

mgr Jakub Szalatkiewicz
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

ZROBOTYZOWANY DEMONTAŻ ODPADÓW ZUŻYTEGO SPRZĘTU ELEKTRYCZNEGO I ELEKTRONICZNEGO W CELU ODZYSKU SUROWCÓW

W artykule przeanalizowano możliwość zastosowania zrobotyzowanego demontażu odpadów zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEE) jako sposobu utylizacji pozwalającej na odzysk surowców z tej grupy odpadów. Opisano skalę zjawiska związanego z odpadami ZSEE oraz obecnie stosowane technologie. Opracowano i przedstawiono kryteria wyboru odpadów, pozwalające na znaczące uproszczenie stosowanych rozwiązań robotyzacji, a także umożliwiające identyfikację i analizę odpadów ZSEE pod kątem możliwości przetwarzania w zrobotyzowanych stanowiskach demontażu. Na podstawie wyłonionego według tych kryteriów odpadu przedstawiono parametry komputerowych twardych dysków (HDD) oraz kompletny proces demontażu, obejmujący czynności, porównanie czasów demontażu, oraz ilości odzyskanych surowców.

ROBOTIZED DISASSEMBLY OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE) FOR RESOURCES RECOVERY

In article survived the possibility of robotized dismantling of waste of electrical and electronic equipment (WEEE), as a way allowing recovery of raw materials from this group of waste. Author describes the scale of the WEEE waste problem and currently used technologies for its processing. The paper provides criteria for selection of waste, enabling significant simplification of robotic applied solutions, as well as enabling the identification and analysis of WEEE waste for processing purposes in robotic dismantling workstations. On the basis of these criteria computer hard disk drive was chosen, and closely described, as WEEE waste with parameters, allowing to be processed in robotic dismantling process. Based on this waste example, complete robotized dismantling process, including operations, comparison, and the times of disassembly with recovered materials was described.

1. WSTĘP

Odpady zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEE) to problem globalny, o dużej skali. W 27 krajach UE szacuje się, że masa wytwarzanych odpadów ZSEE wynosiła 8,3–9,1 mln ton [Mg] w 2005 r., z czego 25 % jest zbierane i przetwarzane, zaś pozostałe 75 % nie jest rejestrowane [1, 2], na co może mieć wpływ brak dostosowanych technologii przetwarzania tych odpadów. Problem rosnącej masy odpadów ZSEE [3, 4] dotyczy w największym stopniu krajów wysokorozwiniętych. W Szwecji zbiera się 16,7 kg/osobę, w Wielkiej Brytanii 8,2 kg/osobę, w Austrii 6,5 kg/osobę [5]. W Polsce zamierza się zbierać 4 kg ZSEE/osobę. Z raportów Głównego Inspektora Ochrony Środowiska wynika, że w przeliczeniu na osobę w 2008 r. zebrano 1,45 kg/osobę, a w 2009 r. – 2,7 kg/osobę, zaś masa zebranego zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego wynosiła w 2008 r. 56425,8 Mg, a w 2009 r. – 108792,5 Mg [6]. Wiodące jest, że ilość zbieranych odpadów ZSEE sukcesywnie rośnie, dlatego ważne jest pytanie o sposoby ich przetwarzania i możliwe do odzyskania surowce.

2. OBECNIE STOSOWANE TECHNOLOGIE PRZETWARZANIA ODPADÓW ZSEE

Głównymi metodami przetwarzania odpadów ZSEE są ręczny demontaż oraz metody mechaniczne polegające na młeleniu i wielostopniowym rozdrobnieniu rozdrobnionych materiałów. Po wyższe powszechnie stosowane podejścia do przetwarzania i recyklingu odpadów z grupy ZSEE mają swoje wady i zalety. Przykładowy stopień odzysku surowców ze zużytych pralek i kuchenek przedstawia tab. 1.

