

Koszt termo-ekologiczny wytwarzania energii elektrycznej z elektrowni wiatrowych w Polsce

Agnieszka Ziniewicz*

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska
e-mail: niechaaa@gmail.com

Słowa kluczowe: koszt termo-ekologiczny, energetyka wiatrowa, losowość wytwarzania energii elektrycznej

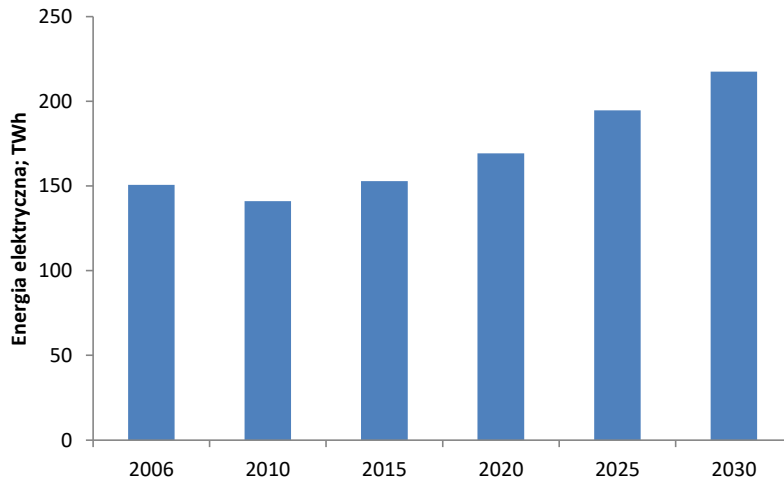
Streszczenie

Tematem pracy magisterskiej jest analiza wpływu zmienności wytwarzania energii elektrycznej z elektrowni wiatrowych w Polsce z trzech wybranych lat na bloki konwencjonalne o mocy 460 MW, 360 MW i 260 MW. W części teoretycznej pracy przedstawiono charakterystykę energetyki wiatrowej w Polsce oraz wyjaśniono pojęcie kosztu termo-ekologicznego (TEC). Następnie zaprezentowano przyjęty algorytm obliczeń TEC wytwarzania energii elektrycznej z elektrowni wiatrowych wraz z przykładem. Główną częścią pracy jest przedstawienie i ocena uzyskanych wyników. Przeprowadzone obliczenia potwierdzają, iż losowa generacja wiatrowa ma znaczący wpływ na pracę poszczególnych bloków konwencjonalnych.

* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym magisterskim wykonywanym przez autorkę w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką Dra hab. inż. Wojciecha Stanka.

1 Wprowadzenie

Z roku na rok obserwujemy wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną (Rys.1). Zapotrzebowanie to wynika z rozwoju społecznego i gospodarczego naszego państwa.

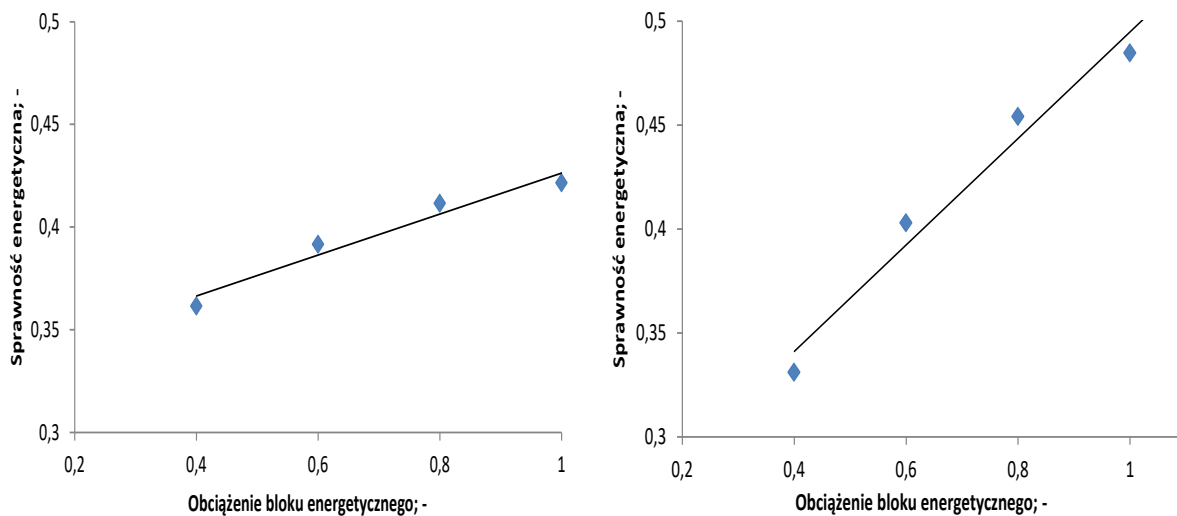


Rys. 1. Krajowe zapotrzebowanie na energię elektryczną

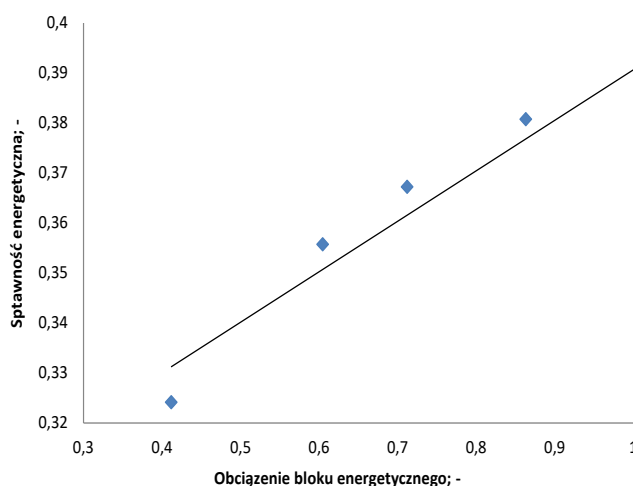
W Polsce nadal przeważa produkcja energii elektrycznej z paliw kopalnych takich jak: węgiel, ropa, gaz ziemny. Jednakże, aby zapewnić bezpieczeństwo energetyczne kraju i sprostać wymaganiom unijnej polityki klimatycznej wzrasta produkcja energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE). Do odnawialnych źródeł energii zaliczymy takie technologie jak:

- elektrownie wiatrowe,
- elektrownie wodne,
- elektrownie biogazowe,
- elektrownie zasilane biomasą,
- elektrownie fotowoltaiczne.

Elektrownie wykorzystujące energię wiatru zajmują ważne miejsce w strukturze odnawialnych źródeł energii w Polsce. Produkcja energii w elektrowniach wiatrowych zmienia się w sposób nieprzewidywalny ze względu na warunki atmosferyczne i nieprzewidziane zdarzenia. Aby skompensować te wahania i zrównoważyć „zieloną energię” z siecią elektroenergetyczną potrzebne są dodatkowe rezerwy. Obecnie w celu tej kompensacji wykorzystuje się bloki konwencjonalne. Często są one zmuszane do nagłego regulowania generacji energii elektrycznej, a w niektórych przypadkach nawet do całkowitego wyłączenia z sieci. Im więcej mocy z elektrowni wiatrowych zostanie dostarczonej do systemu, tym więcej jednostek konwencjonalnych zostanie wykluczonych na skutek ich niekonkurencyjnych – wobec pozostałych jednostek – kosztów zmiennych wytwarzania energii [13]. Praca bloku ze sprawnością nominalną przekłada się na większą efektywność w wykorzystaniu paliwa np. węgla. Na rysunkach 2 i 3 zostały przedstawione charakterystyki analizowanych bloków 460 MW, 360 MW i 260 MW.



