

Ryszard ROHATYŃSKI¹, Michał SĄSIADK²

PROJEKTOWANIE MASZYN Z UWZGLĘDNIENIEM PROCESÓW MONTAŻU, DEMONTAŻU I LOGISTYKI ZWROTNEJ

Streszczenie. W artykule omówiono nowe wyzwania dla projektowania maszyn i innych produktów przemysłowych, wynikające z potrzeb logistyki zwrotnej. Postulat zamknięcia obiegu materiałów w gospodarce stawia przed konstruktorami nowe, inne niż dotychczas zadania. Projektowanie dla montażu, którego zasady, metodologia i koordynacja w ramach projektowania współbieżnego już istnieją, nie spełnia wymogów logistyki zwrotnej. Konieczne jest uwzględnienie w projektowaniu procesów demontażu. Demontaż powinien mieć na uwadze procesy odzysku materiałów i wymagania logistyki zwrotnej. W pracy sformułowano zasady projektowania dla demontażu z uwzględnieniem takich procesów.

Słowa kluczowe: logistyka zwrotna, odpady, recykling, odzysk, projektowanie maszyn

DESIGN OF MACHINES FOR ASSEMBLY, DISASSEMBLY AND REVERSE LOGISTICS

Summary. The paper deals with the new problems of machine and other industrial products design that result from reverse logistics needs. Postulate to close the material cycle in economy poses for designer teams new, other than heretofore issues. Design for assembly that principles, methodology, and co-ordination in the frame of concurrent design already exist, does not meet demands of reverse logistics. There is a need for taking into consideration disassembly processes. The disassembly should take into regard material recovery processes and the reverse logistics requirements. In the paper general principles of the design for disassembly with allowing for these processes have been formulated.

Keywords: reverse logistics, waste, recycling, reuse, machine design

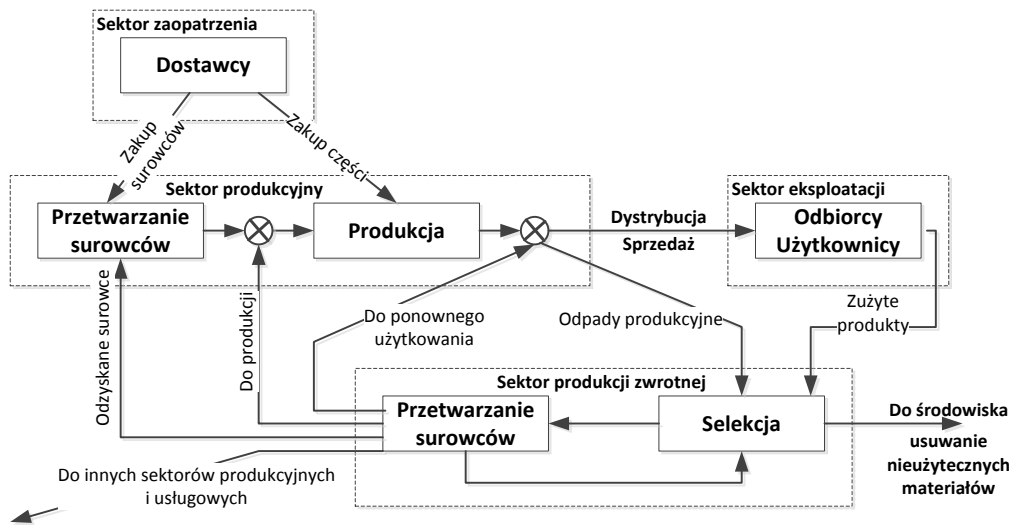
1. WPROWADZENIE

Działalność gospodarcza człowieka stanowi poważną ingerencję w ekosferę. Procesy przemysłowe powodują, że surowce pozyskane z przyrody wracają do niej w postaci odpadów. Rysunek 1 przedstawia ogólny schemat obiegu materiałów w gospodarce, składający się z czterech sektorów: zaopatrzenia, produkcji, użytkowników i zwrotnego. W obiegu materiałów występują dwa logistyczne sprzężenia zwrotne: wewnętrzne (w sekto-

¹ Faculty of Management, College of Management EDUKACJA, Wrocław, Poland,
e-mail: r.rohatynski@wez.uz.zgora.pl.

