

ŚRODOWISKOWA OCENA CYKLU ŻYCIA PRODUKTU NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH TYPÓW POMP PRZEMYSŁOWYCH

Anna Lewandowska⁴³, Zenon Foltynowicz

Katedra Ekologii Produktów, Akademia Ekonomiczna w Poznaniu

1 WPROWADZENIE

Celem prezentowanej pracy było dokonanie oceny oddziaływania na środowisko generowanego podczas cyklu życia wybranych pomp przemysłowych. Przeprowadzone w jej ramach badania stanowią jeden z przykładów zastosowania środowiskowej oceny cyklu życia (ang. *Life Cycle Assessment*, LCA) w Polsce. Warto podkreślić, że LCA jest techniką podlegającą ciągłemu rozwojowi i nieustannie prowadzone są badania mające na celu jej rozwijanie i udoskonalanie. Analiza najnowszych doniesień literaturowych pozwala stwierdzić, że w chwili obecnej zainteresowanie LCA ogromnie wzrasta i obejmuje już niemal wszystkie kontynenty świata [5]. W tym świetle każde nowe doświadczenie (szczególnie na gruncie krajowym) wydaje się być szczególnie wartościowe. W ramach niniejszego opracowania mniejszy nacisk zostanie położony na prezentację samego badania i jego wyników, natomiast znacznie większy na problemy o charakterze statystycznym i interpretacyjnym oraz na ich rozwiązania podjęte w ramach omawianej pracy.

2 TEZA I CEL PRACY

Punktem wyjścia w niniejszej pracy jest teza, że zastosowanie pomp wykorzystujących nowe technologie prowadzi do słabszych oddziaływań na środowisko niż w przypadku stosowania

obiektów starszych. W dysertacji sformułowano następujący cel główny:

- dokonanie oceny efektu ekologicznego modernizacji produkcji wybranych obiektów (pomp przemysłowych) przy użyciu metody LCA i zaprezentowanie zastosowania tego narzędzia do oceny różnych technologii.

W ramach celu głównego określono następujące cele szczegółowe:

- określenie wielkości potencjalnego wpływu dla całych cykli życia wyrobów oraz wykazanie źródeł największego oddziaływania,
- opracowanie metody, lub rozwinięcie już istniejących, do przeprowadzenia oceny jakości danych użytych do badania oraz oszacowanie niepewności wyników.

3 NARZĘDZIE BADAŃ

Technika LCA stanowi instrument polityki [4] i zarządzania środowiskowego [6,7], zaś jej zasady określone są w grupie norm ISO serii 14040x [10-13]. LCA może służyć jako narzędzie wspomagające decyzje w szerokim spektrum sytuacji decyzyjnych. W każdym przypadku jednak ma na celu identyfikację, kwantyfikację i ocenę potencjalnych wpływów środowiskowych związanych z całym cyklem życia wyrobów. Istnieją przynajmniej trzy zasadnicze elementy charakteryzujące LCA: użycie jednostki funkcjonalnej jako bazy porównawczej, analizowanie problemu dla całego systemu wyrobu oraz modelowanie wpływu w oparciu o różne tzw. media środowiskowe. Badania LCA w swej pełnej postaci obejmują realizację czterech faz:

⁴³ Anna Lewandowska jest dwukrotną laureatką Stypendium dla Młodych Naukowców (2004, 2005) przyznawanego przez FNP.

- określenie celu i zakresu (ang. *Goal and Scope Definition*),
- analizę zbioru wejść i wyjść LCI (ang. *Life Cycle Inventory*),
- ocenę wielkości wpływu LCIA (ang. *Life Cycle Impact Assessment*)
- interpretację (ang. *Interpretation*).

