

Ocena efektywności inwestycji w sieciach średniego i niskiego napięcia przy wykorzystaniu metody taksonomicznej

Streszczenie. W artykule omówiono metodę taksonomiczną służącą do podziału środków inwestycyjnych w przedsiębiorstwach dystrybucyjnych. Metoda ta pozwala rozdzielić środki finansowe przeznaczone na rozwój i modernizację sieci uwzględniając cztery aspekty rozwoju sieci: techniczny, ekonomiczny, środowiskowy i społeczny.

Abstract. The article also discusses the taxonomy for the allocation of investment costs in distribution companies. This method is scattered financial resources allocated to the development and modernization of the network four aspects of development: technical, economic, environmental and social. (**Assessment of investment effectiveness in medium and low voltage grids using the taxonomic method**).

Keywords: taxonomic method, distribution networks, network investments.

Słowa kluczowe: metoda taksonomiczna, sieci dystrybucyjne, inwestycje sieciowe.

Wstęp

Sieć elektroenergetyczna powinna spełniać podstawowe wymagania dotyczące przede wszystkim wysokiej jakości dostarczanej energii elektrycznej i niezawodności zasilania odbiorców, a także dawać się łatwo przystosowywać do zasilania nowych odbiorców i wzrastających obciążeń sieci oraz zapewniać bezpieczeństwo obsłudze i użytkownikom. Stan sieci dystrybucyjnej ma zasadnicze znaczenie dla zrównoważonego rozwoju kraju i zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej. Rozwój infrastruktury elektroenergetycznej musi być ściśle skorelowany ze wzrostem gospodarczym, który wymusza zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną, z rozwojem źródeł rozproszonych, w tym szczególnie energetyki wiatrowej oraz z celami i priorytetami krajowych oraz unijnych dokumentów strategicznych [1,2]. Dlatego też sieci energetyczne powinny być eksploatowane, projektowane, budowane lub modernizowane tak, aby:

- były niezawodne w działaniu,
- pozwoliły na przesył energii o określonej jakości,
- były bezpieczne dla środowiska naturalnego,
- nie stwarzały zagrożenia dla osób postronnych i służb eksploatacyjnych,
- były powtarzalne co do rozwiązań konstrukcyjnych;
- nie były uciążliwe w eksploatacji,
- umożliwiły w przyszłości łatwą rozbudowę lub modernizację,
- nie powodowały zbędnych konfliktów pomiędzy właścicielem nieruchomości a Spółką Dystrybucyjną.

W tabeli 1 przedstawiono strukturę wiekową wybranych elementów sieci dla pięciu największych Operatorów Sieci Dystrybucyjnej.

Tabela 1. Struktura wiekowa elementów sieci dystrybucyjnej [3]

	>40 lat	25-40 lat	10-25 lat	<10 lat
Linie napowietrzne SN	37	39	17	7
Linie kablowe SN	16	24	28	31
Stacje SN/nN	28	32	22	19
Transformatory SN/nN	15	29	25	31
Linie napowietrzne nN	31	35	21	13
Linie kablowe nN	13	25	31	31

Zaprezentowana struktura wiekowa elementów systemu elektroenergetycznego wskazuje, że sieć elektroenergetyczna jest stara. Około 50% sieci ma powyżej 25 lat, a około 30% powyżej 40 lat. Należy więc w szerszym zakresie modernizować infrastrukturę sieciową. Obecne sieci dystrybucyjne i przesyłowe powodują bowiem duże straty energii i mają ograniczoną niezawodność. Za

generowanie strat w dużej mierze odpowiadają linie niskiego napięcia. Dodatkowo, efektywność energetyczną obniża zużycie krajowej infrastruktury, w tym głównie transformatorów. Choć pod tym względem Polska nie odbiega od krajów Europy zachodniej, to jednak tam wiek infrastruktury rekompensowany jest m.in. przez większe zagęszczenie sieci. Inwestycje w modernizację oraz rozbudowę polskiej sieci przesyłowej i dystrybucyjnej wydają się więc nieuniknione, pomimo iż będą wiązały się one z koniecznością poniesienia znacznych nakładów finansowych.

