

Słoneczno-wiatrowe układy hybrydowe, jako alternatywne rozwiązanie dla tradycyjnych agregatów prądotwórczych

Streszczenie. W artykule poruszono kwestię możliwości zastąpienia tradycyjnych generatorów prądotwórczych układami hybrydowymi wykorzystującymi energię: promieniowania słonecznego oraz wiatru. W oparciu o zbudowany matematyczny model symulacyjny wykonano analizę pod kątem zarówno aspektu środowiskowego, jak i niezawodnościowego obu alternatywnych rozwiązań. Uzyskane wyniki wskazują, że układy hybrydowe w wybranych warunkach mogą ograniczyć emisję substancji szkodliwych, zapewniając jednocześnie określony poziom niezawodności zasilania.

Abstract. The paper investigates the possibility of replacing the traditional diesel generators by renewable hybrid energy sources utilizing the Sun and wind energy. Based on the formulated mathematical model an economic, environmental and reliability analysis has been conducted. The obtained results indicate that the hybrid energy source might have smaller environmental impact whilst satisfying the energy needs. (*Solar-wind hybrid energy sources as an alternative for a traditional diesel generator*).

Słowa kluczowe: układy hybrydowe, środowisko, niezawodność.

Keywords: hybrid energy sources, environment, reliability.

Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach znaczący wzrost udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w strukturach wytwórczych systemów energetycznych poszczególnych krajów jest wynikiem przede wszystkim: systematycznie malejącego kosztu pozyskania z nich energii [1]; rosnącej sprawności konwersji energii pierwotnej np. w oparciu o efekt fotowoltaiczny [2]; czy też ustaleń międzynarodowych mających na celu ograniczenie wpływu działalności człowieka na zmiany klimatyczne [3]. Wprawdzie w skali globalnej udział OZE w pokrywaniu zapotrzebowania na energię jest stosunkowo niewielki, to w ramach wybranych krajów lub regionów stają się one jedynym źródłem zasilania [4]. Należy jednak zaznaczyć, iż wyniki prowadzonych badań [5,6] wskazują, iż możliwe jest pokrycie potrzeb energetycznych gospodarki światowej w oparciu o dostępne zasoby energii wód płynących, wiatru oraz Słońca.

Wspomniane powyżej czynniki prowadzą do sytuacji, w której źródła odnawialne realizują coraz więcej zadań, które dotychczas były wyłączną domeną energetyki konwencjonalnej i nie dotyczy to wyłącznie obszarów odległych od terenów zurbanizowanych [7], gdzie rozwiązania w oparciu o OZE już w latach 1970 okazały się konkurencyjne w stosunku do tych oferowanych, np. przez generatory diesla [8]. Jednak ze względu na charakterystyki pracy poszczególnych źródeł odnawialnych ich integracja do krajowych systemów energetycznych (KSE) jest procesem złożonym i wymaga dogłębnych analiz i szczegółowego planowania [9], które niekoniecznie powinno zakładać wykorzystanie źródeł o najniższym koszcie wytworzenia energii.