Pierwsza faza LCA służąca określeniu celu i zakresu badania jest kluczowa, bowiem tu podejmuje się najważniejsze decyzje determinujące całość analizy. W zasadzie wszystko to, co następuje w pozostałych trzech fazach, stanowi pochodną decyzji podjętych na pierwszym etapie badania. Szczególnie istotne są dwie kwestie: cel, jakiemu ma służyć badanie, i grupa docelowa, której będą komunikowane jego wyniki. Szereg kroków proceduralnych podejmowanych w ramach pierwszej fazy regulowanych jest normą PN-EN ISO 14041: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Określenie celu i zakresu oraz analiza zbioru*. Norma ta zawiera także wytyczne dotyczące drugiej fazy badania, której istotą jest określenie modelu wejść i wyjść, podzielenie go na procesy jednostkowe oraz wypełnienie danymi. Z punktu widzenia późniejszych rozważań dotyczących niepewności końcowych wyników warto wyraźnie podkreślić, że badania LCA często operują bardzo złożonymi modelami LCI, które składają się z setek, a nawet tysięcy procesów jednostkowych, co zaś wiąże się z operowaniem bardzo dużą ilością danych. Problem jakości danych zostanie przedstawiony w dalszej części niniejszego opracowania. Na omawianym etapie analizy zbioru wejść i wyjść dokonuje się inwentaryzacji takich danych, jak: wielkość emisji do powietrza, wody, gleby, zużycie energii czy paliw kopalnych itp. Na poziomie fazy LCI nie wiadomo jeszcze nic o rodzaju wpływu, który może być wywołany. Aby dokonać takiej oceny, należy przeprowadzić trzecią fazę badania – Ocenę wpływu cyklu życia (LCIA). Wytyczne do tej fazy można znaleźć w normie PN-EN ISO 14042: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Ocena wpływu cyklu życia*. Po przeprowadzeniu trzeciej fazy LCA i analizie uzyskanych wyników, dysponuje się jakościową i ilościową informacją o potencjalnym wpływie generowanym przez dane systemy wyrobu (w tym przypadku wybranych pomp). Kluczową kwestią staje się tu problem wiarygodności uzyskanych wyników. W celu oceny ich

niepewności oraz sformułowania wniosków końcowych przeprowadza się ostatnią fazę badania: Interpretację, której zasady ujęto w normie PN-EN ISO 14043: *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Interpretacja cyklu życia*.

4 BADANIE LCA

4.1 Obiekty badań

W ramach prezentowanej dysertacji analizą objęto dwie grupy pomp różniących się parametrami technicznymi i gabarytami. Zasadnicza różnica tkwiła w technologii produkcyjnej analizowanych obiektów (szczególnie zaś w procesach odlewania, suszenia oraz procesach grzewczych). Poza tym obiekty te różniły się parametrami użytkowymi, co także stanowiło pewien wyróżnik poziomu zaawansowania technologicznego. Warto dodać, że pełnej analizie poddano etap wydobywania surowców, produkcji i użytkowania, natomiast analizy etapu końcowego zagospodarowania dokonano na bazie wyników LCI (bez oceny wpływu).

4.2 Wyniki

W ramach niniejszej pracy analizy dokonano na różnych „poziomach” wyników. Ponieważ zastosowano metodę Ekowskażnik99 [1], uzyskano sześć możliwych poziomów interpretacyjnych. Ze względu na złożoność i obszerność wyników zdecydowano się w ramach niniejszego opracowania zaprezentować tylko ogólne wnioski sformułowane na ich podstawie. Warto jednak podkreślić, że za tymi wnioskami kryją się konkretne wyniki liczbowe, które w ilościowy sposób ukazują wielkość i źródła potencjalnego wpływu na środowisko [8]. Jednym z głównych wniosków uzyskanych na bazie przeprowadzonych badań, jest wykazanie istnienia jednego głównego punktu krytycznego w cyklu życia pomp, bez względu na technologię ich wytwarzania. Jest nim całokształt procesów związanych z produkcją i zużyciem energii elektrycznej. Z tego względu zaleca się, aby głównym obszarem doskonalenia pomp w celu zmniejszenia ich oddziaływania na środowisko była modyfikacja w zakresie energochłonności. Warto pamiętać, że pompy to maszyny robocze o długich okresach eksploatacyjnych i pobierające energię niezbędną do pracy.