Rys. 2. Charakterystyka sprawności energetycznej od obciążenia bloku 460 MW i 360 MW [9]



Rys. 3. Charakterystyka sprawności energetycznej od obciążenia bloku 260 MW

Powyższe wykresy prezentują jak zmiana obciążenia danego bloku wpływa na jego sprawność. Osiągnięcie sprawności projektowej będzie bezpośrednio uzależnione od mocy z jaką te bloki będą pracować w systemie elektroenergetycznym. Zasadne wydaje się, więc uwzględnienie problematyki ograniczonej pracy tych bloków w kontekście ich rzeczywiście osiągalnej sprawności, która tym rzadziej jest notowana, im więcej niestabilnych mocy OZE zostaje włączonych do sieci [13].

Podstawowymi czynnikami mającymi wpływ na rozwój energetyki wiatrowej są nie tylko korzyści ekologiczne, ale także postęp technologiczny i ekonomiczny. Postęp technologiczny dotyczy poprawy konstrukcji turbin, które mogą osiągać większe moce i sprawności. Ekonomiczne zaś, wynikają z mechanizmu dopłat do „zielonej energii”. Niewątpliwie, elektrownie wiatrowe mogą zaspokajać lokalne potrzeby energetyczne, a więc przyczynią się do szybszego rozwoju gospodarczego regionu i jego samowystarczalności. Oczywiście jest,

iż żadna technologia nie ma samych korzyści, ale posiada także wady. Zasadniczym problemem w powstawaniu nowych elektrowni wiatrowych są możliwości przyłączenia do systemu elektroenergetycznego. Zmienność wiatru ma wpływ na niestabilność generacji energii elektrycznej, a więc zaburza stabilną pracę systemu energetycznego. Energia elektryczna jest towarem, który podlega mechanizmom rynkowym, takim jak popyt i podaż. Brak efektywnych metod umożliwiających swobodne magazynowanie energii elektrycznej powoduje, że handel tym towarem jest utrudniony. Ponadto wyjątkowe znaczenie energii elektrycznej polega na tym, że każdy jej niedobór musi być równoważony na rynku bilansującym, w celu zapewnienia równowagi Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) [12].

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie analizy wpływu zmienności wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych w Polsce. Do jej oceny obliczono liczbę bloków konwencjonalnych kompensujących energię elektryczną wyprodukowaną przez źródła wiatrowe oraz wskaźniki takie jak koszt termo-ekologiczny czy jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa.

Dane wykorzystane do obliczeń zostały zaczerpnięte ze strony Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE). Dane dotyczą godzinnej generacji źródeł wiatrowych w MWh z trzech lat tj. 2014, 2015 i 2016 [16]. Wraz ze zmiennością generacji energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych dochodzi do redukcji czasu pracy i ilości bloków konwencjonalnych. W związku z tym do zbilansowania tej mocy posłużono się blokami o parametrach: 460 MW, 360 MW i 260 MW. Przeanalizowano pracę tych bloków z obniżonym obciążeniem – nie mniejszym niż 40%. Założono także, iż dysponujemy nie więcej niż 25 blokami każdej mocy.

2 Koszt termo-ekologiczny (TEC)

Rosnące wyczerpywanie nieodnawialnych zasobów naturalnych, a szczególnie zasobów paliw kopalnych, wskazuje na potrzebę oszczędności tych surowców. Do oceny tej oszczędności służy wskaźnik kosztu termo-ekologicznego [7].

Koszt termo-ekologiczny można zdefiniować jako „skumulowane zużycie energii bogactw nieodnawialnych obciążające wszystkie etapy procesów wytwórczych i transportowych prowadzących do rozpatrywanego produktu z uwzględnieniem dodatkowego zużycia energii wynikającego z konieczności kompensacji strat wywołanych odprowadzaniem szkodliwych produktów odpadowych do otoczenia”. Jest on wyrażony w jednostkach energii [15].

Można go obliczyć za pomocą układu równań bilansowych lub metodą sekwencyjną. Ogólną formę bilansu przedstawia poniższe równanie [9]:

$$\rho_j + \sum_i (f_{ij} - a_{ij}) \cdot \rho_i = \sum_s b_{sj} + \sum_k p_{kj} \cdot \zeta_k \quad (1)$$

gdzie:

ρ_j – właściwy koszt termo-ekologiczny produktu głównego w procesie j-tym, MJ/MJ,

a_{ij} – współczynnik zużycia i-tego produktu na jednostkę j-tego produktu głównego. Wyrażany w kg/kg lub kg/MJ.

f_{ij} – współczynnik zużycia i produkcji i-tego produktu na jednostkę j-tego produktu głównego. Wyrażany w kg/kg lub kg/MJ.

ρ_i – właściwy koszt termo-ekologiczny i-tego produktu, MJ/kg.

b_{sj} – egzergia s-tego nieodnawialnego surowca naturalnego, zużytego natychmiast w rozpatrywanym procesie na jednostkę j-tego produktu, MJ/kg.

p_{kj} – wskaźnik emisji k-tego szkodliwego produktu odpadowego z procesu j-tego, kg.

ζ_k – jednostkowy koszt termo-ekologiczny k-tego produktu odpadowego, MJ/kg.

Przykładowe wartości kosztu termo-ekologicznego dla pierwotnej nieodnawialnej energii paliw kopalnych zostały przedstawione w Tabeli 1, zaś w Tabeli 2 zaprezentowano średnie wartości kosztu termo-ekologicznego energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii.

Tabela 1. Wartości kosztu termo-ekologicznego wybranych paliw [8]

Paliwo	TEC; MJ/MJ
Węgiel kamienny	1,12
Węgiel brunatny	1,21
Gaz ziemny	1,06
Benzyna	1,10
Olej napędowy	1,10

Tabela 2. Średni koszt termo-ekologiczny energii elektrycznej z OZE [8]

	Średnia wartość; MJ/MJ
TEC produkcji biogazu	0,082
TEC energii elektrycznej z PV	0,294
TEC energii elektrycznej z wiatru	0,081

3 Charakterystyka energetyki wiatrowej w Polsce

Ważną datą dla sektora energetyki wiatrowej w Polsce był rok 2015, w którym uchwalono „Ustawę o Odnawialnych Źródłach Energii (OZE)”. Ustawa ta określa mechanizmy wspierania wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła z odnawialnych źródeł energii. Wiążącymi aktami prawnymi dotyczącymi OZE są również „Prawo energetyczne” z dnia 10 kwietnia 1997 r. oraz Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r.

Z dokumentów [1,2,3] wynika, iż w dalszym ciągu przysługuje pierwszeństwo w przyłączaniu do sieci odnawialnych źródeł energii - w stosunku do elektrowni konwencjonalnych. Cytując Ustawę o Odnawialnych Źródłach Energii: „Przedsiębiorstwo energetyczne zajmujące się przesyłaniem lub dystrybucją paliw gazowych lub energii jest obowiązane do zawarcia umowy o przyłączenie do sieci z podmiotami ubiegającymi się o przyłączenie do sieci, na zasadzie równoprawnego traktowania i przyłączania, w pierwszej kolejności, instalacji odnawialnego źródła energii, jeżeli istnieją techniczne i ekonomiczne warunki przyłączenia do sieci” [3].