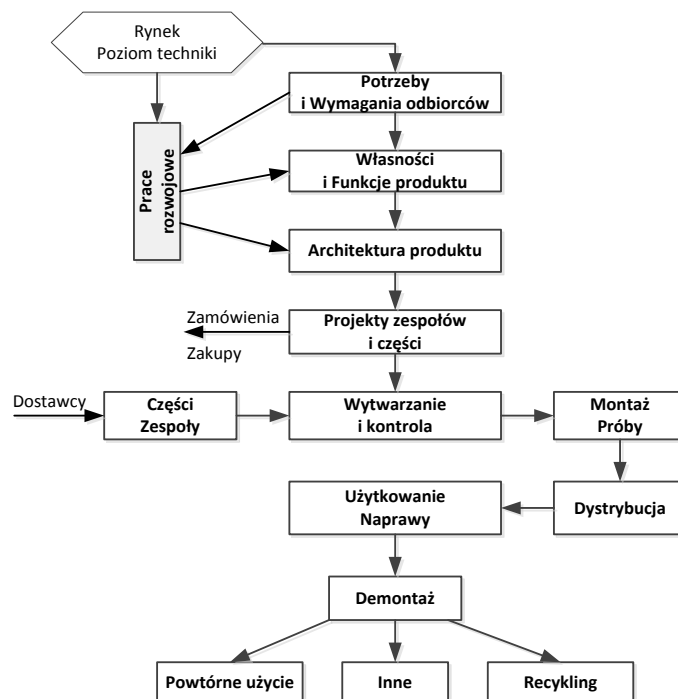
² Faculty of Mechanical Engineering, University of Zielona Góra, Zielona Góra, Poland,
e-mail: m.sasiadek@iizp.uz.zgora.pl.

rze produkcyjnym) i zewnętrzne (poza tym sektorem). Sprzężenia te niezupełnie zamykają obieg produktów materialnych, ponieważ część materiałów wraca do środowiska i może naruszać jego równowagę ekologiczną.



Rys. 1. Ogólny schemat systemu produkcyjnego z materiałowym sprzężeniem zwrotnym
Fig. 1. Diagram of a production system with the material feedback

Pokazany na rys. 2 cykl życia produktu zaczyna się od rozpoznania potrzeb rynku oraz możliwości technologicznych. Na tej podstawie wykonuje się szczegółowy wykaz potrzeb odbiorców i wymagań technicznych. Podział maszyny na zespoły i części, tzn. jej architekturę, tworzy się iteracyjnie, od zespołów do części. Po zaplanowaniu architektury można przystąpić do projektowania zespołów i części każdego członka rodziny produktów.



Rys. 2. Cykl życia produktu od identyfikacji potrzeb odbiorców do wycofania z eksploatacji
Fig. 2. Diagram of the life cycle of a product from identification of market needs to phase out

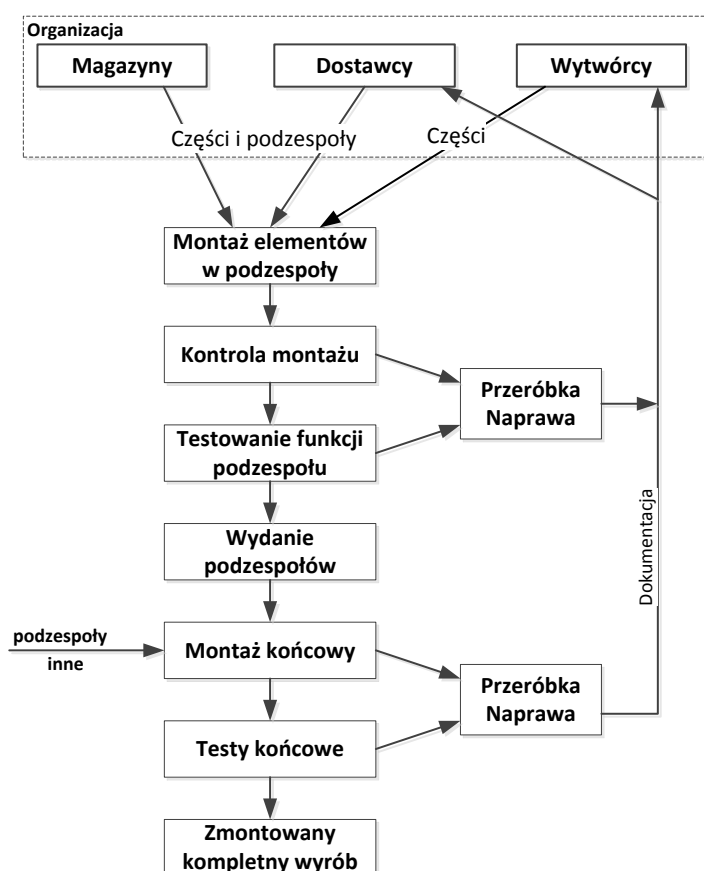
Do kluczowej decyzji należy wyznaczenie kooperantów i dostawców, ponieważ koszty outsourcingu często przekraczają koszty własne. Do ważnych i trudnych zadań należy kordynacja wymagań jakościowych, które muszą spełniać wszyscy kooperanci.

W niniejszej pracy zwrócono szczególną uwagę na okres po eksploatacji, kiedy demontaż zużytego produktu łączy się z decyzją o dalszych losach konstrukcji i materiałów.