Ponadto, na bazie uzyskanych wyników, sformułowano następujące wnioski:

- zmiana technologii odlewniczej i grzewczej ma fundamentalne znaczenie z punktu widzenia oddziaływania na środowisko w fazie produkcji, natomiast niemal żadnego w fazie eksploatacji,
- zmiana parametrów wydajnościowych, głównie sprawności energetycznej pomp, ma fundamentalne znaczenie zarówno w fazie produkcji, jak i eksploatacji,
- faza produkcji stanowi znikome źródło wpływu w porównaniu z fazą eksploatacji,
- głównym obszarem wpływu w fazie eksploatacji są procesy związane z wyprodukowaniem i zużyciem energii elektrycznej. Są one też głównym źródłem oddziaływania z punktu widzenia całego analizowanego cyklu życia.

5 NIEPEWNOŚĆ W LCA

Uzyskanie samych wyników LCA wydaje się być tylko połową zadania. Bacząc na całość wewnętrznych obciążeń analizy, kluczową kwestią pozostaje stopień ich wiarygodności. Warto sobie odpowiedzieć na pytanie, na ile można im zaufać. Ocena cyklu życia może być stosowana, podobnie do analiz marketingowych, w procesie podejmowania decyzji. W zależności od celu badania oraz sposobu wykorzystania wyników różnicują się wymagania dotyczące poziomu jakości samej analizy oraz uzyskanych na jej drodze rezultatów. Im większa liczba zainteresowanych stron biorących udział w procesie decyzyjnym oraz wyższa rozbieżność interesów, tym wyższy poziom zaufania powinno wykazywać badanie. Niemal każdy etap procesu LCA ma specyficzne źródła niepewności i dotknięty jest nimi każdy poziom agregacji wyników. W miarę postępu analizy następuje kumulacja (propagacja) owej niepewności, która osiąga swe maksimum na najwyższym poziomie wyników (w przypadku użytej w niniejszym badaniu metody, na poziomie ekowskaźnika). Zasadniczą kwestią pozostaje, jakie metody zastosować w celu jej oszacowania, bowiem inny typ niepewności prezentować będzie wybór parametru modelu (na przykład takie, a nie inne tempo degradacji danego związku w środowisku), inny zaś niedokładność pomiaru danej wielkości. Z drugiej strony istnieje inherentna

niepewność modeli, które zawsze stanowią uproszczenie rzeczywistości.

Jak wspomniano wcześniej, fazą analizy odpowiedzialną za określenie niepewności ostatecznych wyników jest faza interpretacji. Od pewnego czasu dużo uwagi poświęca się rozwijaniu technik interpretacyjnych [2, 3], dzięki którym można by ocenić wiarygodność uzyskanych wyników, a także dogłębnie przeanalizować relacje zachodzące pomiędzy nimi. W literaturze i normach wspomina się o sprawdzeniu zgodności i kompletności, identyfikacji znaczących kwestii (zwanej także analizą udziału lub dominacji), analizie perturbacji, rozróżnialności, wrażliwości, czy niepewności. W omawianej pracy zastosowano większość tych analiz i pokazano ich znaczenie w procesie interpretacji wyników badania LCA. Ponadto podjęto się stworzenia pewnego podejścia do oceny jakości danych w kluczowy sposób determinującej niepewność końcowych wyników [9].