Metody taksonomiczne

Podstawowym pojęciem stosowanym w metodach taksonomicznych jest t. zw. odległość taksonomiczna. Jest to odległość między punktami wielowymiarowej przestrzeni liczona najczęściej według zasad używanych w geometrii analitycznej. Wymiar przestrzeni jest określany przez liczbę zmiennych charakteryzujących jednostki badanej zbiorowości. Obliczone odległości pozwalają określić położenie każdego punktu w stosunku do pozostałych punktów, a tym samym określić miejsce tego punktu w całej zbiorowości, umożliwiając przez to ich uporządkowanie i klasyfikację.

Tworzywem, za pomocą, którego możliwe staje się prowadzenie takich badań, jest zbiór zmiennych charakteryzujących dane zagadnienie [3]. Znalezienie istniejących zależności jest utrudnione, ponieważ ustalony zbiór zmiennych jest tak liczny, że obraz rzeczywistości jest zaciemniony przez nadmiar wnoszonych przez nie informacji. Możliwość wyodrębnienia żądanych prawidłowości istnieje tylko wtedy, gdy spośród zebranych zmiennych znajdują się takie, które są ze sobą silnie skorelowane. W takim przypadku istnieje potrzeba wyeliminowania wszystkich silnie skorelowanych zmiennych i zastąpienia ich wielkością wypadkową. Otrzymana wielkość syntetyczna nosi nazwę czynnika i może być traktowana jako jedna prawidłowości badanego problemu. Takie zastępowanie zespołu zmiennych skorelowanych przez czynniki powinno odbywać się drogą jak najmniejszej straty informacji zawartej w zebranych zbiorze zmiennych.

Ocena, które dane są istotne i mają powiązanie umożliwiające porównania, które należy ze sobą połączyć itp., wymaga podstawowego zbadania wszystkich, które mogą być badane, bowiem są reprezentowane przez wystarczająco liczną próbkę.

Dobór cech (zmiennych) do badania statystycznego zawsze zależy od celu i zakresu analizy [4,5]. Przy ustalaniu wstępnej listy zmiennych należy jednak

przestrzegać pewnych ogólnych wskazówek doboru cech. Zestaw potencjalnych cech diagnostycznych powinien:

- reprezentować różne aspekty objaśnianego zjawiska,
- dotyczyć tylko istotnych aspektów i właściwości analizowanego zjawiska,
- być jednoznacznie i ściśle zdefiniowany,
- w miarę możliwości zawierać zmienne mierzalne (ilościowe),
- pozostawać w związku przyczynowo-skutkowym ze zjawiskiem objaśnianym,
- reprezentować udokumentowane źródła informacji,
- być kompletnym zbiorem dla wszystkich badanych obiektów.

Ze statystycznego punktu widzenia lista wyspecyfikowanych cech nie może być zbyt duża, a zestaw potencjalnych cech diagnostycznych powinien ponadto wykazywać:

- dużą dyspersję cech diagnostycznych,
- słabe wzajemne skorelowanie,
- wysokie skorelowanie ze zjawiskiem objaśnianym.

Wykorzystanie metody taksonomicznej do oceny efektywności inwestycji

Obecnie przy planowaniu inwestycji bierze się pod uwagę nie tylko aspekty techniczne i ekonomiczne, ale także środowiskowe i społeczne. Określenie czynników różnicujących oraz determinantów mających wpływ na rozwój sieci dystrybucyjnej ma istotne znaczenie w procesie formułowania strategicznych celów rozwoju tych sieci. Klasyfikacja poszczególnych jednostek wchodzących w skład obszarów dystrybucji pod względem stanu infrastruktury i potencjału rozwojowego jest użytecznym narzędziem oceny poziomu rozwoju tych sieci, pozwala także na wykorzystanie tej wiedzy w procesie zarządzania poprzez ukierunkowanie niezbędnych działań podczas projektowania i realizacji strategii rozwoju. W celu określenia pozycji rozwojowej sieci dystrybucyjnej można skonstruować macierz rozwoju obszarów dystrybucji opartą na analizie syntetycznych mierników (wskaźników).