W projektowaniu należy uwzględnić cały cykl życia maszyn i urządzeń, łącznie z fazą wycofania z eksploatacji i likwidacją szkodliwego wpływu zużytych materiałów. Kiedy urządzenie i jego części nie mogą być dalej użytkowane, powinny nadawać się do ponownego użycia w innych, najlepiej podobnych zastosowaniach. Jeśli takich możliwości nie ma, to dana część powinna być zaprojektowana w taki sposób, żeby po zdekomponowaniu pozostały materiał mógł zostać poddany recyklingowi i przetworzony do postaci przydatnej do innych celów przemysłowych. Należy zauważyć, że sam proces recyklingu nie powinien mieć ujemnego wpływu na środowisko.

2. PODSTAWOWE PROBLEMY PROJEKTOWANIA DLA MONTAŻU

Proces montażu zespołu, polegający na łączeniu jego elementów w jednostki montażowe wyższego rzędu, aż do osiągnięcia kompletnego zespołu, stanowi jeden z istotniejszych etapów w procesie wytwarzania produktu. Ważne wobec tego jest, aby proces ten realizowany był możliwie szybko i bezbłędnie. Ogólny schemat procesu montażu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Ogólny schemat procesów montażu według [18]

Fig. 3. Diagram of assembly processes, after [18]

Powszechnie wiadomo, że koszty wytwarzania stanowią przeważającą część procesu realizacji, ale udział kosztów montażu może być rzędu nawet 30-50% kosztów wytwarzania produktu [2]. Znaczenie procesu montażu dla kosztów realizacji i dla jakości produktu sugeruje jawne uwzględnienie tego procesu w czasie opracowywania konstrukcji maszyn i ich elementów. Metodologia projektowania dla montażu (ang. DfA – Design for Assembly) stosowana jest przede wszystkim w celu minimalizacji liczby części składowych projektowanego wyrobu oraz uproszczenia wykonywania operacji montażowych, a także do zredukowania całkowitych kosztów realizacji procesu montażu. Praktyczne wykorzystanie metod DfA przyjęto z dużym zainteresowaniem w wielu przedsiębiorstwach nie tylko w wersji książkowej, ale również w formie specjalistycznego oprogramowania. Zastosowanie DfA w niektórych przedsiębiorstwach (zwłaszcza w USA) stało się obowiązkowe [2]. Niektóre firmy podają, że dzięki temu podejściu zmniejszono liczbę części i średni koszt montażu nawet o ok. 40%. Osiągnięto też jednostkowe zmniejszenie kosztu bezpośredniej robocizny i kosztu materiałów w granicach 15÷35%. Należy nadmienić, że te oszczędności uzyskano na wyrobach, które były uważane za dobrze zaprojektowane, przy wykorzystaniu analizy wartości. Stwierdzono, że metody DfA zmniejszają liczbę błędów montażowych nawet o 80% [18].

W literaturze przedmiotu można odnaleźć zróżnicowane zastosowanie metodologii projektowania dla montażu. W pracach [2, 13, 14] autorzy wykazują celowość stosowania ogólnie znanych narzędzi DfA w fazach rozwoju wyrobu, zwłaszcza na jego wczesnych etapach (np. proces konstruowania). W dostępnych opracowaniach można również dostrzec próby opracowania efektywnych narzędzi wspomagających projektowanie zorientowane na montaż [15]. Metody DfA ułatwiają przede wszystkim identyfikację możliwości zmniejszenia liczby części i oszacowanie kosztów wytwarzania oraz montażu analizowanego wyrobu. Dzięki wprowadzeniu DfA do procesu projektowania zespół opracowujący wyrób proponuje ulepszone rozwiązania projektowe, które charakteryzują się lepszymi wskaźnikami: prostą konstrukcją i mniejszą liczbą części, co wpływa bezpośrednio na uproszczenie operacji montażowych. Korzyści, które daje zastosowanie DfA, wynikają głównie z systematycznego przeglądu wymagań funkcjonalnych i zastąpienia grup elementów przez pojedyncze zintegrowane jednostki – moduły montażowe.

2.1. Projektowanie dla montażu i demontażu w projektowaniu współbieżnym

Tradycyjny sposób projektowania i konstruowania maszyn, charakteryzujący się sekwencyjnym uwzględnianiem poszczególnych wymagań, jest długi i nie zapewnia jakości projektu. Projektowanie współbieżne ma na celu wyeliminowanie jego niedogodności [3, 4, 9, 10]. Cechuje się ono głównie współpracą specjalistów z różnych dziedzin, co przyczynia się do jawnego uwzględniania wielu późniejszych faz rozwoju produktu we wczesnym etapie projektowania. Dynamicznie rozwijające się metody projektowania współbieżnego stały się podstawową i niezastąpioną formą prac projektowych.