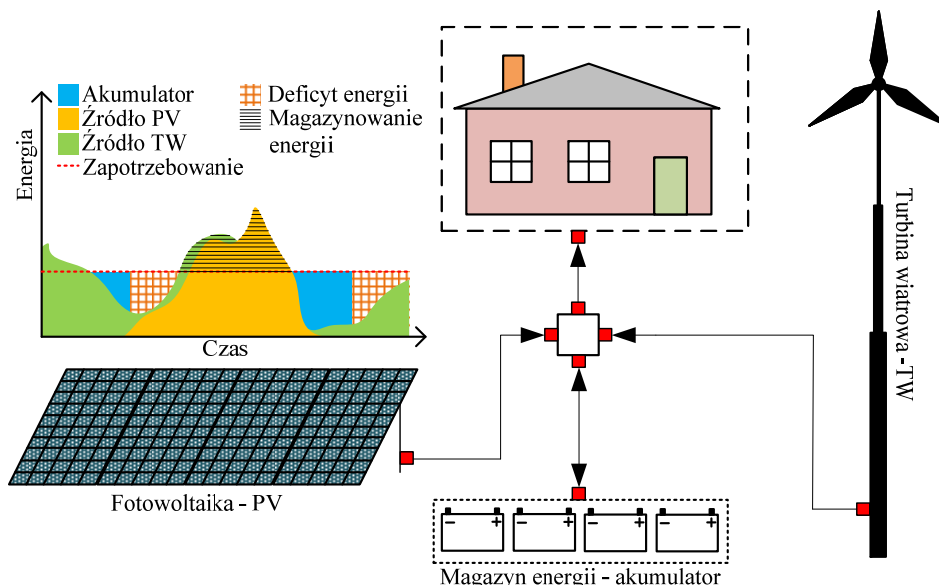
Jedną z głównych wad źródeł generacji słonecznej oraz wiatrowej jest ich niedyspozycyjność oraz zmienność uzysku energii w czasie. Sterowanie ich pracą ma charakter zero-jedynkowy, dlatego jednym z proponowanych rozwiązań jest prognozowanie uzysku energii z tych źródeł. Prowadzone badania wykazują znaczący postęp w tej dziedzinie zarówno dla fotowoltaiki [10], jak i turbin wiatrowych [11,12]. Jednak sama wiedza, że w przeciągu następnych godzin będzie dostępna określona wielkość energii elektrycznej nie jest wystarczająca, np. w wypadku układów autonomicznych, ponieważ funkcją celu jest pokrycie występującego zapotrzebowania. W tym celu proponuje się najczęściej by takie układy były wyposażone w różnego rodzaju magazyny energii [13]. Alternatywne podejście sugeruje by wykorzystywać źródła cechujące się

silną komplementarnością czasową, tzn. gdy ustaje lub spada wielkość energii generowanej przez źródło A, do pracy wkracza źródło B. Komplementarność ta oceniana jest najczęściej w oparciu o współczynnik korelacji pomiędzy szeregami czasowymi (z różnym krokiem) uzysku energii badanych źródeł [14]. Badania przeprowadzone dla wytypowanych lokalizacji na terenie Polski [15-17] wskazują w szczególności na częściową komplementarność źródeł słonecznych i wiatrowych oraz mniej istotną dla hydrogeneracji.

Połączenie koncepcji magazynowania energii oraz wykorzystania czasowej komplementarności różnych źródeł energii stało się przyczynkiem do rozwoju tak zwanych układów hybrydowych. Są one przedmiotem licznych analiz zarówno na łamach publikacji międzynarodowych [18], jak i krajowych [19]. Nie można tu przytoczyć wszystkich publikacji, warto jednak zaznaczyć, iż obecne kierunki prac koncentrują się głównie na wielokryterialnej optymalizacji parametrów takich układów oraz ich potencjalnej roli w KSE [20]. Należy ponadto zaznaczyć, iż generacja słoneczna może w przyszłym systemie elektroenergetycznym odegrać istotną rolę ze względu na coraz silniejszy wpływ dodatnich temperatur na rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną co było przedmiotem badań w pracach [21-23]. Przedstawione w poniższym artykule rozważania są częściowo oparte o model matematyczny zaprezentowany w [24], który tutaj rozbudowano o aspekty środowiskowe oraz niezawodnościowe.

Opis problemu

Zasilanie odbiorników wykorzystywanych na obszarach położonych z dala od siedzib ludzkich lub linii przesyłowych wymaga stosowania indywidualnych źródeł energii elektrycznej. Sytuacją, w której również dąży się do uzyskania wysokiego poziomu niezawodności zasilania w energię elektryczną są odbiorniki w postaci: systemów alarmowych, elementów infrastruktury szpitalnej podtrzymującej życie pacjentów, czy też np. specjalne lodówki na szczepionki w rejonach około zwrotnikowych. Powszechnie stosowane tam generatory prądotwórcze, wymagają transportu paliwa, które niejednokrotnie pozyskiwane jest w miejscach odległych o setki kilometrów. Tym samym źródła te nie są w stanie wykorzystywać lokalnie dostępnych zasobów energii i przyczyniają do rosnącego poziomu zawartości dwutlenku węgla w atmosferze. Strukturę takiego układu przedstawiono na Rys.1.



