

ANALIZA PORÓWNAWCZA METOD SZACOWANIA KOSZTÓW WYPOSAŻENIA ELEKTROMECHANICZNEGO MAŁYCH ELEKTROWNI WODNYCH

Seweryn Lipiński, Tomasz Olkowski

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. Celem pracy była analiza porównawcza metod estymacji kosztu wyposażenia elektromechanicznego przeznaczonego dla małych elektrowni wodnych. Dla realizacji celu pracy, funkcje kosztów zostały przekształcone do formy umożliwiającej ich porównanie. Następnie obliczono teoretyczny koszt inwestycji w sprzęt elektromechaniczny dla sześciu istniejących elektrowni wodnych. Podstawowy wniosek z przeprowadzonych badań jest taki, że duże różnice w wynikach uzyskanych przy użyciu różnych metod nie pozwalają na ich proste stosowanie w przypadku planowania rzeczywistej inwestycji w małą elektrownię wodną. W związku z tym istnieje potrzeba przeprowadzenia szeroko zakrojonych badań na podstawie krajowych inwestycji w małe elektrownie wodne, które pozwoliłyby na opracowanie modeli opartych na danych lokalnych oraz stworzenie bazy danych o polskich studiach przypadku.

Słowa kluczowe: mała elektrownia wodna, koszty inwestycji, funkcje kosztów, urządzenia elektromechaniczne

WSTĘP

Właściwa ocena kosztów inwestycyjnych jest kluczowa w każdym projekcie, a inwestycje dotyczące odnawialnych źródeł energii, ze szczególnym uwzględnieniem małych elektrowni wodnych, z pewnością nie stanowią wyjątku od tej reguły. W przypadku małych elektrowni wodnych, koszty inwestycji można podzielić na dwie części. Pierwszą składową jest koszt sprzętu elektromechanicznego, który, jak wskazuje studium literaturowe, można dość dokładnie oszacować [Singal i Saini 2008, Ogayar

Adres do korespondencji – Corresponding author: Seweryn Lipiński, Katedra Elektrotechniki, Energetyki, Elektroniki i Automatyki, Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, e-mail: seweryn.lipinski@uwm.edu.pl

i Vidal 2009, Aggidis i in. 2010, Mishra i in. 2011, Santolin i in. 2011, Cavazzini i in. 2016, Lipiński i Olkowski 2017]. Koszt urządzeń elektromechanicznych dla nowych małych elektrowni wodnych wynosi najczęściej około 30–40% całkowitego nakładu [Penche 2004, Ogayar i Vidal 2009], a w przypadku modernizacji istniejących małych elektrowni wodnych składowa ta stanowić będzie główny koszt. Drugą składową budżetu inwestycji w małą elektrownię wodną będą koszty dodatkowe, takie jak zakup gruntów, koszt infrastruktury i siły roboczej, które są niezwykle trudne do oszacowania, ponieważ są zbyt zależne od warunków lokalnych, takich jak lokalizacja elektrowni (a dokładniej ewentualne trudności z dostępem do planowanej lokalizacji) i ściśle z tym powiązane lokalne koszty materiałów budowlanych i siły roboczej [Mishra i in. 2011, Bracken i in. 2014]. Niniejsza praca podejmuje temat pierwszej ze składowych kosztów małej elektrowni wodnej, tj. kosztu inwestycji w sprzęt elektromechaniczny. W pracy podjęto próbę krytycznej analizy formuł matematycznych (funkcji kosztów) pozwalających oszacować te nakłady finansowe.