Wyróżnia się następujące kryteria doboru zmiennych diagnostycznych [3,6,7,8] :

- merytoryczne. Mają one charakter obligatoryjny. Ocena tych kryteriów ma charakter subiektywny, jest dokonywana przez badacza, między innymi metodą ekspercką. Stosując kryteria merytoryczne, wymaga się, aby zmienne diagnostyczne: ujmowały najistotniejsze własności analizowanych zjawisk, były jasno, jednoznacznie i ściśle zdefiniowane, były logicznie ze sobą powiązane, umożliwiały wzajemną kontrolę poprzez znajomość związków statystycznych i merytorycznych pomiędzy poszczególnymi zmiennymi, charakteryzowały się zgodnością proporcji między liczbą zmiennych reprezentujących dany aspekt badanych zjawisk a ich znaczeniem merytorycznym,
- – formalne (w ramach kryteriów formalnych ujmuje się kryteria statystyczne). Kryteria te opierają się na obiektywnych miernikach, stanowią podstawę procedur, których celem jest wyeliminowanie zmiennych o małym stopniu diagnostyczności. Biorąc pod uwagę zróżnicowanie, nie traktuje się ich jako obligatoryjne – wynikający z nich zestaw zmiennych diagnostycznych zwykle jest kompromisem mającym na celu ustalenie jak największej liczby zmiennych, które spełniałyby równocześnie jak największą liczbę cząstkowych kryteriów diagnostyczności. Według kryteriów formalnych wymagane jest, by zmienne diagnostyczne charakteryzowały się następującymi własnościami:

- o mierzalności w sensie możliwości liczbowego wyrażenia poziomu cechy,
- o istnienia wiarygodnych i łatwo dostępnych informacji statystycznych,
- o kompletności danych dla wszystkich jednostek analizy,
- o ciągłości rozumianej w sensie konieczności eliminowania zmiennych specyficznych, uniemożliwiających wzajemną porównywalność jednostek w czasie i przestrzeni,
- o preferencji cech w wyrażeniu naturalnym, a nie wartościowym.

Do kryteriów statystycznych zalicza się:

- wysoką zdolność dyskryminacji jednostek analizy, co jest związane z dużą zmiennością cech (mierzoną współczynnikiem zmienności),
- brak wzajemnego wysokiego skorelowania w celu wyeliminowania zjawiska powtarzania się informacji niesionych przez poszczególne zmienne,
- reprezentatywność zmiennych diagnostycznych pod względem zmiennych wyeliminowanych z badań,
- wysokie skorelowanie z czynnikami głównymi wyodrębnionymi w całym zbiorze analizowanych zmiennych.

Metodyka

Do oceny efektywności inwestycji liniowych wykorzystano metodę Hellwiga, wyznaczając dla każdego obszaru dystrybucji tzw. taksonomiczny miernik rozwoju, który przedstawia w syntetyczny sposób informacje niesione przez poszczególne, opisujące go cechy diagnostyczne; jest funkcją tych zmiennych.

Algorytm pełnego postępowania w obliczeniach taksonomicznych przedstawia się następująco:

1. Ustalenie zestawu wskaźników koniecznych do analizy
2. Analiza wskaźników pod względem przynależności do grupy **stymulant** lub **destymulant** (w przypadku stwierdzenia, że dany wskaźnik jest destymulantą należy zmienić przy nim znak na przeciwny) oraz ich obiektywizacja.
3. Przeprowadzenie standaryzacji danych. Dokonuje się jej wg. następującej zależności:

$$z_{ik} = \frac{x_{ik} - x_k}{s_k}$$

gdzie: x_{ik} - wyjściowa wartość zmiennej, x_k - średnia arytmetyczna zmiennej, s_k - odchylenie standardowe zmiennej, z_{ik} - standaryzowana wartość zmiennej wyjściowej.