W nurcie projektowania współbieżnego powstało wiele metod ukierunkowanych na różne aspekty projektowania – DfX („Design for X”, gdzie „X” oznacza wyodrębnioną grupę wymagań) – z których każde powinny być w zadowalającym stopniu uwzględnione w projekcie. Należą do nich np. technologiczność konstrukcji, wytwarzanie, montaż, demontaż itp. Spośród nich szczególnym znaczeniem wyróżniają się projektowanie dla montażu i projektowanie dla demontażu (z ang. Design for Disassembly – DfD). Projektowanie dla montażu/demontażu zakłada uwzględnianie wymogów procesu montażu/demontażu w całym cyklu projektowania, tak aby konstrukcja była przystosowana do szybkiego i taniego montażu/demontażu. Ponieważ jednak uwzględnienie wszystkich wymogów procesu monta-

żu/demontażu na etapie projektowania jest zadaniem skomplikowanym, więc często nie jest to wykonywane.

W literaturze można spotkać wiele opracowań na temat projektowania dla montażu/demontażu [2, 13, 14, 18]. Zawierają one głównie przykłady analiz wybranych konstrukcji maszyn (lub urządzeń) oraz zalecanych do stosowania rozwiązań konstrukcyjnych, ułatwiających poprawny montaż/demontaż.

Wiele podawanych w literaturze zasad projektowania dla montażu/demontażu można zastosować dopiero w fazie projektowania szczegółowego, kiedy postać konstrukcyjna jest już w zasadzie ukształtowana, natomiast mało jest wskazówek na temat kształtowania tych procesów we wcześniejszych fazach procesu projektowego, np. przy opracowywaniu koncepcji produktu.

3. PROJEKTOWANIE MASZYN Z UWZGLĘDNIENIEM WYMAGAŃ LOGISTYKI ZWROTNEJ

3.1. Logistyka zwrotna i jej zadania

Zadaniem dystrybucji zwrotnej jest odzysk lub unieszkodliwienie zużytych produktów. Polega to zwykle na zapakowaniu i dostarczeniu ich do punktu odbioru dla regeneracji lub recyklingu. Można wymienić trzy główne czynniki, które projekt logistyki zwrotnej musi uwzględnić: struktura sieci logistycznej, planowanie przepływu materiałów oraz sortowanie i ustalanie marszruty zwracanych części. Zbieranie zużytych produktów z rynku jest bliższe charakterem do funkcji zaopatrzenia niż do realizacji zamówień. Przepływ powrotny charakteryzuje się dużą niestabilnością. Ilości zwracanych produktów i ich stan są trudne do przewidzenia.

Większość systemów logistycznych nie jest dostosowana do logistyki zwrotnej. Zwracane produkty zwykle nie mogą być transportowane, magazynowane, manipulowane itp. w taki sam sposób jak produkty nowe. Koszty dystrybucji zwrotnej mogą być kilkakrotnie większe od kosztów dystrybucji prostej. Niemniej jednak, przywracanie sprawności produktów może być bardzo opłacalne [16].

Znaczenie logistyki zwrotnej dla współczesnego przemysłu i ekologii jest ogromne, ale w publikacjach poświęconych logistyce nie zajmuje ona należnego miejsca, np. [1, 2].

Procesy przemysłowe związane z logistyką zwrotną są liczne i niezwykle złożone. Należą do nich przede wszystkim:

renowacja, naprawa, modernizacja, odzysk elementów i odzysk materiałów.

Ich opis przekraczałby objętość niniejszej pracy i dlatego zostaną one tylko wymienione.

Dostosowanie produktu do tych procesów powinno być przedmiotem projektowania. Aby tak się stało, projektanci muszą mieć informacje o zachowaniu się produktu w czasie eksploatacji i o kosztach tych procesów. Zbyt rzadko przy projektowaniu produktów uwzględnia się możliwość stosowania odnowionych elementów lub zespołów [5].

3.2. Czynniki utrudniające organizację logistyki zwrotnej

Rozwój przemysłu odnawiającego elementy i zespoły wymaga współpracy między przedsiębiorstwami używającymi zregenerowanych produktów i firmami projektującymi te produkty. W literaturze przedmiotu podaje się przyczyny utrudniające funkcjonowanie procesów zwrotnych, np. [6, 16, 17]. Należą do nich głównie:

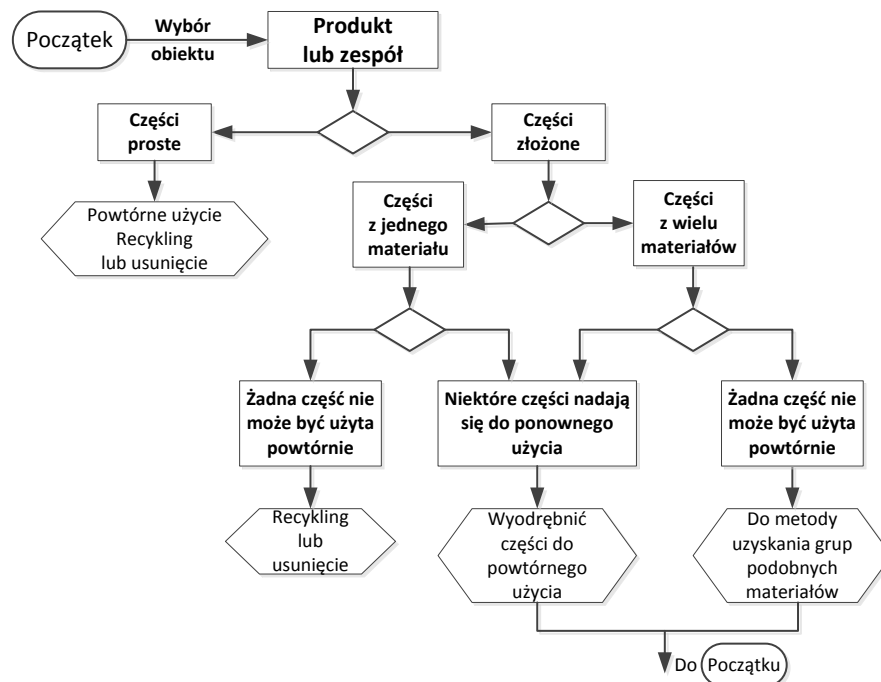
- *nieregularność ilości zwrotów w czasie,*
- *trudność zrównoważenia potrzeb odbiorców ze zwrotami,*
- *niepewność co do ilości i jakości odzyskiwanych materiałów,*
- *wymagania odnośnie do części zregenerowanych,*
- *niepewność trasy i czasu trwania operacji technologicznych,*
- *uwarunkowania transportowe.*

Mimo tych trudności, rosnące znaczenie ekonomiczne i ekologiczne odzysku materiałów powoduje, że sieci logistyki zwrotnej rozwijają się, jakkolwiek ciągle jeszcze nie nadążają za potrzebami.

4. DEMONTAŻ JAKO PROCES POPRZEDZAJĄCY NAPRAWĘ, RECYKLING I ODZYSK MATERIAŁÓW

Proces demontażu realizowany jest, w większości przypadków, w celu diagnostyki, wymiany zużytych lub uszkodzonych części, naprawy, skierowania do recyklingu lub utylizacji. Podobnie jak w procesie montażu, tak i w tym procesie istotne jest zapewnienie możliwości szybkiego demontażu. Dlatego konstrukcja maszyny (urządzenia) powinna być dostosowana do wykonania tych operacji.

Na rys. 4 pokazano postępowanie decyzyjne przy demontażu. Proces zaczyna się od analizy całego produktu i postępuje rekursywnie do jego części. Kolejność demontażu i wybór następnego kroku zależą każdorazowo od oceny przydatności części do naprawy, recyklingu, renowacji, rozkruszenia itd. W celu zidentyfikowania przydatności zużytych części do dalszego wykorzystania, wskazane jest wydzielenie elementów przeznaczonych do regeneracji i odnowienia. Tym elementom po demontażu przywraca się walory użytkowe przez różne zabiegi technologiczne (czyszczenie, powtórna obróbka itp.).