Rys.1. Struktura układu hybrydowego, wraz ze zwrotami przepływu energii i przykładowym przebiegiem dobowego pokrycia zapotrzebowania

Model matematyczny

W analizowanym układzie hybrydowym można wyróżnić dwa niesterowalne źródła energii jakimi są: instalacja fotowoltaiczna (PV) oraz turbina wiatrowa (TW). Mogą one bezpośrednio zasilać odbiornik w energię elektryczną, jednak ze względu na często występującą rozbieżność czasową podaży i popytu energii, układ wyposażono w magazyn energii w postaci akumulatora. Ze względu na aspekt ekonomiczny przyjęto, iż niedopuszczalne jest tak zwane głębokie rozładowanie akumulatora. Ponadto założono, iż niemożliwe jest pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną w oparciu tylko o energię z sieci elektroenergetycznej, jak również przesłanie do niej nadwyżek powstających z generacji PV oraz TW, które nie mogły zostać zmagazynowane w akumulatorze. Dla tak przyjętych założeń analizowany układ będzie miał charakter autonomicznego źródła energii. Symulację oraz optymalizację parametrów takiego układu przeprowadzono w oparciu o zaprezentowany poniżej dyskretny model matematyczny.

Pierwszym krokiem w obliczeniach jest ustalenie wielkości energii generowanej przez źródła PV oraz TW, co można określić w oparciu o równania (1) oraz (2).

$$(1) \quad E_{i,j}^{PV} = \frac{H_{i,j} \eta^{PV} P^{PV}}{G^{STC}}$$

gdzie: i - kolejny dzień w roku, j - godzina w ciągu doby, $E_{i,j}^{PV}$ - uzysk energii z instalacji PV [kWh], $H_{i,j}$ - nasłonecznienie [kWh/m²], η^{PV} - sprawność całkowita instalacji PV [%], P^{PV} - moc znamionowa instalacji PV [kW], G^{STC} - natężenie promieniowania słonecznego w warunkach testowych [kW/m²].

$$(2) \quad E_{i,j}^{TW} = \begin{cases} 0 & \text{dla } v_{i,j} \in (0, v_1) \cup (v_3, \infty) \\ n P^{TW} t & \text{dla } v_{i,j} \in \langle v_2, v_3 \rangle \\ nf(P^{TW})t & \text{inaczej} \end{cases}$$

gdzie: $E_{i,j}^{TW}$ - uzysk energii z TW [kWh], $v_{i,j}$ - prędkość wiatru [m/s], v_1 - prędkość startowa dla TW [m/s], v_3 - prędkość graniczna pracy TW [m/s], P^{TW} - moc znamionowa TW [kW], t - czas [h], v_2 - prędkość wiatru, dla której TW osiąga swoją moc znamionową, $f(P^{TW})$ - wielomian aproksymujący moc osiąganą TW [kW], n - liczba turbin wiatrowych [-].

Energia z generacji PV oraz TW może zostać bezpośrednio wykorzystana na pokrycie zapotrzebowania, dlatego konieczne staje się obliczenie bilansu energetycznego na poziomie PV, TW → obciążenie, co można uczynić w oparciu o następujący wzór:

$$(3) \quad E_{i,j}^B = E_{i,j}^{PV} + E_{i,j}^{TW} - E_{i,j}^Z$$

gdzie: $E_{i,j}^B$ - bilans energetyczny [kWh], $E_{i,j}^Z$ - zapotrzebowanie na energię elektryczną [kWh].

