na składowiskach, a z drugiej poprzez oszczędności zużycia zasobów pierwotnych i zastąpienie ich, tam gdzie jest to możliwe, materiałami z produkcji wtórnej.

## LITERATURA:

- [1] Ankieta ITS w zakresie pozyskiwania wiązek przewodów elektrycznych z samochodów wycofanych z eksploatacji w stacjach demontażu, FORS, 2011.
- [2] Dane CEP, [www.cepik.gov.pl](http://www.cepik.gov.pl), 1.06.2013.
- [3] Dane SGM Magnetics, [www.sgm-magnetics.com](http://www.sgm-magnetics.com), 20.11.2011.
- [4] Dane źródłowe CMC Commercial Metals, Zawiercie, 24.10.2012.
- [5] Dyrektywa 2000/53/EC Parlamentu Europejskiego i Rady z 18 września 2000 w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji, Dziennik oficjalny OJ269, 21.10.2000.
- [6] Gen M., Cheng R., Genetic Algorithms and Engineering Design, Wiley, New York, USA, 1997.
- [7] Główny Urząd Statystyczny, portal informacyjny, 2016.

*Analiza modelu systemu odzysku wiązek...*

- [8] Jacyna M., Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych.
- [9] Merkisz-Guranowska A., Ocena skutków regulacji prawnych wynikających z nowelizacji Ustawy o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji, Raport dla FORS, Poznań 2013.
- [10] Michalewicz Z., Fogel D.B., Jak to rozwiązać czyli nowoczesna heurystyka, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [11] Osman I.H., Laporte G., Metaheuristics: A bibliography, *Annals of Operation Research*, vol. 63, pp. 513-623, 1996.
- [12] Recykling samochodów Europa, Toyota Motor Marketing Europe, Environmental Affairs Co-ordination Office, 2002.
- [13] Sicińska K., System odzysku wiązek przewodów elektrycznych z pojazdów wycofanych z eksploatacji, praca doktorska, Poznań 2013.