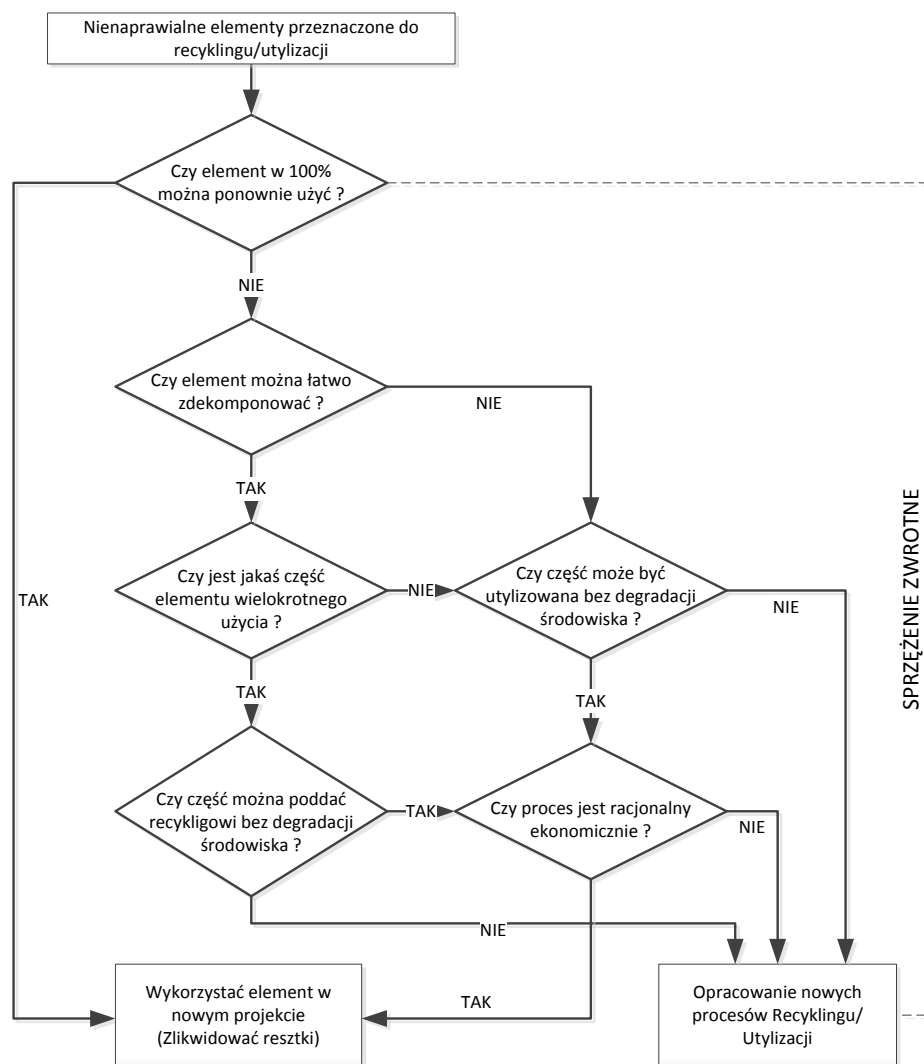


Rys. 4. Procedura decyzyjna dla demontażu produktu

Fig. 4. Block diagram for a product disassembly

Jeśli element nie nadaje się do naprawy lub regeneracji, to dalsze postępowanie powinno przebiegać jak na rys. 5. Ten proces decyzyjny uwzględnia w sposób jawny wymagania ochrony środowiska i ekologii.

Pokazany na rys. 5 proces kwalifikacji elementów demontowanego urządzenia może być wykorzystany w projektowaniu, tak żeby już wtedy zapewnić cechy produktu dostosowane do fazy posteksploatacyjnej.



Rys. 5. Ocena podatności części na recykling z uwzględnieniem ochrony środowiska
Fig. 5. Evaluation of an element recyclability allowing for protection of environment

Pytania, na które konstruktorzy powinni odpowiedzieć przed decyzją o zaakceptowaniu danego elementu, dotyczą możliwości jego ponownego użycia, ochrony środowiska i kosztu.

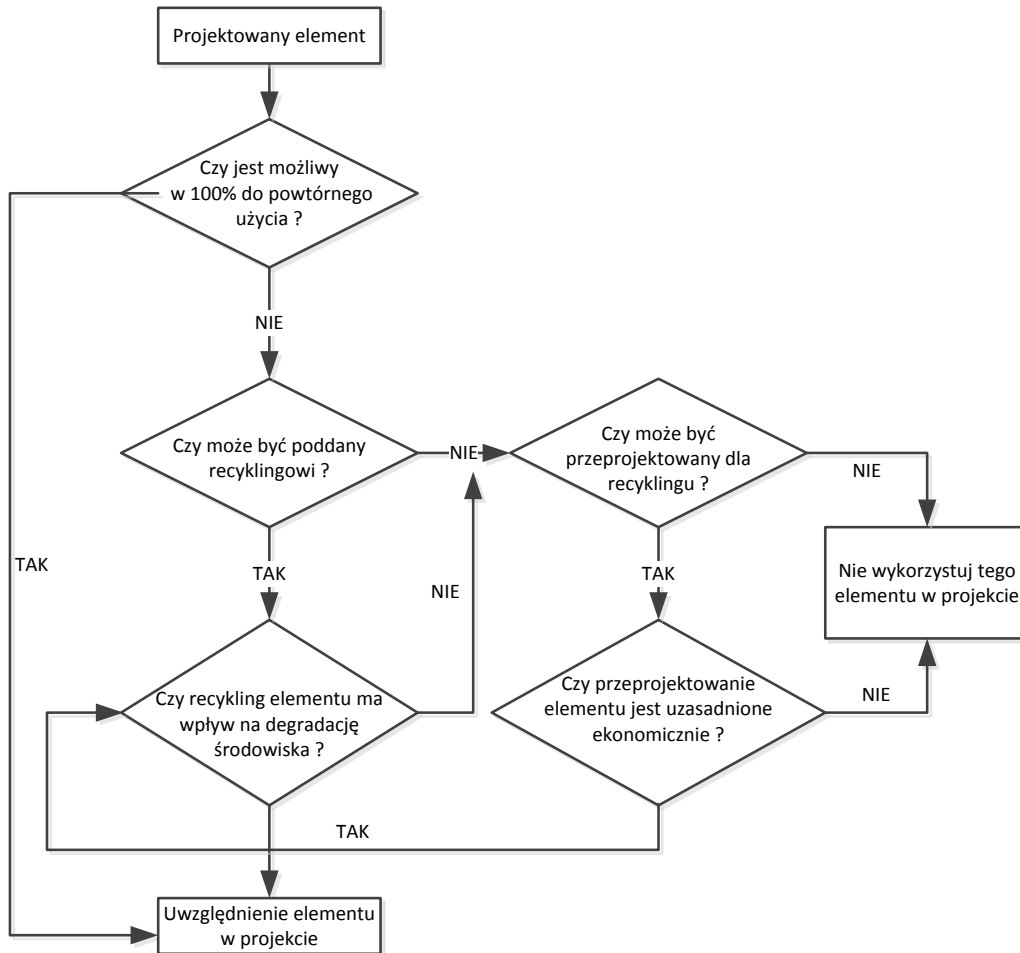
Czy dany element może być w całości wykorzystany gdzieś indziej? Jeśli nie, to czy można go zaprojektować w ten sposób, aby po łatwym rozłożeniu przynajmniej niektóre jego części mogły być ponownie użyte? Jeśli nie wprost, to może po modyfikacji lub recyklingu? Czy te procesy nie są zbyt kosztowne? Jeśli ponowne wykorzystanie nie jest możliwe, to usunięcie materiału nie powinno mieć ujemnego wpływu na środowisko.