Należy zaznaczyć, że gdy $E_{i,j}^B > 0$ to wystąpiła nadwyżka energii, natomiast jeżeli $E_{i,j}^B < 0$ to układ PV - TW nie pokrył chwilowego zapotrzebowania w całości. Sytuacja gdy $E_{i,j}^B = 0$ jest znacznie rzadsza i oznacza, że popyt na energię był równy podaży. Reasumując, obliczenie bilansu energetycznego pozwala na dalsze określenie kierunku oraz wielkości przepływu energii elektrycznej. W tym celu wprowadza się zmienną binarną $x_{i,j}^I$, której wartość wyznacza się w oparciu o równanie (4).

$$(4) \quad x_{i,j}^I = \begin{cases} 1 & \text{dla } E_{i,j}^B > 0 \\ 0 & \text{inaczej} \end{cases}$$

W celu wyznaczenia stanu wielkości energii zgromadzonej w akumulatorze posłużono się podejściem zaproponowanym przez [26], które zmodyfikowano tak, by odpowiadało to przyjętym w poniższym modelu założeniom oraz oznaczeniom. Energię zgromadzoną w akumulatorze oblicza się w oparciu o równanie (5).

$$(5) \quad E_{i,j}^{Bat} = \min(E_{i,j-1}^{Bat} + \eta^C E_{i,j}^B; E^{BatM}) x_{i,j}^I + \max(E_{i,j-1}^{Bat} + 1/\eta^D E_{i,j}^B; \delta E^{BatM})(1 - x_{i,j}^I)$$

gdzie: $E_{i,j}^{Bat}$ - energia zgromadzona w akumulatorze [kWh], η^C - sprawność ładowania akumulatora [%], E^{BatM} - nominalna pojemność energetyczna akumulatora [kWh], η^D - sprawność rozładowywania akumulatora, δ - maksymalny dopuszczalny stopień rozładowania akumulatora [%].

Generacja źródeł PV i TW z reguły nie pokrywa się z występującym zapotrzebowaniem na energię elektryczną.

Co więcej ograniczona pojemność magazynu energii powoduje, iż w układzie występować mogą nadwyżki energii. Wielkość nadwyżek energii z PV ($E_{i,j}^{N,PV}$) oraz TW ($E_{i,j}^{N,TW}$) można określić w oparciu o równania (7) oraz (8) i równanie (6), wyznaczające wartość pomocniczej zmiennej binarnej $x_{i,j}^I$. Przyjęto, iż wartość nadwyżki energii z poszczególnego źródła wyznacza się proporcjonalnie do jego udziału w sumie wygenerowanej energii z obu źródeł – za co odpowiada pierwszy ułamek znajdujący się w równaniach (7) i (8).

$$(6) \quad x_{i,j}^I = \begin{cases} 1 & \text{dla } E_{i,j}^{Bat} = E^{BatM} \\ 0 & \text{inaczej} \end{cases}$$

$$(7) \quad E_{i,j}^{N,PV} = \left[\frac{E_{i,j}^{PV}}{E_{i,j}^{PV} + E_{i,j}^{TW}} \left[E_{i,j}^B - (E^{BatM} - E_{i,j-1}^{Bat}) \frac{1}{\eta^c} \right] x_{i,j}^I \right]$$

$$(8) \quad E_{i,j}^{N,TW} = \left[\frac{E_{i,j}^{TW}}{E_{i,j}^{PV} + E_{i,j}^{TW}} \left[E_{i,j}^B - (E^{BatM} - E_{i,j-1}^{Bat}) \frac{1}{\eta^c} \right] x_{i,j}^I \right]$$

Natomiast udział magazynu energii w pokrywaniu zapotrzebowania można wyznaczyć w oparciu o równanie (9),

$$(9) \quad E_{i,j}^{D,Bat} = [E_{i,j-1}^{Bat} - \max(E_{i,j-1}^{Bat} + E_{i,j}^B; \delta E^{BatM})] x_{i,j}^I$$