Tab. 1. Stopień odzysku surowców dla mechanicznego i ręcznego przetwarzania [7]

Pralki		Kuchenki
Mielenie	44,1 %	74,9 %
Ręczny demontaż	95,6 %	90,6 %

Uzupełnieniem tych dwóch głównych podejść są technologie specjalistyczne nastawione na przetwarzanie zdemontowanych podzespołów, np. przetwarzanie obwodów drukowanych przy wykorzystaniu pirolizy [8] lub spalania odpadów.

Najbardziej elastyczną i pozwalającą na najwyższy odzysk surowców jest technologia ręcznego demontażu, umożliwiająca przetwarzanie zróżnicowanych odpadów zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Jest to jednak sposób pracochłonny i wymaga bezpośredniego kontaktu ludzi z odpadami ZSEE zawierającymi substancje niebezpieczne. Ręczny demontaż polega na zdemontowaniu podzespołów urządzeń i ich segregacji na surowce, z których zostały wykonane, stosowane są również rozwiązania automatyzujące niektóre powtarzalne czynności. Ręczny demontaż stanowi często pierwszy etap przetwarzania odpadów ZSEE w technologii mechanicznej obróbki – mielenia – mający na celu wyodrębnienie substancji niebezpiecznych oraz części, które nie mogą być w ten sposób przetwarzane. Mechaniczna obróbka polega na rozdrobnieniu odpadów w młynie w celu późniejszego ich rozdzielenia. Sposób ten pozwala na przetwarzanie dużych ilości odpadów, lecz jego wadami są wysoki nakład energetyczny związany z mieleniem i separacją surowców, niższy poziom odzysku, a także zanieczyszczenie wydzielonych surowców.

W przypadku urządzeń zawierających substancje niebezpieczne, np. rtęć, duża partia surowca może ulec zanieczyszczeniu. Mechaniczne przetwarzanie pozwala na skuteczny odzysk surowców z odpadów przez wzgląd na nakłady niezbędne do pozyskania surowców z ich naturalnych źródeł, lecz jednocześnie uciążliwa potrzeba opracowania nowej technologii umożliwiającej odzysk surowców o wysokiej czystości w sposób wysoce efektywny i niewymagający tak dużych nakładów energetycznych.

W przypadku niektórych rodzajów odpadów możliwe jest zastosowanie metod stosowanych w masowej produkcji związanych z użyciem robotów do wykonywania powtarzalnych czynności. W wyniku, tego stanie się możliwe przetwarzanie dużych wolumenów odpadów w ekonomiczny i skuteczny sposób. Aktualnie na świecie trwają prace nad robotyzacją procesów przetwarzania odpadów zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Przykładami są prace polegające na tworzeniu modeli linii do demontażu monitorów LCD [9], czy polegające na automatyzacji demontażu podzespołów z obudów komputerów stacjonarnych [10]. Spotyka się również prototypową automatyzację i zastępowanie niektórych czynności w istniejących przedsiębiorstwach przetwarzających zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, np. automatyczne rozkręcanie wymontowanych silników z pralek, przenoszenie podzespołów przy wykorzystaniu manipulatorów wyposażonych w chwytaki i inne [11].

Zrobotyzowany demontaż jest podejściem alternatywnym do tradycyjnych technologii, mielenia i ręcznego przetwarzania. Zrobotyzowany demontaż łączy w sobie zalety ręcznego demontażu przez możliwość jego dostosowania do różnych odpadów, z dużymi możliwościami przerobowymi, którym i charakteryzuje się mechaniczne przetwarzanie odpadów. Jednocześnie

pozwała na uzyskanie wysokiej czystości surowców z odpadów przy minimalnych nakładach energetycznych i pracy ludzkiej.

3. TECHNOLOGIA ZROBOTYZOWANEGO DEMONTAŻU

Założenia zrobotyzowanego demontażu opierają się na znanych rozwiązaniach stosowanych w przemyśle wykorzystującym zaawansowaną automatykę i robotykę. Dzięki szybkości, powtarzalności i precyzji pozycjonowania stanowisko demontażu może być małe, a jednocześnie charakteryzować się wysoką sprawnością i dużym przerobem. W uproszczeniu można określić zrobotyzowany demontaż jako proces odwrotny do zrobotyzowanej produkcji lub jako zastąpienie pracy ludzkiej przy demontażu przez zastosowanie robota. W oparciu o znane procedury ręcznego demontażu możliwe jest ich zastąpienie przez zrobotyzowane narzędzia. Cały proces demontażu może zostać zorganizowany w postaci linii technologicznej ze stanowiskami i robotów, na których następują po sobie kolejne etapy rozbiórki urządzeń i segregacji surowców.