4. Ustalenie biegunów P i Q (określenie wartości najmniejszej P i największej Q dla każdej zmiennej).
5. Przesunięcie układu wg. zależności:

$$u_{ik} = z_{ik} - P_k$$

6. Obliczenie sumy kwadratów bieguna górnego z zależności:

$$Q = \sum Q_k^2$$

7. Obliczenie iloczynów zmiennych wg. zależności:

$$U_i = u_{ik} * Q_k * w_{hi}$$

8. sposób obliczania w_{hi} jest w dalszym ciągu.
9. Obliczenie parametru rzutującego t_s -przeprowadza się je z następującej zależności:

$$t_s = \frac{\sum U_i}{Q}$$

10. Obliczenie rzutów na prostą 0 - Q zależność następująca:

$$u_{ik}^* = Q_k \cdot t_s$$

11. Określenie odległości rzutów od bieguna górnego, przeprowadza się wg. zależności:

$$c_{io} = \sqrt{\sum (u_{ik}^* - Q_k)^2}$$

12. Ustalenie ostatecznej miary rozwoju, przeprowadza się je z zależności:

$$d_i^* = \frac{c_{io}}{c_o}$$

$$d_i = 1 - d_i^*$$

gdzie: $c_o = \overline{c_o} + 2 \cdot s_o$, c_o - średnia arytmetyczna odległość rzutów od bieguna górnego. s_o - odchylenie standardowe odległości od bieguna górnego.

Najlepszy jest rejon mający najwyższą miarę rozwoju.

13. Wyznaczanie współczynników hierarchicznych

- o Oblicza się sumę odległości poszczególnych zmiennych od sąsiadów:

$$w_{hi} = \sum_{j=1}^{r_i} \rho(\alpha_i, \alpha_j)$$

gdzie: α_{ij} - numer sąsiada. $i = 1, 2, \dots, h$, r_i - liczba sąsiadów α_i - tej zmiennej, h - liczba zmiennych diagnostycznych, $\rho(\alpha_i, \alpha_j)$ - odległość i - tej od j - tej zmiennej.

- o Określa się tzw. odległość krytyczną h :

$$h = \max_i \min_j \rho(\alpha_i, \alpha_j)$$

- o Dla każdej zmiennej zbioru diagnostycznego ustala się wszystkie odległości nie większe od krytycznej:

$$Q_i = \{(i, j) | \rho(\alpha_i, \alpha_j) \leq k, j = 1, 2, \dots, h\}$$

- o Sumuje się otrzymane odległości dla poszczególnych elementów α_i

$$w_{hi} = \sum_{(i, j) \in Q_i} \rho(\alpha_i, \alpha_j)$$

- o Wybiera się zmienną, dla której obliczona suma odległości jest największa:

$$w_m = \max w_i$$

- o Oblicza się współczynniki hierarchiczne:

$$w_{hi} = \frac{w_i}{w_m}$$

Stan badań

Zebrano dane dla 6 obszarów dystrybucji. Brano pod uwagę 6 możliwych rodzajów inwestycji ograniczających straty energii, a mianowicie: budowę nowych linii niskiego napięcia, budowę nowych linii średniego napięcia, dobudowę stacji SN/nN, zwiększenie współczynnika obciążenia transformatorów, wymianę liczników indukcyjnych na statyczne, wymianę transformatorów o dużych stratnościach na energooszczędne.

Przy doborze zmiennych diagnostycznych mających wpływ na nowo powstające inwestycje sieciowe pod uwagę wzięto:

- aspekt techniczny,
- aspekt ekonomiczny,
- aspekt społeczny,
- aspekt środowiskowy.