Energię z instalacji PV ($E_{i,j}^{D,PV}$) oraz TW ($E_{i,j}^{D,TW}$) wykorzystaną na pokrycie zapotrzebowania bieżącego lub zmagazynowaną oblicza się w oparciu o równania,

$$(10) \quad E_{i,j}^{D,PV} = E_{i,j}^{PV} - E_{i,j}^{N,PV}$$

$$(11) \quad E_{i,j}^{D,TW} = E_{i,j}^{TW} - E_{i,j}^{N,TW}$$

Wpływ proponowanego układu na środowisko naturalne ocenia się w oparciu o równanie,

$$(12) \quad S = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (I^{PV} E_{i,j}^{PV}) + I^{Bat} E^{BatM} + I^{TW} n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{i,j}^{PV} + E_{i,j}^{TW})}$$

gdzie: S – wpływ na środowisko naturalne liczony jako [kg CO₂/kWh], I^{PV} – emisje CO₂ z instalacji PV [kg CO₂/kWh], I^{TW} - emisje CO₂ z instalacji TW [kg CO₂/kWh], I^{Bat} - emisje CO₂ z instalacji PV [kg CO₂/kWh] w przeliczeniu na kWh pojemności akumulatora.

Niezawodność zasilania w energię elektryczną obliczono w oparciu o *Prawdopodobieństwo Utraty Zasilania* (ang. Loss of Load Probability – LOLP). W celu wyznaczenia tego parametru wprowadzono dodatkową zmienną – deficyt energii ($E_{i,j}^{Def}$), obliczaną w oparciu o równanie (13),

$$(13) \quad E_{i,j}^{Def} = |E_{i,j}^B - E_{i,j}^{D,Bat}| (1 - x_{i,j}^I)$$

$$(14) \quad LOLP = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{i,j}^{Def}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{i,j}^B} * 100\%$$

Problem optymalizacyjny

W rozważaniach przyjęto, iż celem zadania optymalizacyjnego jest takie dobranie parametrów układu hybrydowego, tj. mocy zainstalowanej w PV, liczby turbin wiatrowych oraz pojemności akumulatora, by zminimalizować wpływ układu na środowisko (15), przy jednoczesnym spełnieniu nałożonych ograniczeń w postaci maksymalnej wartości prawdopodobieństwa utraty zasilania (16) oraz wielkości nadwyżek energii z PV oraz TW w stosunku do całkowitego uzysku energii z tych źródeł (17).

Funkcja celu:

$$(15) \quad \min Z = S$$

Przy ograniczeniach:

$$(16) \quad LOLP \leq \beta$$

$$(17) \quad \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{i,j}^{N,TW} + E_{i,j}^{N,PV})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{i,j}^{PV} + E_{i,j}^{TW})} \leq \gamma$$

Dane wejściowe

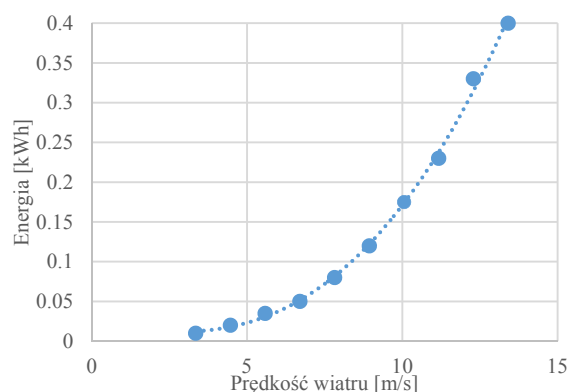
Na potrzeby symulacji wykorzystano godzinowy szereg czasowy prędkości wiatru pozyskany z IMGW – PIB oraz w wypadku wystąpienia braków uzupełniono go pomiarami satelitarnymi, które można pobrać z <https://gs6101-gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>. Natomiast szereg czasowy wartości nasłonecznienia pobrano z <http://atmosphere.copernicus.eu/>. W założeniach przyjęto, iż zasilany odbiornik będzie cechował się stałym poborem energii elektrycznej na poziomie 9.6 kWh dziennie.