Przewagą zrobotyzowanego demontażu jest zastosowanie energoszczędnych metod rozdzielania połączonych podzespołów w odróżnieniu od energochłonnych procesów mechanicznej obróbki. Realizowane jest to głównie w oparciu o narzędzia do rozłączania połączeń gwintowanych zamocowane na manipulatorach robotów i przenoszenie rozdzielonych podzespołów, które to czynności są najmniej energochłonnym sposobem przetwarzania odpadów ZSEE.

Proces zrobotyzowanego demontażu może być prowadzony na dwa sposoby: w pełni zaprogramowany, liniowy pod względem algorytmu postępowania oraz dynamiczny, elastycznie dopasowujący się do danych odczytywanych z systemów pomiarowych i dobierający czynności na ich podstawie.

Robotyzacja w oparciu o algorytmy różnorodne, dynamiczne, samoadaptujące się do danych zbieranych z sensorów jest zagadnieniem skomplikowanym i wielowymiarowym, wymagającym zaawansowanej sensoryki, analizy obrazu, danych i możliwości wykonania poszczególnych czynności. Przez wzgląd na skomplikowanie tego podejścia nie jest ono rozwijane w tej pracy, choć w odniesieniu do przetwarzania odpadów może w przyszłości okazać się ciekawym i skutecznym narzędziem pozwalającym na zastosowanie zrobotyzowanego przetwarzania zróżnicowanych odpadów.

Z kolei robotyzacja demontażu w oparciu o algorytmy liniowe pozwala na skuteczną i możliwie najprostszą aplikację zrobotyzowanego demontażu. Robotyzacja w oparciu o algorytmy liniowe możliwa jest do zastosowania w przypadku powtarzalnych urządzeń poddawanych procesowi demontażu. Podejście to znacznie upraszcza wymagane do obsługi robotów rozwiązania sterowania i redukuje ilość niezbędnych sensorów i operacji obliczeniowych, sprowadzając całość procesu do powtarzalnej sekwencji czynności, w wyniku których realizowany jest proces demontażu. Raz zaprogramowane stanowisko – linia zrobotyzowanego demontażu – może realizować ten sam program na nieograniczonej ilości jednakowych odpadów. Jednakże ze względu na dużą różnorodność ZSEE, np. wielość modeli, producentów etc., niezbędne jest dołączenie modułu identyfikacji parametrów przetwarzanych odpadów (kod kreskowy, OCR – rozpoznawanie tekstu), dzięki czemu zostają poszerzone możliwości przetwórcze stanowiska. Po rozpoznaniu odpadu następuje wybór programu demontażu z pamięci algorytmów i realizowany jest proces demontażu konkretnego odpadu. Jednakże stanowisko demontażu ma ograniczenie możliwości przetwarzania odpadów, wynikające z różnic w budowie odpadów i konieczności stosowania do demontażu różnych narzędzi. Dlatego niemożliwa jest utylizacja na tym samym stanowisku znacząco różniących się odpadów, np. monitorów i twardej dysków, lecz możliwe jest przetwarzanie wszystkich twardej dysków niezależnie od modelu czy producenta. Z powyższego wynika specyfika technologii zrobotyzowanego demontażu, której ograniczeniem jest możliwość przetwarzania tylko zaprogramowanych i „podobnych” odpadów, algorytm przetwarzania każdego

nowego modelu urządzenia będzie musiał zostać wprowadzony do linii technologicznej, żeby było możliwe jego użycie.

Powyzsza specyficznośc zrobotyzowanego demontażu sprawia, że s taje si ę konieczne dok ładne określenie, które grupy odpadów kwalifikują się do przetwarzania w ramach tej technologii.