Na podstawie znajomości badanego zagadnienia utworzono listę zmiennych, składających się z następujących wskaźników:

- w aspekcie technicznym:

- długość linii niskiego napięcia,
- długość linii średniego napięcia,
- obszar,
- straty energii
- liczba stacji transformatorowych SN/nN
- liczba stacji 110/SN
- moce zainstalowanych transformatorów,
- energia
- liczba odbiorców

- w aspekcie ekonomicznym:

- koszt inwestycji
- NPV
- IRR

• czas zwrotu inwestycji

- w aspekcie środowiskowym

- wpływ na rzeźbę terenu i krajobraz,
- wpływ na wodę (podziemną i powierzchniową),
- wpływ na zwierzęta i rośliny,
- wpływ na zdrowie ludzi,
- wpływ na różnorodność biologiczną
- oddziaływanie na obszary o specjalnym znaczeniu dla środowiska (parki narodowe, rezerwy przyrody, parki krajobrazowe, obszary chronionego krajobrazu).

- w aspekcie społecznym

- ujęcie inwestycji w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gminy,
- uchwalenia miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego gminy i pozyskania decyzji środowiskowej
- akceptacja społeczna,
- przychylność władz lokalnych.

Zbiór zmiennych poddano następnie weryfikacji mającej na celu wyodrębnienie par skorelowanych ze sobą cech oraz zmiennych quasi-stałych, czyli takich, które wykazują się tylko nieznacznym zróżnicowaniem wśród badanych obiektów. Działanie to ma na celu sprostanie postulatów wysuwanych przez autorów zajmujących się problemem doboru zmiennych diagnostycznych do modelu. Według ich wskazówek wytypowane cechy powinny wykazywać się wysoką zmiennością wśród badanych obiektów, a jednocześnie nie być ze sobą wzajemnie silnie skorelowane, aby nie powielać niesionych przez siebie informacji. Za miarę dyspersji przyjęto współczynnik zmienności. Jako miarę stopnia skorelowania zmiennych przyjęto współczynnik korelacji liniowej Pearsona: Współczynnik przyjmuje wartości z przedziału [-1; 1]. Jego wartość bezwzględna bliska jedności (praktycznie $r \geq 0,6$) świadczy o silnym liniowym związku między rozpatrywanymi cechami.

W tabeli 1 dla aspektu technicznego, a w tabeli 2 dla aspektu ekonomicznego przedstawiono macierz korelacji występujących pomiędzy zmiennymi diagnostycznymi w aspekcie technicznym i ekonomicznym. Aspekt społeczny i środowiskowy nie ma odpowiednika lingwistycznego. Wartości z zakresu 1 do 3 dobrano metodą ekspercką.

Tabela 1. Macierz współczynników korelacji pomiędzy parametrami w aspekcie technicznym

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	0,571	0,426	0,832	0,866	0,240	0,762	0,261	0,622
2	0,571	-	0,959	0,359	0,754	0,425	0,473	0,170	0,695
3	0,426	0,959	-	0,175	0,674	0,349	0,301	0,236	0,526
4	0,832	0,359	0,175	-	0,562	0,263	0,585	0,026	0,500
5	0,866	0,754	0,674	0,562	-	0,109	0,858	0,040	0,806
6	0,240	0,425	0,349	0,263	0,109	-	0,092	0,032	0,266
7	0,762	0,473	0,301	0,585	0,858	0,092	-	0,343	0,906
8	0,261	0,170	0,236	0,026	0,040	0,032	0,343	-	0,417
9	0,622	0,695	0,526	0,500	0,806	0,266	0,906	0,417	-