Symulację generacji źródła wiatrowego oparto o krzywą pracy turbiny AIR X 400 [25] o maksymalnej mocy osiągniętej 400W. Prędkość startowa takiej turbiny to 3 m/s, natomiast moc znamionowa osiągnięta jest przy prędkości 12,5 m/s. Krzywą mocy oraz odpowiadający jej wielomian trzeciego stopnia zaprezentowano na Rys. 2.

Ponadto założono, iż sprawność całkowita systemu PV wynosi 80%, a sprawność cyklu ładowania i rozładowywania akumulatora litowo jonowego jest na poziomie 81% (odpowiednio $\eta^c=90\%$, $\eta^D=90\%$). Dopuszczalny poziom rozładowania baterii to 50%, $\delta = 0,5$.

$$y = 0.0001x^3 + 0.0013x^2 - 0.0108x + 0.0297$$

$$R^2 = 0.9978$$



Rys. 2. Krzywa pracy turbiny wiatrowej [25] o mocy znamionowej 400 W w przedziale prędkości (v_2, v_3)

Emisje utożsamiane z poszczególnymi źródłami energii przedstawiono w Tab. 1. W przypadku fotowoltaiki podano emisję przypadającą na każdą kWh energii wygenerowanej w ujęciu całego cyklu życia dla warunków nasłonecznienia charakterystycznych dla Polski. Podobnie uczyniono w przypadku turbiny wiatrowej, jednakże dostępne dane wskazywały na emisje powstające niezależnie od miejsca użytkowania turbiny wiatrowej tj. warunków wietrzności. W przypadku baterii litowo-jonowej przyjęto emisję przypadającą na kWh pojemności takiej baterii.

Tab. 1. Wpływ na środowisko naturalne – emisja CO₂

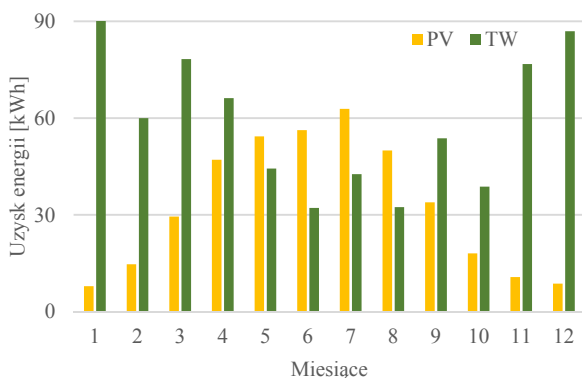
Źródło	Emisja	Jednostka
Fotowoltaika	0,048 [30]	kg CO ₂ /kWh
Turbina wiatrowa	270 [28]	kg CO ₂ /sztukę
Krajowy System Energetyczny	0,81 [27]	kg CO ₂ /kWh
Generator Diesla	0.778 [28]	kg CO ₂ /kWh
Bateria litowo-jonowa	140 [29]	kg CO ₂ /kWh pojemności

Scenariusze

W ramach wykonywania optymalizacji mocy zainstalowanej poszczególnych elementów układu hybrydowego przyjęto następujące wartości ograniczeń: dopuszczalne prawdopodobieństwo wystąpienia braku zasilania (LOLP) równe 10%, 1%, oraz 0,1%, co oznacza, że β wyniesie odpowiednio: 0,1; 0,01; oraz 0,001. Ponadto założono, iż maksymalna dopuszczalna nadwyżka energii z PV oraz TW nie przekroczy 0%, 1%, 5%, 10% oraz 100%, co przekłada się na parametr γ równy odpowiednio: 0; 0,01; 0,05; 0,1 oraz 1. Należy zaznaczyć, iż w tych rozważaniach każdą jednostkę energii uznaną za nadwyżkę, traktuje się jako stratę przy czym przekłada się ona bezpośrednio na wzrost emisji. Reasumując, przyjęte ograniczenia determinują fakt, iż optymalizację przeprowadzono dla 15 różnych scenariuszy ograniczeń.