6 OCENA JAKOŚCI DANYCH

Zazwyczaj najbardziej czasochłonny i pracochłonny jest etap gromadzenia danych dotyczących cyklu życia analizowanych obiektów. Jak wspomniano wcześniej, skonstruowany model systemu wyrobu jest wypełniany danymi w fazie analizy zbioru wejść i wyjść. Po sprawdzeniu poprawności modelu i agregacji, trafiają one do następnej fazy badania – LCIA. Zanim jednak zostanie przeprowadzona dalsza analiza, powinna zostać oszacowana jakość zebranych danych. Im bowiem będzie ona niższa, tym uzyska się mniej wiarygodne wyniki końcowe. W omawianych badaniach LCA punktem wyjścia stała się kwestia ważkości poszczególnych danych. Przyjęto podstawowe założenie, że im określona dana wejściowa jest ważniejsza, tym wyższą jakość powinna wykazywać. Zaproponowano analizowanie owej ważkości w powiązaniu z wynikami fazy LCIA, wychodząc z założenia, że to one stanowią klucz badania. Zmieniano wartości danych (zmiennych) wejściowych o 1 i 10 procent i monitorowano procentowe zmiany w wynikach LCIA (na poziomie 11 kategorii wpływu). Następnie owe częściowe wartości sumowano i otrzymano zbioreczą wartość procentowej zmiany wyników LCIA, odpowiednio, dla 1- i 10-procentowej zmiany danych początkowych (zwanymi dalej zmiennymi wyjściowymi).

Uzyskany zbiór wyników poddano klasycznej charakterystyce statystycznej i wprowadzono 5 parametrów zwanych wskaźnikami wrażliwości SIs (*Sensitivity Indicators*). Każdemu z nich przypisano odpowiednie wartości procentowych zmian z analizy wrażliwości. Kolejnym etapem było przypisanie do owych pięciu wskaźników wrażliwości pięciu wskaźników jakości danych DQIs (*Data Quality Indicators*) oraz klas jakości (*Quality Classes*). Dane o IS równym VHIS uzyskały najniższy wskaźnik jakości (1) i klasę jakości (E). Natomiast danym o największym IS równym HS przypisano najwyższy DQI (równy 5) i klasę jakości (A). Tym samym analiza wrażliwości posłużyła do określenia pewnych minimalnych pułapów jakości wedle relacji, że im dana obserwacja jest ważniejsza (większy IS), tym wyższą powinna mieć jakość (wyższy DQI i klasa jakości). Powyższe badanie pozwoliło na określenie tylko pewnych teoretycznych poziomów jakości danych, które powinny być uzyskane. Zasadnicze pytanie, jakie się w tym momencie nasuwa, dotyczy rzeczywistej jakości owych danych. Bo fakt, że dana X jest niezwykle istotna, że ma największy współczynnik wrażliwości i powinna wykazywać największy wskaźnik jakości, nie przesądza, iż rzeczywiście taki posiada. W przypadku dysponowania danymi „dobrymi” ze statystycznego punktu widzenia można dokonać analizy statystycznej i zaoptymizować te dane w miary niepewności. „Dobre” dane to jednak odpowiednio duże próby pobrane w podobny sposób z reprezentatywnych źródeł. Niestety, w badaniach LCA bardzo często korzysta się z danych o niskiej „statystycznej jakości”, często nawet z danych punktowych. Z uwagi na to proponuje się pewne specyficzne formy oceny ich jakości. Jedną z nich jest metoda tzw. macierzy pochodzenia, zaprezentowanej po raz pierwszy przez Bo Weidema w 1996 roku. Metoda macierzy pochodzenia została oparta na przypisaniu danym wartości DQI na podstawie 5 kryteriów związanych ze sposobem gromadzenia danych, wielkością próby, wiekiem danych oraz zakresem geograficznym i technologicznym. Im bardziej dane odpowiadają wymaganiom, tym uzyskują wyższy wskaźnik jakości. W niniejszych badaniach dokonano pewnej modyfikacji macierzy pochodzenia, wprowadzając cząstkowe wartości DQI oraz pojęcia docelowych wskaźników jakości DQG (*Data Quality Goals*) i dystansu w jakości danych DQD (*Data Quality Distance*).