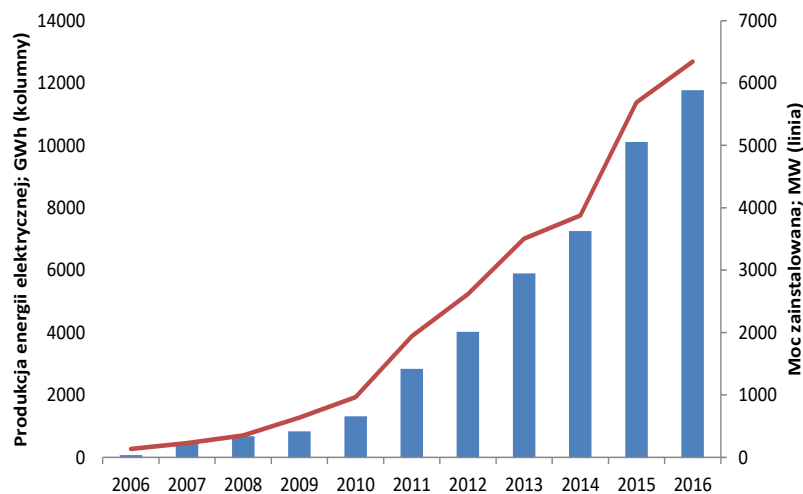
Przyłączanie elektrowni wiatrowych do sieci elektroenergetycznej regulują w Polsce następujące dokumenty:

- Ustawa Prawo energetyczne [2],
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [4],
- Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej (IRiESP) [5],
- Instrukcje ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnych (IRiESD) [6].

Potencjalne możliwości pozyskania energii przy wykorzystaniu turbin wiatrowych związane są przede wszystkim ze średniorocznymi prędkościami wiatru na danym terenie oraz z ukształtowaniem terenu. Pod względem mocy zainstalowanej elektrownie wiatrowe mają największą pozycję w kategorii OZE zasilających w energię elektryczną KSE.

Według założeń zapisanych w Pakiecie Energetyczno-Klimatycznym, na podstawie których zbudowano z kolei założenia Polityki Energetycznej Polski do roku 2030 udział energii ze źródeł odnawialnych w ostatecznym zużyciu energii w 2020 roku powinien w Polsce osiągnąć poziom 15%. Przekłada się to na prognozowany udział energii odnawialnej w produkcji energii elektrycznej wynoszący około 19,3% w roku 2020 [11]. Obecnie w analizach pozwalających na dokonanie oceny wpływu planowanych elektrowni wiatrowych na pracę Krajowego Systemu Energetycznego, w wariantcie maksymalnym, uwzględnia się łączną moc zainstalowaną w źródłach wiatrowych na poziomie ok. 9 GW [12]. Z kolei w raporcie Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej stwierdza się, że w 2020 roku jest realne osiągnięcie poziomu 13,6 GW mocy zainstalowanej w tego rodzaju źródłach [14].

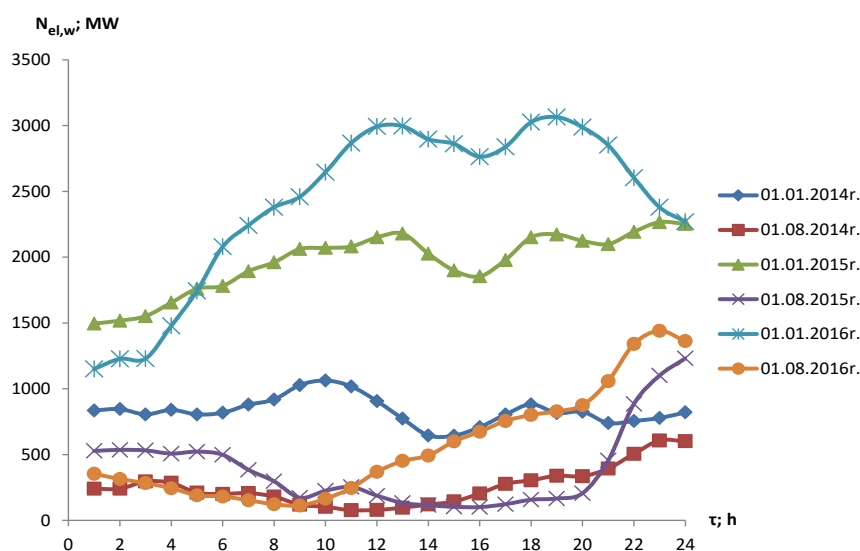
Na rysunku 4 zaprezentowano zestawienie mocy zainstalowanej i produkcji energii elektrycznej energetyki wiatrowej w Polsce w latach 2006-2016.



Rys. 4. Zestawienie mocy zainstalowanej i produkcji energii elektrycznej energetyki wiatrowej w Polsce w latach 2006-2016

Moc zainstalowana wszystkich instalacji wiatrowych znacząco rośnie. Można zauważyć, że w 2006 roku wynosiła 153 MW, a pod koniec roku 2016 wzrosła do ponad 5,5 GW. Do Krajowego Systemu Energetycznego w 2015 roku zostało przyłączonych 1266 MW, zatem całkowita moc zainstalowana wzrosła do 5100 MW. Przyłączenie turbin wiatrowych spowodowało, że Polska stała się drugim, co do wielkości rynkiem energii elektrycznej w Europie, zaraz po Niemczech [9].

Rys. 5. przedstawia generacje mocy elektrycznej z elektrowni wiatrowych w wybranych dniach roku.



Rys. 5. Dobowa zmienność mocy generowanej w elektrowniach wiatrowych w wybranych dniach roku

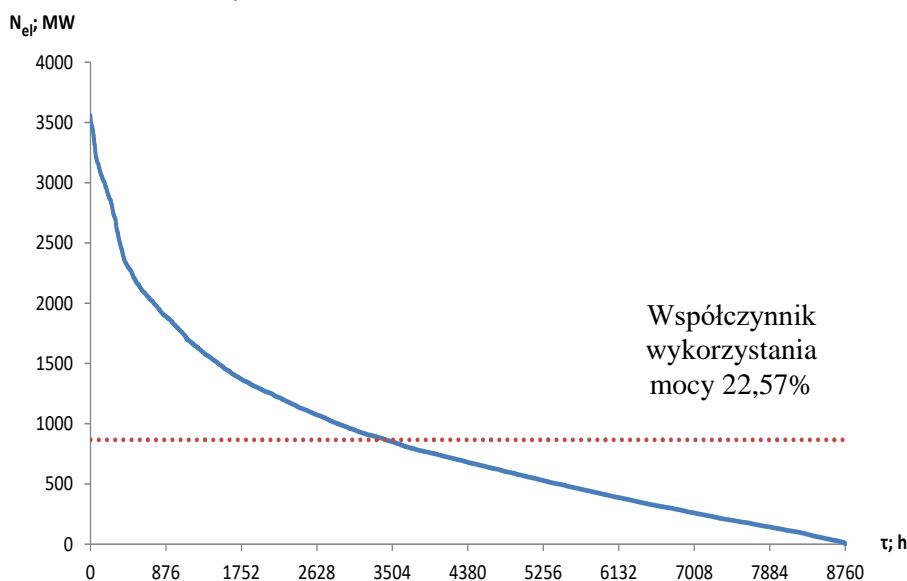
Można zauważyć, iż zimą generacja mocy elektrycznej z wiatru wzrasta rano i obniża się wieczorem. Odwrotnie jest latem - rano obserwowana jest tendencja spadkowa, kiedy zapotrzebowanie na moc elektryczną wzrasta. Widoczna jest tu także zależność, że latem produkcja mocy elektrycznej jest mniejsza niż zimą. Potwierdza to, że zimą wietrzność jest większa w porównaniu z latem.