METODYKA

Pierwszym etapem prac było zebranie dostępnych w literaturze formuł matematycznych pozwalających oszacować koszt inwestycji w sprzęt elektromechaniczny dla małej elektrowni wodnej. Pierwszą tego typu formułę datuje się na rok 1979 [Gordon i Penman 1979]. Od tego momentu pojawiło się wiele innych przeznaczonych do tego samego celu. Podstawowe podejście opiera się na wykorzystaniu jedynie danych na temat mocy małej elektrowni wodnej i jej spadu. Zastosowano je w pracach Guliwera i Dotana [1984], Whittingtona i in. [1988], Vorosa i in. [2000], Papantonisa [2001], Gordona [2003], Kaldellisa [2007], Singala i Sainiego [2008] oraz Aggidisa i in. [2010]. Ogayar i Vidal [2009] wzięli pod uwagę także rodzaj turbiny (Kaplan, semi-Kaplan, Francis lub Pelton), podczas gdy Cavazzini i in. [2016] uzupełnili to podejście o projektowaną prędkość przepływu (ale bez rozróżnienia między turbinami Kaplana i semi-Kaplana).

Formuły te w postaci uogólnionej mają postać wykładniczą – koszt (C) jest wyrażony jako funkcja mocy elektrowni (P) i jej spadu (H):

$$C = a \cdot P^b \cdot H^c, \quad (1)$$

gdzie a , b i c są stałymi współczynnikami [Gordon i Penman 1979, Gulliver i Dotan 1984, Whittington i in. 1988, Voros i in. 2000, Papantonis 2001, Gordon 2003, Kaldellis 2007, Ogayar i Vidal 2009, Aggidis i in. 2010]. Jedynie Singal i Saini [2008] oraz Cavazzini i in. [2016] zaproponowali inną, choć wciąż zbliżoną postać funkcji kosztów, także eksponencjalną, ale w postaci sumy zamiast iloczynu.

Analizowane funkcje kosztów zostały przekształcone do postaci umożliwiającej ich porównanie. Jako walutę przyjęto dolara amerykańskiego (\$), przy czym przeliczenia wykonano z użyciem kursu wymiany z roku publikacji każdej z rozważanych formuł. Wszystkie funkcje kosztów nieuwzględniających typ turbiny pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Funkcje estymujące koszt sprzętu elektromechanicznego dla małych elektrowni wodnych bez uwzględniania typu turbiny

Table 1. Functions estimating the cost of electro-mechanical equipment for small hydropower plants without taking into account the type of turbine

Źródło formuły Source of the formula	Koszt inwestycji C (\$) w funkcji mocy elektrowni P (kW) i jej spadku H (m) The investment cost C (\$) as a function of the plant power P (kW) and its net head H (m)
Gordon i Penman [1979]	$C = 9000 \cdot P^{0,7} \cdot H^{-0,35}$
Gulliver i Dotan [1984]	$C = 9600 \cdot P^{0,82} \cdot H^{-0,35}$
Kaldellis [2007]	$C = 4125 \cdot P^{0,878} \cdot H^{-0,107}$
Singal i Saini [2008]	$C = 950 \cdot P^{0,8087} \cdot H^{-0,2127} + 1180 \cdot P^{0,8145} \cdot H^{-0,2083} + 613 \cdot P^{0,8108} \cdot H^{-0,2118} + 281 \cdot P^{0,8197} \cdot H^{-0,2075}$
Aggidis i in. [2010]	$C = 18552 \cdot P^{0,56} \cdot H^{-0,36}$

W tabeli 2 przedstawiono formuły estymujące koszt z uwzględnieniem typu turbiny. Analizie poddano jedynie te funkcje, które autorzy wyraźnie wskazali jako obejmujące jedynie koszt sprzętu elektromechanicznego, stąd sumaryczna liczba funkcji w tabelach 1 i 2 jest mniejsza od liczby wcześniej cytowanych źródeł.