W odniesieniu do każdej danej za pomocą macierzy pochodzenia zostały obliczone cząstkowe wartości DQD dla poszczególnych kryteriów, a następnie zsumowane w jedną wartość. *Data Quality Distance* wyraża różnicę (dystans) pomiędzy założonym wzorcem (wyrażonym jako DQG) a tym, co jest w rzeczywistości (DQI). Im większa owa różnica, tym niższa jakość danej. Podobnie jak w przypadku analizy wrażliwości, także tutaj poszczególnym wartościom DQD zostały przypisane wartości 5 wskaźników DQI i 5 klas jakości. Stanowi to wspólną podstawę porównawczą analizy jakości opartej na analizie wrażliwości i oceny jakości opartej na macierzy pochodzenia. Jako że w tym przypadku każda z obserwacji może wykazywać swój indywidualny poziom jakości, owa analiza została przeprowadzona dla wszystkich dostępnych danych (około 2 tys.) – zarówno gromadzonych osobiście, jak i pobranych z komputerowych baz danych.

7 ANALIZA NIEPEWNOŚCI

Przypisanie danym wskaźników jakości było istotne z jeszcze innego względu. Ponieważ w badaniach LCA wykorzystuje się dane z bardzo małych prób, często nawet punktowych, należało znaleźć sposób na rozwiązanie problemu rozkładu prawdopodobieństwa. Modele operujące danymi, dla których nie można wyznaczyć rozkładów prawdopodobieństwa, określa się mianem modeli deterministycznych (funkcjonujących w warunkach pewności). Jeśli jednak można dokonać charakterystyki statystycznej i określić niepewność danych, mówi się o modelach probabilistycznych (stochastycznych). W omawianych badaniach pomp wykorzystano zaproponowane w pracy [16] połączenie analizy jakości danych z analizą niepewności. Na podstawie wskaźników DQI przypisano poszczególnym danym odpowiednie rozkłady prawdopodobieństwa beta o ściśle określonych parametrach. Tym samym wartości punktowe zastąpiono nieskończoną liczbą możliwości w ramach wskazanych wartości krańcowych. Owe przypisanie opiera się na zależności, że im niższy wskaźnik jakości danych, tym większe odchylenie procentowe danej wchodzącej do systemu. Kolejnym etapem stała się symulacja Monte Carlo dokonana zgodnie ze specjalnie opracowanym algorytmem. W prezentowanych badaniach zasto-

sowano pewne wskaźniki, wyrażające obciążenie środowiskowe przypadające na jednostkę wejścia (wyprowadzone z obliczeń LCA metodą Ekowskażnika99) jako zmienne wejściowe stałe. Zmiennymi wejściowymi losowymi były wartości danych głównych wejściowych, a zmienną losową wyjściową był wynik badania (jako wartość ekowskażnika). Następnie za pomocą 500 symulacji Monte Carlo pobrano losowo z zadanych rozkładów beta odpowiednie wartości i uzyskano po 500 wyników ekowskażników dla każdego etapu cyklu życia każdej analizowanej pompy. Kolejnym krokiem było sprawdzenie zgodności uzyskanych rozkładów empirycznych z danymi rozkładami teoretycznymi. Wykonano szereg testów normalności, na podstawie których stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, iż uzyskane wyniki mają rozkłady normalne o określonych parametrach (średniej i odchyleniu). Mając tego typu informacje, można było określić zakresy niepewności wyników (jako ± 2 odchylenia standardowe). Tym samym deterministyczny model wyjściowy został zastąpiony modelem stochastycznym.