4. CECHY ODPADU UŁATWIAJĄCE ZROBOTYZOWANY DEMONTAŻ – KRYTERIA WYBORU

Zrobotyzowany demontaż realizowany na podstawie powtarzalnych i zaprogramowanych czynności wykonywanych przez robota, wymaga innego niż standardowe post ępowania z odpadami. Nie wszystkie odpady mogą zostać przetworzone ze względu na swoje cechy i inne czynniki (np. wartość odzyskanych surowców), st ąd wynika koniecznośc ich selekcji i kategoryzacji. W celu identyfikacji odpadów ZSEE kwalifikujących się do przetwarzania w technologii zrobotyzowanego demontażu opracowano kryteria wy łąniające odpady, których przetwarzanie może zostać przeprowadzone w oparciu o algorytmy liniowe, są to:

– Parametry fizyczne: podobna budowa, standaryzowane wym iary zewnętrzne, rozstawy otworów montażowych, łatwa do demontażu konstrukcja i budowa z niewielkiej liczby jednorodnych podzespołów.

– Kryterium surowcowe: odpady zawierają wartościowe surowce, których odzysk jest uzasadniony gospodarczo, ekologicznie i ekonomicznie.

– Czynniki rynkowe: faza cyklu życia produktu, ilość i masa odpadu na rynku i w sprzedaży, trend wzrostowy sprzedaży.

– Dodatkowe kryteria: łatwość wyodr ębniania danego odpadu, dobry stan fizyczny – bez deformacji, możliwość identyfikacji odpadu, jak również obecnie stosowane

metody recyklingu o wysokiej skuteczności i dużej energochłonności, pracochłonności.

W oparciu o powyższe kryteria zidentyfikowano grupy odpadów, a spośród nich do szczególnej analizy wybrano komputerowy dysk twardy HDD (fot. 1) jako odpad w pełni spełniający wszystkie powyższe kryteria.



Fot. 1. Przykładowy dysk HDD 3,5";
widok od strony elektroniki

5. CHARAKTERYSTYKA TWARDYCH DYSKÓW JAKO ODPADU KWALIFIKUJĄCEGO SIĘ DO PRZETWARZANIA W TECHNOLOGII ZROBOTYZOWANEGO DEMONTAŻU

Komputerowe dyski twarde, znajdują się w komputerach i innych urządzeniach IT, RTV, a tak że często występują sam odzielnie wśród odpadów ZSEE (w sytuacji, gdy są one wymieniane na nowe). Z racji szybkiego starzenia się rozwiązań IT następuje częsta wymiana dysków twardech i całych komputerów – trend wzrostowy sprzedaży prowadzący do wzrostu masy odpadów do przetworzenia. W 2007 r. na świecie sprzedano łącznie 516 mln [12] dysków twardech.

W odniesieniu do Polski szacuje się że roczna sprzedaż HDD wynosi około 5,6 mln sztuk, zaś przyszła masa odpadów twardech dysków to 2 500 Mg [13]. Biorąc pod uwagę ilość dysków twardech sprzedanych na świecie w 2009 r. [550 mln sztuk], co roku masa odpadów HDD w skali świata jest równa 283 250 Mg (Polska 1 %). Z przytoczonych danych wynika, że powstająca co roku masa odpadów HDD jest na tyle znacząca, że możliwa do odzyskania z niej ilość surowców uzasadnia opracowanie nowych technologii przetwarzania tych odpadów.

Komputerowy dysk twardy charakteryzuje się zunifikowanym i wymiarami zewnętrznymi [kilka modeli np. 2,5", 3,5"], o standardowym rozstawie otworów montażowych i gabarytach. Jego budowa jest prosta i opiera się na chassis, w którym zamontowane są podzespoły dysku. Wyodrębnianie twardych dysków z komputerów nie stanowi problemu, jest to standardowa procedura w wielu firmach przetwarzających ZSEE, a ich stan fizyczny jest dobry – bez deformacji. Ponadto na świecie prowadzone są badania nad automatycznym demontażem podzespołów z komputerów [14], co w przyszłości umożliwi poszerzenie dostępnych rozwiązań zrobotyzowanego demontażu na inne odpady i ogół czynności z tym związanych.