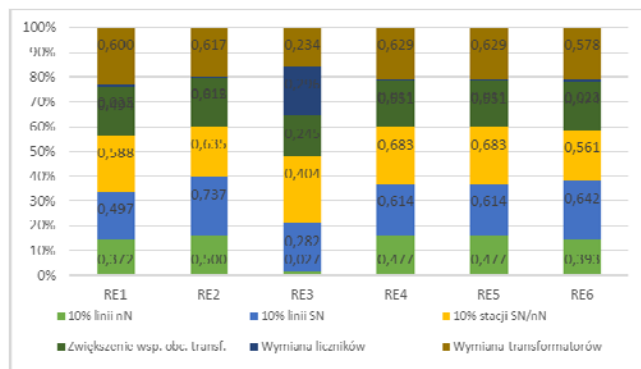
1-długość linii niskiego napięcia, 2-długość linii średniego napięcia, 3-obszar, 4-straty energii, 5-liczba stacji transformatorowych SN/nN, 6-liczba stacji 110/SN, 7-moce zainstalowanych transformatorów, 8-energia, 9-liczba odbiorców

Tabela 2. Macierz współczynników korelacji pomiędzy parametrami w aspekcie ekonomicznym

	Koszt	NPV	IRR	SPBT
Koszt	-	0,999	0,982	0,168
NPV	0,999	-	0,990	0,362
IRR	0,982	0,990	-	0,268
SPBT	0,168	0,362	0,268	-

Do dalszych badań wybrano 5 zmiennych: zmniejszenie strat energii, koszt inwestycji, prosty okres zwrotu inwestycji oraz wybrane metodą ekspercką aspekt środowiskowy i społeczny.

Metodą taksonomiczną określono, która inwestycja dla danego obszaru dystrybucji jest najkorzystniejsza. Wyniki przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Wyniki obliczeń taksonomicznych dla obszarów dystrybucji

Przy zastosowanych kryteriach, wymiana liczników i budowa linii nN jest najmniej opłacalna. Najbardziej opłaca się wymiana transformatorów, dobudowa stacji lub budowa linii SN. Można także dla danego obszaru dystrybucji określić kilka rodzajów inwestycji, i tak np. dla RE1 opłacalne jest zarówno budowa stacji SN/nN jak i wymiana transformatorów na energooszczędne. Zwiększenie współczynnika obciążenia transformatorów można dokonać bardzo małymi kosztami, „dopasowując” moc danego transformatora do jego obciążenia.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda stanowi praktyczne narzędzie do wykonania oceny efektywności inwestycji sieciowych. Wykorzystanie taksonomicznej metody pozwala na uwzględnienie kryteriów oceny, które w podejściu klasycznym są pomijane.

Autor: dr hab. inż. Anna Gawlak, prof. uczelni Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa. E-mail gawlak@el.pcz.czyst.pl

LITERATURA

- [1] Gawlak A., „Technological aspects of electrical energy distribution”, in Proc. 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering, (2014), pp. 45-48.
- [2] Gawlak A., „Noninvestment Forms of Reducing Energy Losses in Distribution Networks”, in Proc. 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, (2015), pp. 61-64.
- [3] Gawlak A., „Podział środków inwestycyjnych na rozwój sieci rozdzielczych przy zastosowaniu metody taksonomicznej”, Przegląd Elektrotechniczny, R.85 nr 3 (2009), pp. 157-160.
- [4] Kornatka M., and Gawlak A., „Comparative Analysis of Operating Conditions in Polish Medium-voltage and 110 kV Networks”, in Proc. 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, (2015), pp. 57-60.
- [5] Gawlak A., „Analysis of technical losses in the low and medium voltage power network”, in Proc. 11 th International Scientific Conference on Electrical Power Engineering, (2010), pp. 119-123.
- [6] Sowiński J., „Comparison of RAINS and Fisher’s models for calculating sulphur deposition in Poland”, Atmospheric Environment Vol.29, No.22, 1995, pp. 3385-3389.
- [7] Gawlak A., „The Influence of Investment on Reducing Energy Losses in Distribution Networks”, in Proc. 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, (2015), pp. 315-319.
- [8] Kolcun M., Kornatka M., Gawlak A., and Čonka Z., „Benchmarking the reliability of medium-voltage lines”, Journal of Electrical Engineering vol. 68 (3), (2017), pp. 212-215.