Elementarnymi operacjami demontażu są: odkręcić, wyjąć, chwycić, zacisnąć, złuszczyć, obrócić, szarpnąć, uderzyć, piłować, czyścić, podważyć (np. klinem), odkształcić, wiercić, skruszyć, ciąć, pchać/ciągnąć, uderzać młotkiem, sprawdzać [18].

Trudność i czas potrzebny do wykonania każdej operacji można oszacować dla każdej części produktu i w ten sposób utworzyć miarę uciążliwości.

Stopień trudności demontażu można oceniać według czterech kryteriów [2]:

- Dostępność – czy jest wystarczająca przestrzeń dla włożenia narzędzia lub ręki?
- Pozycjonowanie – jak dokładnie narzędzie lub ręka muszą być ustawione, aby usunąć element (uchwycić i szarpnąć jest zwykle łatwiej niż dokładnie ustawić narzędzie)?
- Siła – jak wielka siła jest potrzebna (im mniejsza, tym lepiej; różne typy połączeń wymagają różnych sił przy demontażu)?
- Średni czas potrzebny do demontażu – dla każdej operacji należy go oszacować.



Rys. 6. Ocena projektowanego elementu pod względem przydatności do recyklingu (wg [1])

Fig. 6. Evaluation of a designed element recyclability (after [1])

Na rys. 6 pokazano schemat logiczny podejmowania decyzji przy projektowaniu (lub zakupie) elementu maszyny.

5. WYTYCZNE DO PROJEKTOWANIA Z UWZGLĘDNIENIEM LOGISTYKI ZWROTNEJ

Projektowanie dla demontażu i recyklingu jest bardziej skomplikowane niż projektowanie tylko dla montażu. Dla ilustracji można podać przykłady dotyczące materiałów konstrukcyjnych i połączeń.

Wybór materiałów w dużym stopniu wpływa na możliwość ponownej przeróbki. Na przykład, termoutwardzalnych tworzyw sztucznych nie można topić, a jeśli zawierają włókna, to nie nadają się do wielokrotnego recyklingu, ponieważ recykling wymaga rozdrobnienia na wiele małych części. Gdy włókna stają się zbyt krótkie, to przestają spełniać swoją funkcję.

Płynne aluminium łatwo absorbuje różne zanieczyszczenia, co pogarsza jego własności. Zatem recykling elementów aluminiowych wymaga oddzielenia innych materiałów.

Bardzo ważny jest sposób łączenia części. Połączenia zatrzaskowe są wygodne w montażu, ale przy demontażu mogą być kłopotliwe. Jeszcze mniej dogodne pod tym względem są nity i kleje. Nie tylko są one trudne do rozłączenia, ale często łączą różne materiały, które dla celów recyklingu muszą być oddzielone. Jeśli tak połączone części są odrywane, to materiał jednej części może pozostać przy drugiej.