Istotnym parametrem są również surowce, które mogą zostać odzyskane z odpadu. W przypadku twardych dysków głównie są to: alu minium, metale ferromagnetyczne (w tym magnesy), metale nierdzewne, oraz złom inny (tab. 2).

Tablica 2. Średni udział masowy surowców w dyskach twardych [15]

Rodzaj materiału	Średnia masa z badanej próby	
	Masa [g]	Zawartość % w masie dysku
Masa dysku	515	100,0
Aluminium 26	4	51,3
Metale ferromagnetyczne	90	17,5
Metale nierdzewne	53	10,3
Elektronika zewnętrzna 41		7,9
Podzespoły inne	66	12,8

6. DEMONTAŻ CZĘŚCIOWY I PEŁNY

Z przeprowadzonych badań wynika, że demontaż odpadów można podzielić na demontaż częściowy i demontaż pełny. Prowadzony proces może dotyczyć wykonania czynności związanych z usunięciem tylko niektórych elementów, np. osłon, źródła metali ciężkich lub innych substancji niebezpiecznych, etc, lub polegać na całkowitym zdemontowaniu odpadu, ze wszystkich znajdujących się w nim podzespołów.

Wybór stopnia szczegółowości demontażu zależy od korzyści związanej z uzyskaniem i ilościami surowców w odniesieniu do poziomu skomplikowania procesu demontażu.

Na przykładzie odpadowych komputerowych twardych dysków, demontaż podzielono na trzy stopnie:

Częściowy demontaż – polega na usunięciu zewnętrznych śrub i oddzieleniu elektroniki zewnętrznej, a tak że zamknięcia dysku, oraz kilku śrub wewnętrznych. Jest on możliwy do przeprowadzenia przy użyciu dwóch narzędzi – śrubokrętu i chwytaka. W wyniku prostego częściowego demontażu redukcja masy HDD [usunięcie śrub, elektroniki, blachy wierzchniej] to około 8%. Ponadto z dysku usunięte zostaje źródło metali ciężkich (elektronika) i innych związków, w tym organicznych. Sytuację tę przedstawia fotografia 4.



Fot. 2. Wydzielone podzespoły dysku po pełnym demontażu

Pełny demontaż – polega na usunięciu wszystkich podzespołów odpadu z chassis. Umozliwia on redukcję masy o około 87 % – z racji nieprzetwarzania „podzespołów innych”, takich jak: elementy plastikowe (2 %), głowica (3 %), silnik (8 %). Wszystkie podzespoły wyodrębnione z dysku są przedstawione na fotografii 2.

Dodatkowa obróbka – polega na przetwarzaniu zdemontowanych podzespołów, które nie są czystym surowcem; w przypadku HDD są to: głowica, silnik, elektronika i plastiki (13 % masy).

W przypadku technologii zrobotyzowanego demontażu czynności dodatkowej obróbki nie są rozważane i traktuje się wymienione powyżej podzespoły jako złom mieszany lub (jak w przypadku plastików) odpad.

7. ORGANIZACJA PROCESU ZROBOTYZOWANEGO DEMONTAŻU

Linia do demontażu twardego dysku

Na przykładzie zidentyfikowanego odpadu, jakim są komputerowe twarde dyski, zostało przedstawione modelowe postępowanie i organizacja całego procesu utylizacji poprzez zrobotyzowany demontaż. W poniższym przykładzie po minięto wstępne czynności związane z wyodrębnianiem HDD ze zbieranych odpadów, realizowanych częściowo w punktach zbiórki i stacjach demontażu. Opis procesu jest przedstawiony w oparciu o dysk twardy Western Digital Caviar WD400JB-00ENA0 z 2003 roku o pojemności 40 GB.

Komputerowe twarde dyski cechują się powtarzalnością i pomimo wielu rodzajów, modeli i producentów są standaryzowane zewnętrznie. Umożliwia to prowadzenie procesu demontażu dostosowanego do wszystkich dysków twardego, niezależnie od producenta i modelu.