W tabeli 3 zostały zestawione dane charakteryzujące generacje źródeł wiatrowych w Polsce z trzech wybranych lat tj. 2014, 2015 i 2016. Z tabeli wynika trend wzrostowy, gdyż wskaźniki rosną z każdym rokiem. Na przykład wytworzona energia elektryczna w 2014 roku wynosi 7,58 TWh, a pod koniec 2016 roku 11,69 TWh.

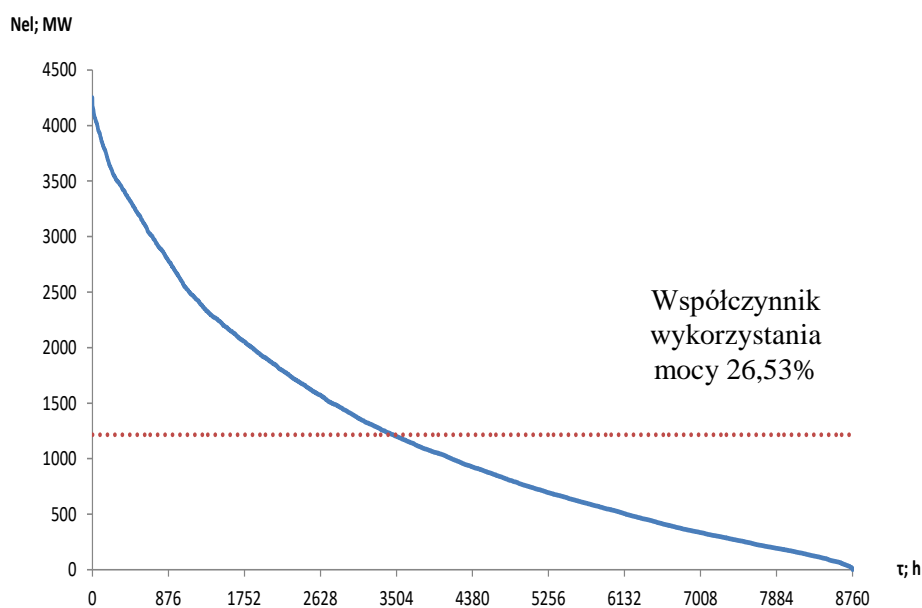
Tabela 3. Wybrane wskaźniki generacji źródeł wiatrowych z trzech lat

	2014r.	2015r.	2016r.
Moc zainstalowana; MW	3 833,83	4 582,04	5 660,07
Wytworzona energia elektryczna; TWh	7,58	10,65	11,69
Maksymalna moc wyjściowa; MW	3558,08	4 251,94	4 891,71
Minimalna moc wyjściowa; MW	5,88	8,91	17,51
Średnie obciążenie; MW	865,20	1 215,54	1 331,06
Współczynnik wykorzystania mocy, %	22,57	26,53	27,52

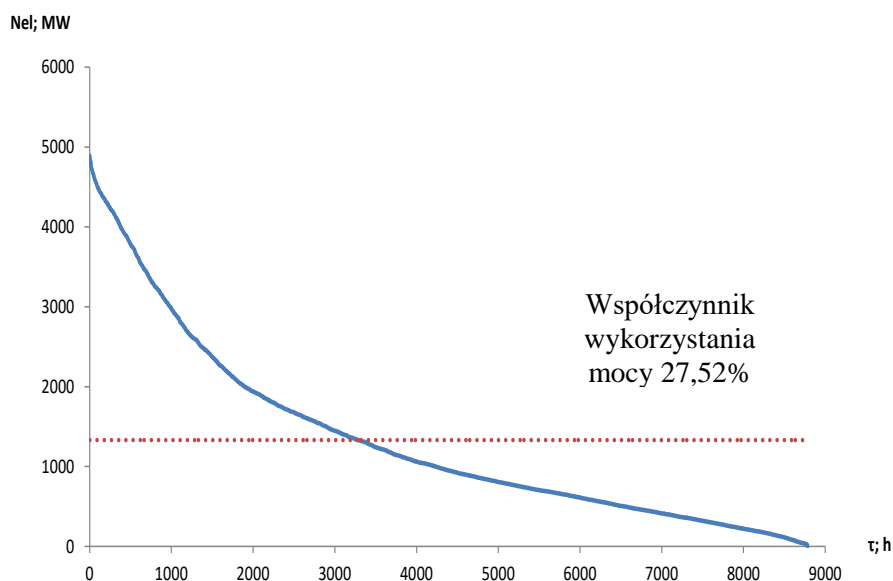
Rysunki 6, 7 i 8 przedstawiają uporządkowane wykresy mocy elektrycznej generowanej przez turbiny wiatrowe w latach 2014, 2015 i 2016. Linia ciągła prezentuje godzinowe obciążenie, a linia przerywana średnie obciążenie.



Rys. 6. Wykres uporządkowany mocy elektrycznej z turbin wiatrowych w 2014 roku



Rys. 7. Wykres uporządkowany mocy elektrycznej z turbin wiatrowych w 2015 roku



Rys. 8. Wykres uporządkowany mocy elektrycznej z turbin wiatrowych w 2016 roku

Wykresy pokazują, że średnie obciążenie z każdym rokiem zwiększa swoją wartość. Odpowiednio wynosi 865,20 MW w 2014 roku, 1 215,54 MW w 2015 roku i 1 331,06 MW w 2016 roku. Również wartość współczynnika wykorzystania mocy rośnie wraz z upływem lat. Można także zauważyć, że przez większość godzin w roku produkcja mocy elektrycznej z turbin wiatrowych ma wartość poniżej średniego obciążenia. Takie zjawisko można zauważyć w każdym przeanalizowanym roku.

4 Metodyka badań

Jak wspomniano wcześniej, do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano dane generacji ze źródeł wiatrowych $N_{el,w}$ oraz bloki konwencjonalne 460 MW, 360 MW i 260 MW. Założono pracę bloków ze zmiennym obciążeniem 40% - 90%, a także ich liczbę nie większą niż 25.

4.1 Algorytm obliczeń

Na początku należało obliczyć ile bloków określonej mocy (z obniżonym obciążeniem) należy wykorzystać, aby zrekompensować wahania generacji energii elektrycznej z turbin wiatrowych.

$$n(\tau) = \frac{\Delta N_{el,w}(\tau)}{N_{el,e}} \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta N_{el,w}(\tau)$ – moc wyprodukowana przez elektrownie wiatrowe, którą muszą odebrać elektrownie konwencjonalne. Obliczana jako różnica między aktualną mocą generowaną z wiatru a minimalną mocą, MW.

$N_{el,e}$ – moc elektrowni konwencjonalnej przy przyjętym obciążeniu, MW.

Do obliczenia jednostkowego zużycia energii chemicznej należy znać wartość sprawności maksymalnej i sprawności przy aktualnym obciążeniu elektrowni konwencjonalnej. W tym celu posłużono się charakterystykami sprawności od obciążenia bloków konwencjonalnych i obliczono jednostkowe zużycie energii chemicznej z następującego wzoru:

$$\Delta e_{ch} = \frac{1}{\eta(x_{akt.})} - \frac{1}{\eta(x_{max})} \quad (3)$$

gdzie:

$\eta(x_{akt.})$ – aktualna sprawność odczytana z charakterystyki elektrowni konwencjonalnej.

$\eta(x_{max})$ – maksymalna sprawność odczytana z charakterystyki elektrowni konwencjonalnej.

$x_{akt.}$ – aktualne obciążenie elektrowni konwencjonalnej.

x_{max} – maksymalne obciążenie elektrowni konwencjonalnej.