Tabela 2. Funkcje estymujące koszt sprzętu elektromechanicznego dla małych elektrowni wodnych z uwzględnieniem typu turbiny

Table 2. Functions estimating the cost of electro-mechanical equipment for small hydropower plants taking into account the type of turbine

Źródło formuły i typ turbiny Source of the formula and turbine type	Koszt inwestycji C (\$) w funkcji mocy elektrowni P (kW), jej spadku H (m) i przepływu Q ($m^3 \cdot s^{-1}$) The investment cost C (\$) as a function of the plant power P (kW), its net head H (m) and flow rate Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)
Ogayar i Vidal [2009] – Kaplan	$C = 46198,04 \cdot P^{0,41662} \cdot H^{-0,113901}$
Ogayar i Vidal [2009] – semi-Kaplan	$C = 27102,22 \cdot P^{0,41662} \cdot H^{-0,113901}$
Ogayar i Vidal [2009] – Francis	$C = 35720 \cdot P^{0,439865} \cdot H^{-0,127243}$
Ogayar i Vidal [2009] – Pelton	$C = 24593 \cdot P^{0,6355275} \cdot H^{-0,281735}$
Cavazzini i in. [2016] – Kaplan	$C = 154643,16 \cdot H^{0,02156} + 0,0707 \cdot Q^{1,45636} + 172302,38 \cdot P^{0,11053} - 335262,48$
Cavazzini i in. [2016] – Francis	$C = 211,31 \cdot H^{1,27963} + 1600187,72 \cdot Q^{0,03064} + 10,68 \cdot P^{1,28487} - 1799944,12$
Cavazzini i in. [2016] – Pelton	$C = 1508132,21 \cdot H^{0,014} + 9423,73 \cdot Q^{0,515} + 3754,13 \cdot P^{0,416} - 1641868,30$

Przekształcone funkcje kosztów z obu tabel zostały wykorzystane do obliczenia teoretycznego kosztu sprzętu elektromechanicznego dla sześciu elektrowni wodnych o parametrach istniejących elektrowni wodnych zarządzanych przez spółkę Energa Wytwarzanie SA. Elektrownie dobrano tak, by miały one możliwie zróżnicowane parametry. W tabeli 3 zamieszczono dane dotyczące przeanalizowanych elektrowni, tj. ich lokalizację, typ turbin, moc P , spad H i przepływ Q .

Tabela 3. Dane techniczne i lokalizacja analizowanych elektrowni wodnych
Table 3. Technical data and location of the analysed hydropower plants

Lokalizacja elektrowni Location of the power plant	Typ turbiny Turbine type	Moc P (kW) Power P (kW)	Spad H (m) Net head H (m)	Przepływ Q (m ³ ·s ⁻¹) Flow rate Q (m ³ ·s ⁻¹)
Bielkowo	Francis	7200	44	21
Brąswałd	Kaplan	910+1550	8,75	13,1/21,3
Ciecholub	Francis	50	1,9	3,3
Czarnocińskie Piece	Kaplan	135	2,4	7,34
Lidzbark	Kaplan + Francis	322+230	3,04	11,2
Wadąg	Francis	230	3	7,1

WYNIKI I DISKUSJA

W tabeli 4 zamieszczono otrzymane wyniki, czyli estymowany koszt urządzeń elektromechanicznych dla przeanalizowanych elektrowni wodnych. Dla każdej z elektrowni zaznaczono obliczony koszt największy (pogrubienie) i najmniejszy (kursywa).

Tabela 4. Estymowany koszt wyposażenia elektromechanicznego dla analizowanych elektrowni wodnych (w tysiącach USD)
Table 4. Estimated cost of electromechanical equipment for the analysed hydropower plants (in thousands of USD)

Elektrownia Power plant	Gordon i Penman (1979)	Gulliver i Dotan (1984)	Kaldellis (2007)	Singal i Saini (2008)	Aggidis i in. (2010)	Ogayar i Vidal (2009)	Cavazzini i in. (2016)
Bielkowo	1200	3716	6704	1858	687	1098	949
Brąswałd	1024	2559	2477	1107	763	1313	<i>411</i>
Ciecholub	111	190	119	63	132	184	<i>-138 (!)</i>
Czarnocińskie Piece	205	395	279	135	211	323	119
Lidzbark	622	1303	1017	459	577	790	85
Wadąg	276	565	434	199	263	340	<i>-88 (!)</i>