Wyodrębnione dyski zostają wprowadzone do linii demontażu bezpośrednio na przenośnik taśmowy, który je kolejkuje i pozycjonuje w celu pochwycenia go przez przenośnik i unieruchomienia, umożliwiającego manipulację przestrzenną dysku. Budowa twardego dysku opiera się na aluminiowym chassis w którym znajdują się zunifikowane gwintowane otwory służące do montażu dysków. W przypadku procesu demontażu mogą one posłużyć do utrzymywania dysków w przenośniku na linii. Rozmieszczenie otworów w chassis pokazuje fotografia 3.

Następnie z dysku zostaje odczytany jego model i na tej podstawie jest wybierany program demontażu – algorytm liniowy. W przypadku braku programu dla danego dysku lub niemożności odczytania danych dysk jest kierowany do magazynu przejściowego.

Unieruchomiony w przenośniku linii demontażu dysk twardy jest transportowany do stanowiska robotów, na którym następuje pierwszy etap demontażu. Rozłączane są połączenia gwintowane mocujące elektronikę, a przy użyciu drugiego manipulatora płytka elektroniki jest oddzielana od dysku i przenoszona do pojemnika na elektronikę. W trakcie usuwania śrub są one odsysane i kierowane pneumatycznie do pojemnika na surowce z metali nierdzewnych. Następnie dysk jest odwracany o 180 stopni w uchwycie przenośnika i w analogiczny sposób następuje usunięcie



Fot. 3. Rozmieszczenie otworów montażowych w chassis dysku, wraz z widoczną elektroniką



Fot. 4. Widok podzespołów dysku po usunięciu blachy wierzchniej i elektroniki

połączeń gwintowanych blachy wierzchniej z chassis i przeniesienie jej do pojemnika na aluminium. Podzespoły dysku odsłonięte po demontażu blachy wierzchniej przedstawia fotografia 4.

Kolejnym etapem demontażu jest rozłączenie połączeń gwintowych wewnątrz dysku utrzymujących magnesy, talerze i silnik, złącze danych oraz ramię głowic. W przypadku połączeń talerzy i wirnika silnika wymagane jest jego unieruchomienie, co może zostać zrealizowane przy użyciu chwytaka drugiego robota.

W przypadku obrotowego elementu z rozmieszczonymi na jego obwodzie śrubami niezbędne jest zastosowanie metod umożliwiających zlokalizowanie ich połączenia, czy to w sposób wizyjny, czy inny np. wykorzystujący czujniki zbliżeniowe. Kolejny element, ramię głowic, zamocowany jest przy użyciu innego rodzaju połączenia gwintowego, dlatego aby przeprowadzić tę operację niezbędna jest wymiana końcówki na manipulatorze.

W trakcie pracy robota usuwającego połączenia drugi manipulator może równocześnie wyjmować i przenosić uwolnione podzespoły, jak magnesy z ekranem, złącze sygnałowe, elementy mocowania talerzy, ramię głowic, pochłaniacz wilgoci, talerze. Każdy z tych podzespołów przenoszony jest do osobnego pojemnika na podzespoły o danym składzie surowcowym.

Na fotografii 5 widoczne są magnesy występujące w dyskach, które przymocowane są przy pomocy kleju do ekranów magnetycznych. Z punktu widzenia odzysku surowców istotnym jest oddzielenie magnesów od ferromagnetycznych ekranów, gdyż zwarte w nich metale ziem rzadkich są wartościowym surowcem. Możliwe jest ich oddzielenie poprzez użycie siły ścinającej lub nagrzewania w celu rozdzielenia magnesu od metalu, po której to operacji nastąpi przeniesienie magnesów i ekranów do pojemników na poszczególne surowce. Nagrzewanie dodatkowo ma zaletę, że może nastąpić rozmagnesowanie magnesów, co ułatwi ich przenoszenie.