Wymagana energia wyjściowa elektrowni konwencjonalnej przy przyjętym obciążeniu:

$$E = N_{el,e} \cdot 3600 \cdot n(\tau), MJ \quad (4)$$

Znając wartość dwóch powyższych wskaźników można obliczyć zużycie energii chemicznej przy użyciu wzoru (5). Jest ona skutkiem dodatkowego zużycia paliwa przez elektrownie konwencjonalne wynikającego z regulacji obciążenia tych bloków.

$$\Delta E_{ch,ind} = \Delta e_{ch} \cdot E, MJ \quad (5)$$

Końcowe obliczenia dotyczą kosztu termo-ekologicznego, który jest sumą dwóch członów:

$$TEC = TEC_{LCA,w} + TEC_{ind} \quad (6)$$

gdzie:

$TEC_{LCA,w}$ – wartość kosztu termo-ekologicznego elektryczności OZE z uwzględnieniem analizy cyklu życiowego, który został przedstawiony w Tabeli 2, MJ/MJ.

TEC_{ind} – indukowany koszt termo-ekologiczny, MJ/MJ. Obliczany z poniższego wzoru:

$$TEC_{ind} = \frac{\Delta E_{ch,ind} \cdot TEC_{węgiel}}{\Delta N_{el,w,MJ}(\tau)} \quad (7)$$

4.2 Przykładowe obliczenia z wybranej godziny

W tej części pracy zaprezentowano obliczenia dla wybranej godziny w roku na podstawie przyjętego algorytmu. Z danych dotyczących generacji mocy elektrycznej ze źródeł wiatrowych udostępnionych przez PSE odczytano, że minimalna wartość mocy generowanej z wiatru wynosi $N_{el,w,min} = 5 MW$, zaś aktualna moc generowana z wiatru wynosi $N_{el,w,akt.} = 3558 MW$.

Odejmując powyższe wartości otrzymuje się wartość mocy wyprodukowanej przez elektrownie wiatrowe:

$$\Delta N_{el,w} = N_{el,w,akt.} - N_{el,w,min} = 3558 - 5 = 3553 MW$$

Do kompensacji mocy generowanej ze źródeł wiatrowych przyjęto blok konwencjonalny o mocy 460 MW pracujący z obciążeniem 50%. Przy takim obciążeniu blok osiąga moc:

$$N_{el,e} = 460 MW \cdot 0,5 = 230 MW$$

Korzystając z zależności (2) obliczono liczbę bloków konwencjonalnych kompensujących moc z elektrowni wiatrowych:

$$n(\tau) = \frac{3553}{230} = 15$$

Znając liczbę bloków, można obliczyć wymaganą energię wyjściową elektrowni konwencjonalnych przy przyjętym obciążeniu z równania (4):

$$E = 230 \cdot 3600 \cdot 15 = 12\,420\,000 \text{ MJ}$$

Z charakterystyki sprawności od obciążenia elektrowni węglowej 460 MW (Rys. 2), odczytano wartości sprawności przy maksymalnym obciążeniu oraz przy założonym 50% obciążeniu:

$$x_{max} = 100\% \rightarrow \eta(x_{max}) = 0,43$$

$$x_{akt.} = 50\% \rightarrow \eta(x_{akt.}) = 0,37$$

Wykorzystując odczytane sprawności, obliczono z (3) jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa:

$$\Delta e_{ch} = \frac{1}{0,37} - \frac{1}{0,43} = 0,377$$

Następnie z zależności (5) obliczono wartość zużycia energii chemicznej paliwa:

$$\Delta E_{ch,ind} = 0,377 \cdot 12\,420\,000 = 4\,682\,340 \text{ MJ}$$

Posiadając wszystkie obliczone powyżej wielkości, można określić wartość indukowanego kosztu termo-ekologicznego z równania (7) oraz końcowy koszt termo-ekologiczny z (6):

$$TEC_{ind} = \frac{4\,682\,340 \cdot 1,12}{12\,790\,800} = 0,41$$

$$TEC = 0,1 + 0,41 = 0,51$$

5 Analiza wyników badań

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione wyniki obliczeń kosztu termo-ekologicznego oceniającego wpływ kompensacji energii elektrycznej produkowanej z turbin wiatrowych przy użyciu bloków konwencjonalnych.

W pierwszym kroku obliczono liczbę poszczególnych bloków konwencjonalnych (w różnych wariantach obciążenia bloku) potrzebnych do zrównoważenia mocy generowanej przez elektrownie wiatrowe. Na tym etapie wystąpił problem w postaci zbyt dużej liczby bloków. Na przykład, do skompensowania 5500 MW wytworzonych z elektrowni wiatrowych należałoby użyć 120 bloków konwencjonalnych o mocy 460 MW pracujących z obciążeniem 90%. W związku z tym przyjęto, że jest nie więcej niż 25 jednostek konwencjonalnych i zmieniało obciążenie bloku tak, aby nie przekroczyć tej liczby.

Następnie okazało się, iż w 2016 roku blok o mocy 260 MW musi pracować z obciążeniem poniżej 40%, aby skompensować losowość generacji mocy z turbin wiatrowych. Z tego względu pominięto ten blok w obliczeniach.

W kolejnym kroku obliczono zużycie energii chemicznej paliwa i koszt termo-ekologiczny dla wszystkich elektrowni konwencjonalnych w różnych wersjach obciążenia z trzech lat.

W Tabeli 4 zostały przedstawione wartości uśrednionego kosztu termo-ekologicznego wszystkich analizowanych elektrowni w każdym wariancie obciążeniowym, zaś w Tabeli 5 zaprezentowano uśrednione wartości dodatkowego zużycia energii chemicznej paliwa.

Tabela 4. Zestawienie uśrednionego TEC dla różnych elektrowni konwencjonalnych z trzech lat

	2014r.			2015r.			2016r.	
Bloki węglowe	460 MW	360 MW	260 MW	460 MW	360 MW	260 MW	460 MW	360 MW
Średni TEC, MJ/MJ	0,655	1,034	0,457	0,653	1,016	0,458	0,647	1,009

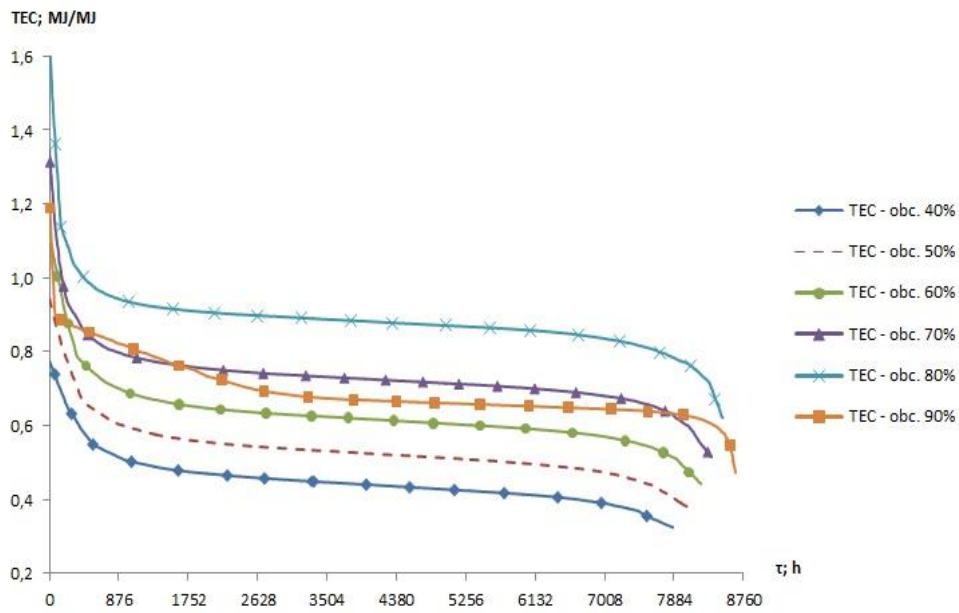
Z powyższej tabeli wynika, iż wartość kosztu termo-ekologicznego utrzymuje ten sam poziom dla poszczególnych elektrowni. Na przykład, dla elektrowni konwencjonalnej o mocy 460 MW wynosi 0,65 w każdym analizowanym roku. Jeżeli uwzględnić tysięczne i dalsze miejsca po przecinku można zauważyć tendencję spadkową wartości TEC wraz z upływem lat.