Dyskusja wyników

Dla wprowadzonych do modelu szeregów czasowych średnia godzinowa wielkość energii generowanej z turbiny wiatrowej o mocy znamionowej 400W była na poziomie 0,084 kWh, z odchyleniem standardowym na poziomie 0,11 kWh. W wypadku instalacji PV o takiej samej mocy, wartości te były równe odpowiednio 0,045 kWh oraz 0,073 kWh. Źródła te nie wykazywały istotnej komplementarności czasowej w ujęciu godzinowym oraz sum dobowych, natomiast z punktu widzenia sum miesięcznych wartość współczynnika korelacji była na poziomie: -0,693 – co wskazuje na istnienie pewnej zdolności do uzupełniania się tych źródeł. Na Rys. 3 przedstawiono roczny przebieg zmienności generacji PV oraz TW w ujęciu miesięcznym.



Rys. 3. Średni miesięczny uzysk energii dla instalacji PV i TW, obu o mocy znamionowej 400 W

Rozwiązania optymalne dla założonych scenariuszu uzyskano w oparciu o narzędzie Solver oraz dostępną w nim metodę optymalizacji modeli nieliniowych zwaną uogólnionym zmniejszeniem gradientu (ang. GRG – Generalized Reduced Gradient) przy domyślnych ustawieniach Solvera oraz dopuszczalnym czasie poszukiwania rozwiązania dopuszczalnego na poziomie 3600 sekund.

W Tab. 2 zestawiono parametry układu hybrydowego dla optymalnych rozwiązań, które spełniały przyjęte w pracy ograniczenia. Znakiem X zaznaczono scenariusze, w których przyjęte wartości ograniczeń nie pozwoliły na znalezienie dopuszczalnego rozwiązania optymalnego. Jak widać, obserwowane w wytypowanej lokalizacji warunki wietrzności oraz nasłonecznienia nie są sprzyjające by uzyskać wysoką niezawodność układu hybrydowego pod kątem zasilania odbiornika w energię elektryczną. Dopuszczalne rozwiązanie dla wartość LOLP = 0,1% znaleziono wyłącznie w sytuacji, gdy dopuszczono

powstawanie znacznych nadwyżek energii elektrycznej. W efekcie parametry układu, a w szczególności moc zainstalowana w PV oraz TW zostały znacząco przewymiarowane. W efekcie ponad 75% energii wygenerowanej w turbinach wiatrowych traktowane było jako strata, a blisko 90% w wypadku generacji PV.

Należy zauważyć, iż dopuszczenie wystąpienia nadwyżek energii, zasadniczo doprowadzało do zmniejszenia wymaganej pojemności całkowitej magazynu energii w postaci akumulatora. Rozważając najmniej konserwatywną grupę scenariuszy, która dopuszczała 10% prawdopodobieństwo utraty zasilania widzimy, iż w sytuacji kiedy niedopuszczalne są nadwyżki energii ($\gamma = 0$) pojemność akumulatora wynosi blisko 280 kWh. Oznacza to, że gdy jest on w pełni naładowany, to bez przekraczania dozwolonego poziomu rozładowania jest w stanie pokryć występujące zapotrzebowanie przez okres 13 dni. Jednakże gdy dopuści się wystąpienie nadwyżek energii np. na poziomie 10% wygenerowanej wielkości energii z poszczególnych źródeł, to możliwe jest blisko czterokrotne zmniejszenie pojemności magazynu energii.