Z danych zaprezentowanych w tabeli 4 wynika, że literaturowe modele estymacji kosztów wyposażenia elektromechanicznego dla małych elektrowni wodnych potrafią dać skrajnie różne wyniki, tj. szacowany koszt potrafi się różnić nawet kilkukrotnie. W pięciu na sześć przypadków model Gullivera i Dotana [1984] dał najwyższy wynik, z kolei model Cavazzini i in. [2016] najniższy. W kontekście drugiej ze wspomnianych formuł trzeba podkreślić, że w dwóch przypadkach model ten dał koszt ujemny, co jest w sposób oczywisty błędne. Wydawałoby się, że przez uwzględnienie zarówno typu turbiny, jak i przepływu, będzie to najdokładniejszy z modeli, jak jednak widać, jest on stworzony na bazie dość szczególnych przypadków i jest raczej niestosowny w szerszym zakresie parametrów elektrowni.

Także z analizy literatury wynika, że wartości teoretyczne uzyskane za pomocą różnych metod dla małych elektrowni wodnych znacząco się różnią – porównanie z kosztami rzeczywistymi wykazuje duże niedoszacowanie lub przeszacowanie kosztów [Ogayar i Vidal 2009, Cavazzini i in. 2016].

Przeprowadzona analiza i studium literaturowe prowadzą do wniosku, że formuły pozwalające oszacować koszt inwestycji w sprzęt elektromechaniczny dla małych elektrowni wodnych powinny być stosowane bardzo ostrożnie, tj. ze szczególnym uwzględnieniem szczegółowych danych dotyczących rozważanego projektu.

Uwagę należy zwrócić na literaturę zawierającą studia przypadków, w celu znalezienia istniejącej elektrowni o cechach podobnych do projektowanej. Ważne są formuły uwzględniające typ turbiny [Ogayar i Vidal 2009, Santolin i in. 2011, Cavazzini i in. 2016, Lipiński i Olkowski 2017], ale w naszej opinii należy przeprowadzić więcej badań na ten temat, biorąc pod uwagę więcej analiz elektrowni w różnych lokalizacjach geograficznych [Carapellucci i in. 2015, Cavazzini i in. 2016, Lipiński i Olkowski 2017]. W kontekście rezultatów niniejszej pracy proste użycie wybranej formuły [Okot 2013, Zema i in. 2016] musi rodzić pytanie o trafność wyników i rzetelność analizy ekonomicznej, która jest niezwykle ważna w momencie, gdy trzeba podjąć decyzję o inwestycji.

WNIOSKI

1. Zaobserwowano znaczące różnice w wynikach uzyskanych przy użyciu różnych formuł pozwalających oszacować koszt inwestycji w sprzęt elektromechaniczny dla małych elektrowni wodnych.

2. Obserwacja ta skłania ku zaleceniu ostrożnego stosowania analizowanych formuł.

3. W przypadku planowania inwestycji w małą elektrownię wodną bardziej wskazane byłoby odniesienie się do właściwego studium przypadku – możliwie zbliżonego do rozważanego projektu.

4. Istnieje potrzeba szeroko zakrojonych badań opartych na polskich inwestycjach w małe elektrownie wodne, które pozwoliłyby opracować funkcje kosztów na podstawie lokalnych danych i uzupełnić bazę danych o studia przypadków.

5. Otrzymane funkcje pozwoliłyby dokładniej określić koszty modernizacji lub budowy małej elektrowni wodnej na terenie Polski.