Tabela 5. Zestawienie uśrednionych wartości zużycia energii chemicznej paliwa dla różnych elektrowni konwencjonalnych z trzech lat

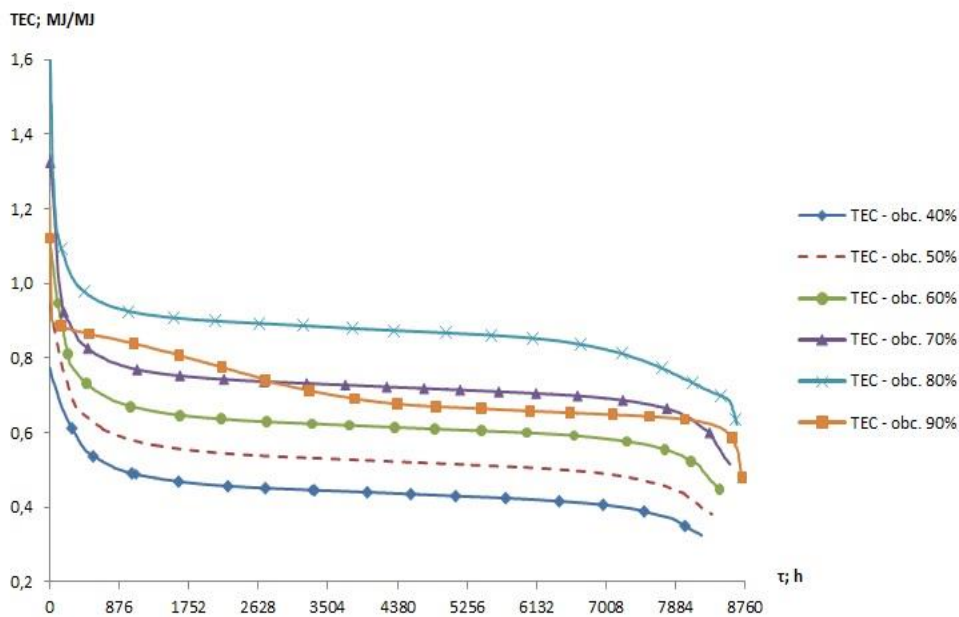
	2014r.			2015r.			2016r.	
Bloki węglowe	460 MW	360 MW	260 MW	460 MW	360 MW	260 MW	460 MW	360 MW
$\Delta E_{ch,ind}$, GJ	1519,4	2474,9	980,8	2130,6	3414,1	1405,9	2295,3	3709,8

Tabela przedstawia, że zużycie energii chemicznej paliwa wzrasta wraz z upływem lat. Wynika z tego, iż losowość wytwarzania energii elektrycznej z elektrowni wiatrowych ma duży wpływ na dodatkowe zużycie paliwa przez elektrownie konwencjonalne. Najwięcej dodatkowego paliwa potrzebują elektrownie o mocy 360 MW, następnie 460 MW i na końcu 260 MW.

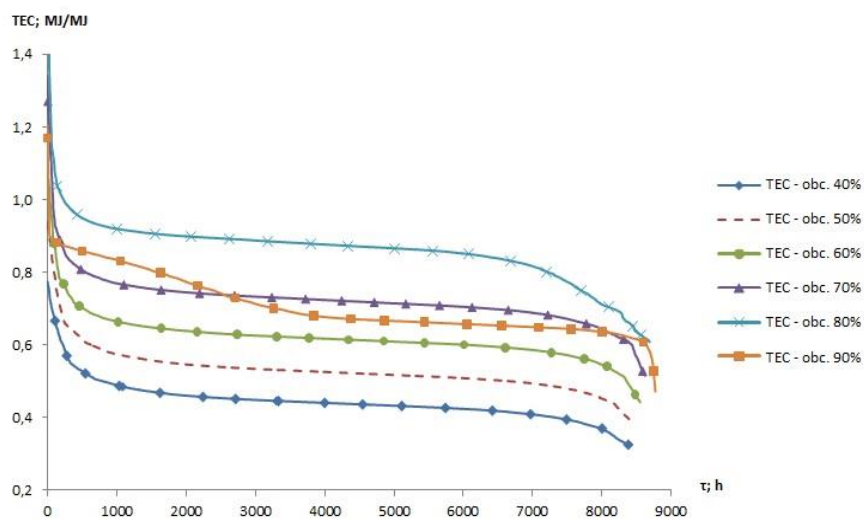
Na rysunkach 9, 10 i 11 został przedstawiony rozkład kosztu termo-ekologicznego z trzech lat z uwzględnieniem różnych wariantów obciążenia elektrowni konwencjonalnych o mocy 460 MW.



Rys. 9. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 460 MW w 2014 roku



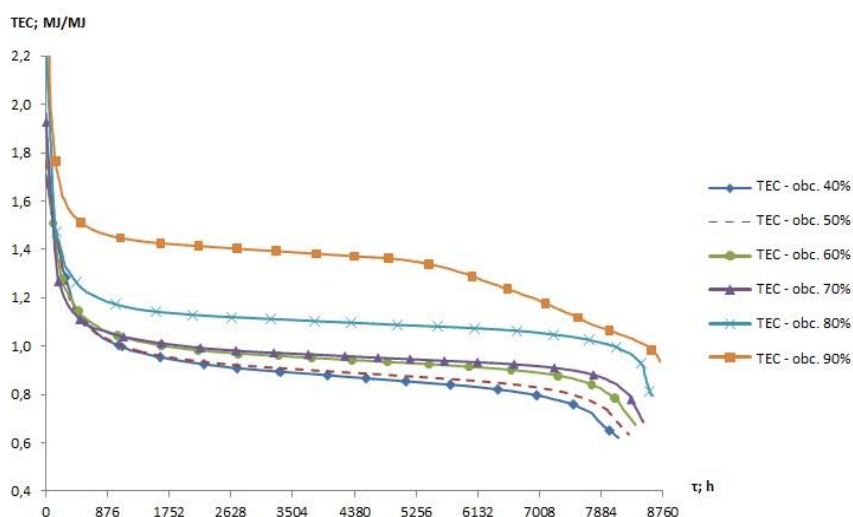
Rys. 10. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 460 MW w 2015 roku