Po oddzieleniu i przeniesieniu wszystkich podzespołów z dysku jego puste chassis, wykonane z czystego aluminium, zostaje uwolnione z uchwytu przenośnika nad pojemnikiem na podzespoły aluminiowe, operacja ta kończy proces demontażu twardego dysku. W widok wszystkich zdemontowanych podzespołów dysku pokazuje fotografia 2.

W przypadku prezentowanego dysku wszystkie czynności mogą zostać zrealizowane przy użyciu przenośnika, dwóch narzędzi i dwóch manipulatorów. Czynniki to proces zrobotyzowanego demontażu niezwykle efektywnym.

Jednakże nie wszystkie komputery twarde dyski są wykonane w jednakowy sposób, w niektórych występują podzespoły złączone na wcisk, lub sklezione blachy z różnych materiałów, czy uszczelniająca taśma aluminiowa etc., dlatego stanowisko zrobotyzowanego demontażu musi składać się z co najmniej 3 manipulatorów, w tym jednego z wymiennymi narzędziami do prowadzenia dodatkowych czynności w przypadku nietypowych dysków. Przedstawiony opis procesu zrobotyzowanego demontażu przedstawia ogólnie czynności związanych ze standardowymi podzespołami dysku i prezentuje najczęściej występujące w nich rozwinięcia. W przypadku nietypowych i wymagających specjalistycznych rozwiązań, a przez to nieekonomicznych, partii dysków możliwe jest przeprowadzenie częściowego demontażu i skierowanie pozostałości nieprzetworzonego dysku do innego procesu, jak np. ręczny demontaż w celu dokończenia rozbiórki.



Fot. 5. Widok podzespołów dysku w trakcie demontażu – strzałka wskazuje magnesy

Tablica 3 przedstawia schemat blokowy opisanego powyżej procesu demontażu wraz z udziałem uzyskanych surowców.

Tab. 3. Blokowe przedstawienie procesu zrobotyzowanego demontażu wraz z uzyskanymi surowcami



8. EFEKTYWNOŚĆ AUTOMATYCZNEGO I RĘCZNEGO DEMONTAŻU TWARDYCH DYSKÓW

Z przeprowadzonych pomiarów czasu ręcznego demontażu twardego dysku w warunkach laboratoryjnych wynika, że na rozłożenie jednego dysku potrzeba średnio 370 s. Stąd możliwe jest obliczenie, że jeden pracownik jest w stanie zdemontować maksymalnie w ciągu 8 h pracy 77 sztuk dysków twardego, co w przeliczeniu na masę daje 40 kg HDD [1 osoba, 8 h].

Dla stanowiska zrobotyzowanego założono szacunkowy czas demontażu jednego twardego dysku, równy 90 s i pracę stanowiska przez 24 h/dobę. Dla powyższych założeń możliwe jest osiągnięcie przerobu 1000 sztuk dysków na dobę, co w przeliczeniu na masę odpowiada przerobowi 515 kg dysków twardego w ciągu 24 h (tablica 4). Ilość ta odpowiada pracy wykonanej przez 13 osób w ciągu 8 h.

Tab. 4. Liczba i masa przetworzonych HDD dla 1 stanowiska zrobotyzowanego demontażu

Rodzaj materiału	Przerób w [kg]		
	dobowy	miesięczny	roczny
	1000 sztuk	25 000 sztuk	300 000 sztuk
Masa całkowita dysków HDD	515	12 867	154 406

W ciągu jednego roku w Polsce w prowadzanych jest na rynek około 2 500 Mg nowych twardych dysków. Wynika stąd, że aby przetworzyć tę masę odpadów, należałoby uruchomić 16 stanowisk zrobotyzowanego demontażu.

9. PODSUMOWANIE

Technologia zrobotyzowanego demontażu to rozwiązanie nowoczesne i skuteczne. Pozwala jące z wysoką skutecznością przetwarzać wybrane grupy odpadów, bez konieczności angażowania pracy ludzkiej w kontakcie z nimi, a surowce z nich odzyskane charakteryzują się wysoką czystością. W Polsce masa wycofywanych twardych dysków to około 2 500 Mg rocznie. Daje to możliwość odzyskania 1 283 Mg czystego aluminium, 438 Mg metali ferromagnetycznych, 259 Mg metali nierdzewnych i 321 Mg innego złomu, a także 198 Mg obwodów drukowanych. Przy dodatkowej obróbce wydrębnionych podzespołów możliwe będzie odzyskiwanie surowców ziem rzadkich i pewnej ilości metali szlachetnych zawartych w obwodach drukowanych. Pozwala to na niemalże 100 % poziom odzysku w przypadku tych odpadów.