8 WNIOSKI KOŃCOWE

Gdyby nie przeprowadzono oceny jakości danych, analizy niepewności oraz innych technik interpretacyjnych, uzyskano by określone wyniki liczbowe, jednak bez wiedzy o ich niepewności. Patrząc na wyniki wskaźników można by określić rodzaj i wpływ oddziaływania na środowisko oraz zidentyfikować jego główne źródła. Nie można by jednak odpowiedzieć na pytanie, czy wyniki te pozostają stabilne bez względu na rodzaj podjętych wyborów i jakość użytych danych. Wreszcie nie można by tej niepewności wbudować w ostateczny wynik i wykazać w postaci zakresów niepewności. Dzięki przeprowadzeniu wspomnianych analiz stwierdzono, że uzyskana na bazie obliczeń wyraźna różnica (przewaga) pomiędzy pompami opartymi na nowej i starej technologii jest oceną wiarygodną. Zarówno wyniki analizy udziału, analizy porównawczej, jak i szeregu analiz wrażliwości wykazały niewrażliwą strukturę wyników. Nawet zmiany tak fundamentalnych kwestii, jak: rodzaj jednostki funkcjonalnej, wielkości strumieni odniesienia, kryteriów ważenia, normalizowania, czy sposobów modelowania oceny wielkości wpływu, nie doprowadziły do istotnej zmiany

wyników. Ponadto określono zakresy niepewności końcowych wyników (jako plus minus dwa odchylenia standardowe).

Prezentowana praca doktorska stanowi przykład zastosowania różnych technik interpretacyjnych do określenia wiarygodności wyników. Centralnym zaś jej punktem było przeprowadzenie oceny jakości danych na bazie połączenia analizy wrażliwości z macierzą pochodzenia oraz wykorzystania tych wyników do symulacji Monte Carlo. Dzięki tym zabiegom wyniki badania można było poddać charakterystyce statystycznej i wykazać ich niepewność. W pracy wykorzystano program *STATISTICA* umożliwiający między innymi, dokonanie symulacji Monte Carlo, przeprowadzenie testów normalności, czy dopasowanie rozkładów prawdopodobieństwa do zbiorów wyników.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Goedkoop M., Spriensma R. (2000). The Eco-indicator 99; A damage oriented method for Life Cycle Assessment; Methodology Report; PreConsultants, The Netherlands.
- 2) Heijungs R., Kleijn R. (2001). Numerical approaches towards life cycle interpretation: Five examples, *Int J of LCA*, 6 (3), 141-148.
- 3) Heijungs R., Suh S., Kleijn R. (2005). Numerical approaches to life cycle interpretation. The case of the ecoinvent[®]96 database. *Int J of LCA*, 10 (2), 103-112.
- 4) Huppes G., Simonis U.E. (2000). Environmental Policy Instruments in a new era, CML-SSP Working Paper 2000.002, Leiden.
- 5) Kloepffer W., Heinrich A.B. (2005). 2005- The 10th Anniversary Volume of *Int J LCA*. *Int J of LCA*, 10 (2), 95.
- 6) Kłós Z., Laskowski G. (1998). Metody ekobilansowe w zarządzaniu środowiskiem, Materiały V Konferencji TQM Elementy i ich intergacja; Boszkowo k/Leszna, 126-136.
- 7) Kulczycka J., Góralczyk M., Koneczny K., Przewrocki P., Wąsik A. (2001). Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego, IGSMiE PAN, Kraków.
- 8) Lewandowska A., Foltynowicz Z. (2004). Comparative LCA of Industrial Objects. Part 2: Case study for chosen industrial pumps, *Int J of LCA*, 9 (3), 180-186.
- 9) Lewandowska A., Foltynowicz Z., Podleśny A. (2004). Comparative LCA of Industrial Objects. Part 1: LCA data quality assurance – sensitivity analysis and Pedigree Matrix, *Int J of LCA*, 9 (2), 86-89.
- 10) PN-EN ISO 14040 (2000). Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura, PKN, Warszawa.
- 11) PN-EN ISO 14041 (2002). Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Określenie celu i zakresu oraz analiza zbioru, PKN, Warszawa.
- 12) PN-EN ISO 14042 (2002). Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Ocena wpływu cyklu życia, PKN, Warszawa.
- 13) PN-EN ISO 14043 (2002). Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Interpretacja cyklu życia, PKN, Warszawa.