Analiza problemów ponownego wykorzystania części i materiałów konstrukcyjnych umożliwi sformułowanie wielu nowych postulatów dla projektowania nowych produktów. Uzupełniają one tradycyjny zbiór wymagań projektowych. Do już wymienionych należy dodać następujące [2,7]:

1. *Przystosowanie produktów do zdalnych napraw lub modyfikacji.*
2. *Wykorzystanie informacji na temat niezawodności.*
3. *Projektowanie produktów na określony czas ich eksploatacji.*
4. *Projektowanie konstrukcji modułowych, ułatwiających wymianę zużytych elementów.*
5. *Unikanie materiałów kłopotliwych (szkodliwych, trudno usuwalnych itp.).*
6. *Projektowanie produktów, których w całym cyklu życia właścicielem jest producent.*

Jest ważne, aby kształtowanie cech ważnych dla logistyki zwrotnej i procesów odzysku stanowiło integralną część procesu projektowania. Tradycyjnie właściwości te ujawniają się dopiero po eksploatacji. Wykorzystanie systemów komputerowych zawierających zautomatyzowane algorytmy obliczeniowe, programy symulacyjne oraz inżynierskie bazy danych ułatwia projektowanie produktów spełniających wymienione wymagania.

Projektując system materialny i wybierając jego elementy, projektanci powinni starać się zapewnić wielokrotne użytkowanie materiałów konstrukcyjnych w procesach obojętnych dla środowiska. Powinni unikać generowania odpadów, które są składowane na wyznaczonych wysypiskach. Muszą także uwzględniać wymagania transportu, żeby nie było potrzeby stosowania opakowań i pojemników jednorazowego użytku.

Głównym przesłaniem tego artykułu jest wykazanie, że konstrukcje powinny być projektowane z myślą o ich demontażu i ponownym zastosowaniu [2, 17, 18]. Aby to było możliwe, musi istnieć sprzężenie informacyjne między projektantami i operacjami demontażu i odzysku [8].

Bibliografia

1. Blanchard B.S.: Logistics engineering and management. Prentice Hall, 1992.
2. Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W.: Product Design for Manufacture and Assembly. Marcel Dekker, 1994
3. Branowski B.: Integracja metod inżynierii współbieżnej i inżynierii jakości w rozwoju wyrobów. Cz. 1. Sformułowanie problemu, metodologia. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Tendencje rozwojowe w procesach produkcyjnych, Sekcja II – Projektowanie współbieżne”, Zielona Góra 1997, s. 7-12.
4. Chlebus E.: Inżynieria współbieżna jako integrator procesu produkcji. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Tendencje rozwojowe w procesach produkcyjnych, Sekcja II – Projektowanie współbieżne”, Zielona Góra 1997, s. 19-24.

5. Klausner M., Grimm W., Hendrickson C.: Reuse of electric motors in consumer products. *Journal of Industrial Ecology*, No. 2(2), 1999, p. 89-102.
6. Krikke H.: Business Case: reverse logistic network re-design for copiers. *OR Spectrum*, No. 21, 1999, p. 381-409.
7. Laan van der E., Salomon M.: Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. *European Journal of Operat. Research*, No. 102, 1997, p. 264-278.
8. Navin-Chandra D.: The recovery problem in product design. *Journal of Engineering Design*, No. 5(1), 1994, p. 65-86.
9. Rohatyński R.: Concurrent Engineering and Features: New Challenge for Engineering Design. *Proceedings of TMCE'96, Budapest 1996*.
10. Rohatyński R.: Projektowanie i konstruowanie w inżynierii współbieżnej. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Tendencje rozwojowe w procesach produkcyjnych, Sekcja II – Projektowanie współbieżne”, Zielona Góra 1997, s. 107-114.
11. Rohatyński R.: Projektowanie produktów dla logistyki odwrotnej w przemysłowej produkcji oszczędnej, [w:] Fertsch M. (red.): *Ergonomia – technika i technologia – zarządzanie*. Politechnika Poznańska, Poznań 2009, s. 209-219.
12. Rohatyński R.: Reverse logistics as a solution to growing waste. *Proc. of Int. Conf. On ICT Management, Wrocław 2012*, p. 392-409.
13. Sasiadek M.: Projektowanie wyrobów i planowanie sekwencji montażu z uwzględnieniem zasad DFA. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, nr 2, 2009, s. 4-7.
14. Sasiadek M., Rohatyński R.: A method of computer aided design for assembly, [in:] Rohatyński R., Poślednik P. (eds.): *Design methods for industrial practice*. Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2008, p. 119-126.
15. Sasiadek M.: Współbieżne projektowanie wyrobów i planowanie kolejności ich montażu, [w:] Matuszek J., Gregor M., Mičeta B. (red.): *Metody i techniki zarządzania w inżynierii produkcji*. Wydaw. Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, R. 6, Bielsko-Biała 2013, s. 109-124.
16. VDI Richtlinien 2243: Konstruieren recyclinggerechter technische Produkte. VDI Verlag, Duesseldorf 1991.
17. VDR Guide Jr.: Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal Operat. Management*, No. 18, 2000, p. 467-483.
18. Whitney D.E.: *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford University Press, 2004.