PIŚMIENNICTWO

- Aggidis, G.A., Luchinskaya, E., Rothschild, R., Howard, D.C. (2010). The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. *Ren. Energ.*, 35(12), 2632–2638.
- Bracken, L.J., Bulkeley, H.A., Maynard, C.M. (2014). Micro-hydro power in the UK: The role of communities in an emerging energy resource. *Energ. Pol.*, 68, 92–101.
- Carapellucci, R., Giordano, L., Pierguidi, F. (2015). Techno-economic evaluation of small-hydro power plants: Modelling and characterisation of the Abruzzo region in Italy. *Ren. Energ.*, 75, 395–406.
- Cavazzini, G., Santolin, A., Pavesi, G., Ardizzon, G. (2016). Accurate estimation model for small and micro hydropower plants costs in hybrid energy systems modeling. *Energy*, 103, 746–757.
- Gordon, J.L. (2003). Determining Ballpark costs for a proposed project. *Hydro Rev. Wordw.*, 11(1), 37–41.
- Gordon, J.L., Penman, A.C. (1979). Quick estimating techniques for small hydro potential. *J. Water Power Dam. Constr.*, 31(9), 46–51.
- Gulliver, J.S., Dotan, A. (1984). Cost estimates for hydropower at existing dams. *J. Energ. Eng.*, 110(3), 204–214.
- Kaldellis, J.K. (2007). The contribution of small hydro power stations to the electricity generation in Greece: technical and economic considerations. *Energ. Pol.*, 35(4), 2187–2196.
- Lipiński, S., Olkowski, T. (2017). Estimation of the cost of electro-mechanical equipment for small hydropower plants – review and comparison of methods. *E3S Web Conf.*, 5(19), 01023.
- Mishra, S., Singal, S.K., Khatod, D.K. (2011). Optimal installation of small hydropower plant – A review. *Ren. Sust Energ. Rev.*, 15(8), 3862–3869.
- Ogayar, B., Vidal, P.G. (2009). Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant. *Ren. Energ.*, 34(11), 6–13.
- Okot, D.K. (2013). Review of small hydropower technology. *Ren. Sust Energ. Rev.*, 26, 515–520.
- Penche, C. (2004). Guide on how to develop a small hydropower plant. ESHA, Brussels.
- Santolin, A., Cavazzini, G., Pavesi, G., Ardizzon, G., Rossetti, A. (2011). Techno-economical method for the capacity sizing of a small hydropower plant. *Energ. Convers. Manag.*, 52(7), 2533–2541.
- Singal, S.K., Saini, R.P. (2008). Analytical approach for development of correlations for cost of canal-based SHP schemes. *Ren. Energ.*, 33(12), 2549–2558.
- Papantonis, D. (2001). Small hydro power stations. Simeon, Ateny.
- Voros, N.G., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. (2000). Short-cut design of small hydroelectric plants. *Ren. Energ.*, 19(4), 545–563.
- Whittington, H.M., Wallace, A.R., Henderson, D.S. (1988). An economic analysis of capital cost in micro-hydro. *Proc. Third Int. Conf. Small Hydro, Int. Water Power & Dam. Constr.*, 182–197.
- Zema, D.A., Nicotra, A., Tamburino, V., Zimbone, S.M. (2016). A simple method to evaluate the technical and economic feasibility of micro hydro power plants in existing irrigation systems. *Ren. Energ.*, 85, 498–506.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ESTIMATING COSTS OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT FOR SMALL HYDROPOWER PLANTS

Abstract. The purpose of the work was to collect and compare the methods of estimating the cost of electromechanical equipment for small hydropower plants. To achieve the purpose of the work, the collected cost functions were transformed into a form that allows their comparison. Then, the theoretical cost of investment in electromechanical equipment for the six existing hydropower plants was calculated. The basic conclusion from the conducted research is that large differences in the results obtained using various methods do not allow their simple application in the case of planning a real investment in a small hydro power plant. Therefore, there is a need for extensive research based on national investments in small hydropower plants that would allow the development of models based on local data and the creation of a database on Polish case studies.

Key words: small hydropower plant, investment costs, cost functions, electromechanical equipment