Zaprezentowane w artykule podejście do identyfikacji odpadów pod kątem możliwości ich przetwarzania w technologii zrobotyzowanego demontażu według algorytmów liniowych, pozwala na znaczne uproszczenie tej technologii, co zwiększa jej dostępność. Ponadto wdrożenie technologii zrobotyzowanego demontażu może polegać na wykorzystaniu obecnie istniejącej w zakładach demontażu infrastruktury, poprzez ich doposażenie w maszyny zrobotyzowane stanowiska, zamiast tworzenia od początku całościowych systemów. Takie postępowanie pozwala zastąpić części z obecnie stosowanych ręcznych i mechanicznych sposobów odzysku surowców z urządzeń ZSEE, przez autonomiczne stanowisko demontażu, a uwolnione zasoby mogą zostać skierowane do innych zadań, umożliwiając przetwarzanie większych ilości różnorodnych odpadów ZSEE.

Mając na uwadze powyższe, autor artykułu uważa, że zastosowanie technologii zrobotyzowanego demontażu na skalę przemysłową jest uzasadnione. Jest to także przysięłość przemysłu przetwarzania odpadów i wyjątkowa okazja dla polskich firm oferujących rozwiązania robotyki, aby zaistnieć na rynkach polskim i międzynarodowym w obszarze zrobotyzowanego przetwarzania odpadów.

BIBLIOGRAFIA

1. Huisman J., „2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment, Final Report”, United Nations University, 2007.
2. Cobbing M., „Toxic Tech: Not In Our Backyard”, Greenpeace.org, 2008.
3. Lee, J., Song H., Yoo J., „Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea”, Resources Conservation & Recycling nr 50, 2007.
4. Kang H., Schoenung J., „Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options”, Resources Conservation & Recycling nr 45, 2005.
5. Wawrzonek R., „Praktyczne aspekty funkcjonowania systemu gospodarowania zużyтым sprzętem elektrycznym i elektronicznym”, Elektro Eco, 2009.
6. „Raport Głównego Inspektora Ochrony Środowiska o funkcjonowaniu systemu gospodarki ZSEE w roku 2008 i 2009”.

7. Yuksel T., Baylakoglu I., „Recycling of Electrical and Electronic Equipment, Benchmarking of Disassembly Methods and Cost Analysis”, *E lectronics & the Environm ent, Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on, Orlando, 2007.*
8. Jie G., Ying-Shun L., Mai-Xi L., „Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis”, *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, 83, 2008.
9. Kim, H., Kernbaum S., Seliger G., „Em ulation-based control of a disassembly system for LCD monitors”, *Int. J. Adv. Manufacturing Technologies* 40, 2009.
10. Torres F., Gil P., Puente S., Pomares J., Aracil R., „Autom atic PC disassembly for component recovery”, *Int. J. Adv. Manufacturing Technologies* 23, 2004.
11. Basdere B., Seliger G., „Disassembly Factorie s for Electrical and Electronic Products To Recover Resources in P roduct and Material Cy cles”, *Environmental Science & Technologies*, vol. 37, no. 23, 2003.
12. „Ponad pół miliarda dysków twardej sprzedanych w 2007 roku”, www.wirtualnemedia.pl, 2008.
13. Szałatkiewicz J., „Odzysk surowców z komputerowych dysków t wardej”, *In żynieria Ekologiczna*, nr 23, 2010.
14. Ching-Hwa L., Chang-Tang C., Kuo-Shuh F., Tien-Chin C., „An ove rview of recycling and treatment of scrap computers”, *Journal of Hazardous Material B114*, 2004.