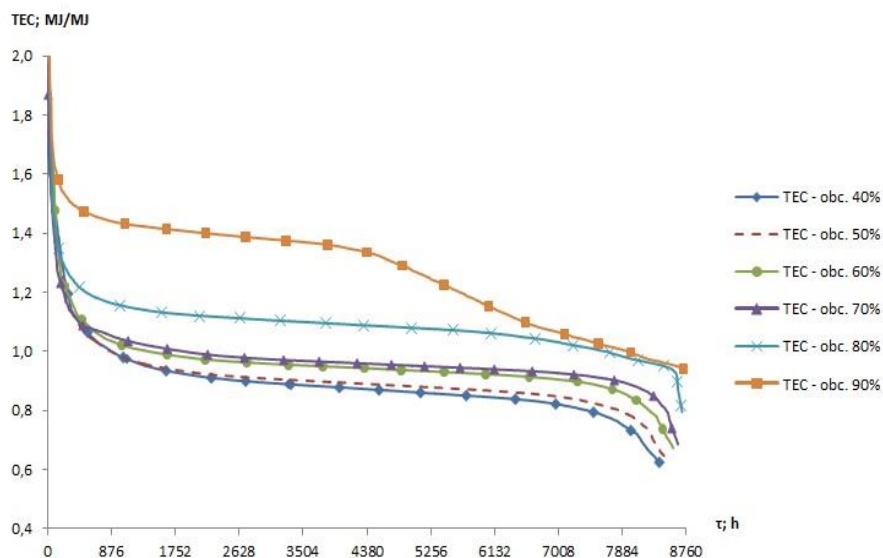
Rys. 11. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 460 MW w 2016 roku

Porównując wykresy można zauważyć, że wartość kosztu termo-ekologicznego nie zmienia się wraz z upływem czasu. Przez większość godzin w roku również utrzymuje swoją wielkość na takim samym poziomie. Patrząc na różne warianty obciążenia bloku widać, że największa wartość TEC ok. 1,0 jest dla obciążenia 80%, a najmniejsza wartość ok. 0,5 dla obciążenia 40%. Widoczna jest tu zależność, że im mniejsze jest obciążenie tym TEC jest mniejszy. Wyjątkiem jest wariant z 90% obciążeniem, wynikający z wcześniej opisanego problemu dotyczącego liczby bloków.

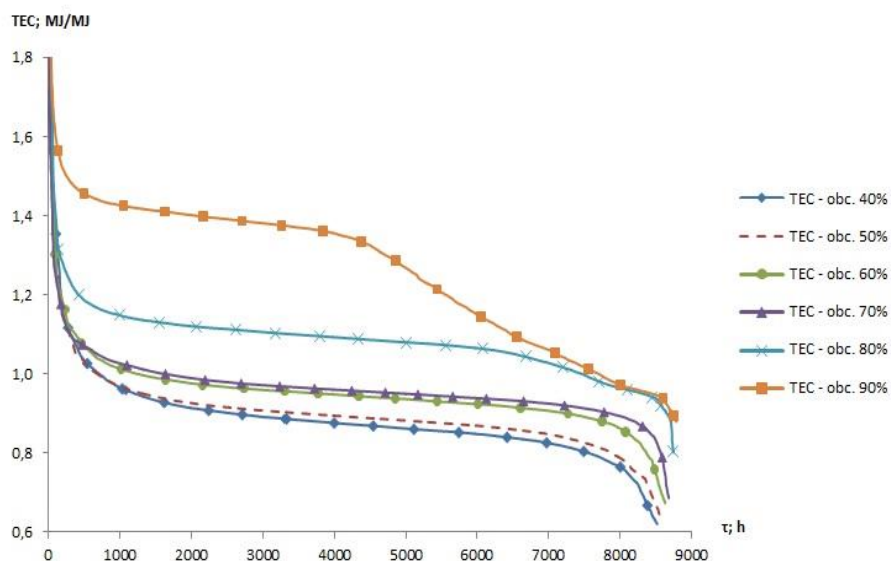
Na kolejnych rysunkach 12, 13 i 14 został przedstawiony rozkład TEC dla elektrowni konwencjonalnych o mocy 360 MW z uwzględnieniem różnych wariantów obciążenia z trzech analizowanych lat.



Rys. 12. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 360 MW w 2014 roku



Rys. 13. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 360 MW w 2015 roku

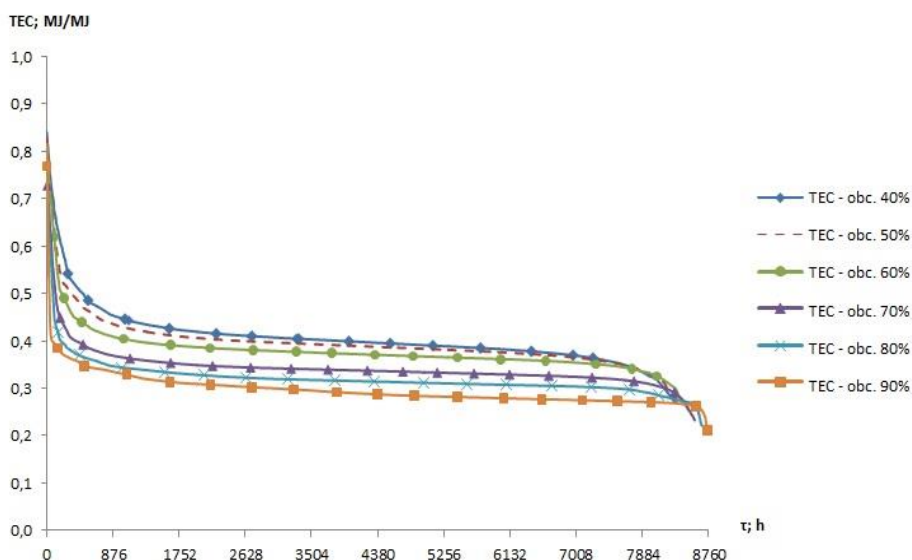


Rys. 14. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 360 MW w 2016 roku

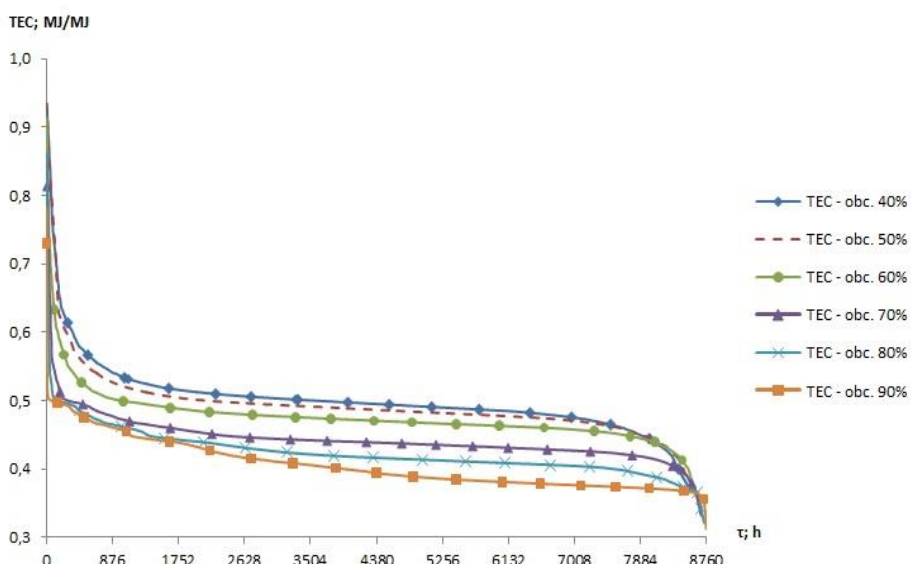
Zestawienie rozkładu kosztu termo-ekologicznego elektrowni konwencjonalnych o mocy 360 MW przedstawia, iż wartość tego wskaźnika nie zmienia się przez trzy lata. Także przez większą część roku utrzymuje swoją wielkość na takim samym poziomie. Odstępstwo można zauważyć przy obciążeniu 90%, do połowy roku utrzymuje stałą wartość ok. 1,5, a następnie zaczyna spadać. Pod koniec 2014 roku wynosi 1,1, pod koniec 2015 roku 1,0, a pod koniec

2016 roku 0,95. Ponadto można zauważyć, że najmniejsza wartość TEC jest przy wariancie 40%, a największa przy wariancie 90%.

Rysunki 15 i 16 przedstawiają rozkład kosztu termo-ekologicznego elektrowni konwencjonalnych o mocy 260 MW wraz z różnymi wersjami obciążenia z trzech analizowanych lat. Tak jak wspomniano we wstępie tego rozdziału, blok ten przelizowano tylko w latach 2014 i 2015.



Rys. 15. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 260 MW w 2014 roku



Rys. 16. Rozkład TEC ze względu na obciążenie elektrowni konwencjonalnych o mocy 260 MW w 2015 roku

Tak jak w poprzednich elektrowniach konwencjonalnych tj. o mocy 460MW i 360 MW można zauważyć, iż wartość kosztu termo-ekologicznego utrzymuje się na takim samym poziomie przez większość godzin w roku. Jednakże wartość wskaźnika jest różna dla roku 2014 i 2015. Na przykład w 2014 roku dla obciążenia 40% wynosi ok. 0,45, gdzie w 2015 roku wynosi już ok. 0,55. Widoczny jest tu trend wzrostowy. Z wykresów wynika, że im mniejsze jest obciążenie, tym większa jest wartość kosztu termo-ekologicznego.

6 Podsumowanie i wnioski

W Polsce największą ilość mocy zainstalowanej w odnawialnych źródłach energii mają elektrownie wiatrowe. W pierwszych latach XXI wieku nastąpił dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej, gdzie w 2005 roku moc zainstalowana wynosiła 83,3 MW, a na koniec roku 2016 wzrosła do ponad 5,5 GW i nadal rośnie. Stało się tak, z uwagi na wiele korzyści na przykład ekologicznych i ekonomicznych, płynących z posiadania tego typu źródła. Jednakże elektrownie wiatrowe zalicza się do tzw. źródeł losowych. Do przyczyn tej losowości można zaliczyć to, że:

- prognozowanie produkcji energii elektrycznej jest trudne ze względu na słabą przewidywalność wiatrów i czasu ich trwania,
- zmienna prędkość wiatru utrudnia generowanie energii o wymaganej częstotliwości sieciowej,
- brak wiatru jest niepożądany, ale jego nadmiar może być jeszcze bardziej niebezpieczny ponieważ przy prędkościach powyżej 25 m/s następuje wyłączenie turbin wiatrowych.

Ta niestabilność generacji energii elektrycznej zaburza pracę systemu energetycznego. Dodatkowym problemem jest to, że zgodnie z prawem odnawialnym źródłem energii przysługuje pierwszeństwo w sieci elektroenergetycznej. Wobec tego do skompensowania wahań wykorzystuje się elektrownie konwencjonalne, których w Polsce jest najwięcej.

W związku z tym przeanalizowano jaki wpływ ma zmienność produkcji energii elektrycznej z turbin wiatrowych w Polsce z trzech ostatnich lat na bloki konwencjonalne o mocy 460 MW, 360 MW i 260 MW. Im większą moc generują elektrownie wiatrowe, z tym mniejszą mocą muszą pracować bloki konwencjonalne. Ma to bezpośredni wpływ na ich sprawność ponieważ nie pracują wtedy ze sprawnością nominalną, która gwarantuje najlepsze warunki pracy dla danego bloku. Z malejącą sprawnością bloków zmniejsza się ich efektywność i zwiększa zapotrzebowanie na paliwo (większe jednostkowe zużycie energii chemicznej paliwa). Z tego względu do atmosfery uwalniane są większe ilości zanieczyszczeń, co ma negatywny wpływ na środowisko. Z ekonomicznego punktu widzenia zwiększają się koszty wytwarzania energii elektrycznej, gdyż należy kupić więcej paliwa. Z tego wynika, iż najefektywniejszym sposobem pracy bloków konwencjonalnych jest praca przy sprawności nominalnej i nie powinny one kompensować zmiennych zachowań turbin wiatrowych.

W związku z tym należy wprowadzić inne rozwiązania wykorzystania losowości energii elektrycznej z elektrowni wiatrowych. Takim sposobem jest magazynowanie energii

wiatrowej. W wielu krajach (np. Danii) podstawą bilansowania są elektrownie wodne i szczytowo-pompowe. Kolejnym ze sposobów magazynowania energii są systemy CAES (ang. Compressed Air Energy Storage). Jest to technologia polegająca na magazynowaniu sprężonego powietrza w zbiornikach podziemnych, a następnie w szczycie energetycznym rozprężenie powietrza, którym zasilana jest typowa turbina gazowa. Z kolei w Niemczech opracowano przemysłową metodę produkcji wodoru z wykorzystaniem energii wiatrowej, który następnie trafia do sieci gazu ziemnego. W przyszłości dobrym rozwiązaniem może się okazać wykorzystywanie energii wiatrowej do ładowania akumulatorów pojazdów elektrycznych.

Literatura

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.
- [2] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne.
- [3] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii.
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
- [5] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej – Bilansowanie systemu i zarządzanie ograniczeniami systemowymi (tekst jednolity obowiązujący od 1 stycznia 2016), Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A., Warszawa 2015.
- [6] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (tekst jednolity obowiązujący od dnia 01 lipca 2015), Energa – Operator S.A., 2014.
- [7] Szargut J., Egzergia. Poradnik obliczania i stosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
- [8] Stanek W., Czarnowska L., Gazda W., Thermo-ecological cost of electricity from renewable Energy sources, 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2016, Katowice 14-16 września 2016
- [9] Stanek W., Mendecka B., Lombardi L., Environmental assessment of the wind turbine systems based on thermo-ecological cost, 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering CPOTE 2016, Katowice 14-16 września 2016
- [10] Miller A., Bućko P., Analiza wpływu generacji wiatrowej na cenę rozliczeniową odchylenia na rynku bilansującym w Polsce, Zeszyty Naukowe Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 47, Gdańsk 2015.
- [11] Badyda K., Energetyka wiatrowa. Aktualne trendy rozwoju w Polsce, Energetyka, 2013.
- [12] Radziejewicz W., Rozprawa doktorska: Modelowanie elektrowni wiatrowej w systemie elektroenergetycznym w otoczeniu rynkowym, Politechnika Opolska, Opole 2009.
- [13] Głogowski M., Sprawność bloków nadkrytycznych a ekspansja niestabilnych źródeł energii, energia Gigawat, 2-3/2016.

- [14] PSEW, Raport: Stan energetyki wiatrowej w Polsce w 2015 roku, Dom Poligraficzno Reklamowy, 2016.
- [15] Stanek W., Materiały dydaktyczne dla przedmiotu „Podstawy Gospodarki Energetycznej”, POKL.04.01.02-00-130/12
- [16] PSE S.A. Generacja źródeł wiatrowych,
http://www.pse.pl/index.php?modul=21&id_rap=24.

Thermo-ecological cost of electricity generation from wind power plants in Poland

Agnieszka Ziniewicz

Key words: thermo-ecological cost, wind power, the randomness of electricity generation

Abstract

The theme of this thesis is to analyze the impact of the variability of electricity generation from wind power plants in Poland of three selected years on conventional blocks with power 460 MW, 360 MW and 260 MW. Theoretical part of the work describes the characteristics of wind energy in Poland and the concept of thermo-ecological cost (TEC) is explained. Then a calculation procedure of the thermo-ecological cost of electricity generation from wind power along with an example were presented. The main part of the work is the presentation and evaluation of the obtained results. Carried out calculations confirm that the random generation of wind energy has a significant impact on the work of the individual conventional blocks.