Tab. 2. Konfiguracja układu hybrydowego, PV [kW], TW [liczba jednostek o mocy 400 [W], akumulator (Akku) pojemność w [kWh]

β	LOLP								
	10%			1%			0,1%		
γ * 100%	PV	TW	Akku	PV	TW	Akku	PV	TW	Akku
0	1.22	3	279	1.61	3	440		X	
0,01	1.48	3	256	1.63	3	427		X	
0,05	2.42	2	163	1.09	4	368		X	
0,1	2.76	2	76	1.29	4	232		X	
1	10	17	0	23	34	2.14	16.9	10	10.4

Tabela 3. Emisja kg CO₂ w przeliczeniu na kWh zapotrzebowania

Nadwyżka energii	LOLP			
	0	10%	1%	0,1%
0	1.145	1.794		X
0,01	1.058	1.741		X
0,05	0.694	1.500		X
0,1	0.350	0.964		X
1	0.200	0.450		0.308

Parametry analizowanego układu (tj. moc zainstalowana w PV oraz TW, jak i pojemność akumulatora) bezpośrednio przekładają się na wpływ takiego układu na środowisko naturalne. W Tab. 3 zawarto informację o powstających emisjach dwutlenku węgla na każdą kWh zapotrzebowania na energię elektryczną, które wystąpiło w analizowanym okresie. Założono, iż czas trwania projektu to 20 lat i w jego czasie należy jednokrotnie wymienić baterie akumulatorów. Jak widać scenariusze, które cechują się stosunkowo niewielką pojemnością akumulatorów jednocześnie przyczyniają się do powstawania emisji o znacznie niższym poziomie, niż w sytuacji gdyby zapotrzebowania pokrywano w oparciu o spaliny generator prądotwórczy lub też krajowy system elektroenergetyczny. W scenariuszach, które dopuszczały znaczące nadwyżki energii, na poziomie 100% generacji danego źródła, emisja CO₂ była znacząco niższa. Kluczową rolę w strukturze emisji odgrywał magazyn energii. Jak pokazuje przytoczona w Tabeli 1 literatura [29] baterie tego typu nie przyczyniają się do emisji w trakcie ich użytkowania, jednakże proces ich produkcji, a w szczególności pozyskiwania metali wchodzących w ich skład jest wysoce energochłonny. Jak można zaobserwować w tabeli 3 zasadniczo analizowany układ hybrydowy typu PV-TW-akumulator może przyczynić się do zmniejszenia emisji CO₂ w przeliczeniu na kWh zużytej energii elektrycznej, ale wyłącznie w wypadku kiedy dopuści się sytuację wystąpienia pewnych nadwyżek

energii. Jest to stwierdzenie również prawdziwe w wypadku, gdy wielkość nadwyżek przekracza 70% energii generowanej w danym źródle (ostatni wiersz tabeli 3). Należy mieć jednak na uwadze, iż energii ta w wypadku układu autonomicznego bez przyłącza sieciowego jest bezpowrotnie tracona.

Wnioski

Przedstawione w powyższym artykule rozważania są pierwszym etapem prac nad kompleksową ekonomiczno, środowiskowo, niezawodnościową oceną funkcjonowania małych układów hybrydowych w kontekście polskiego systemu elektroenergetycznego. W artykule, poddano analizie typowy układ składający się z małej turbiny wiatrowej, baterii litowo-jonowej oraz instalacji PV. Symulację jego pracy oparto o własny model matematyczny oraz zaproponowany problem optymalizacyjny. Wstępne wyniki sugerują, iż taki układ może w znaczącym stopniu pokrywać zapotrzebowanie na energię elektryczną, jednakże osiągnięcie zakładanego poziomu niezawodności pociąga za sobą negatywne konsekwencje w postaci nadwyżek energii lub rosnącej emisji substancji szkodliwych.

Reasumując należy stwierdzić, iż układ hybrydowy może do pewnego stopnia zastąpić tradycyjny generator prądowórczy, jednakże konieczna jest pogłębiona analiza ekonomiczna w celu wykazania zasadności takiego rozwiązania.

Ze względu na charakter przeprowadzonych badań, tj. silne oddziaływanie przyjętych w modelu założeń co do lokalizacji (warunki wietrzności oraz nasłonecznienia) oraz wyboru technologii magazynowania energii i parametrów źródeł energii konieczne są dalsze badania, które pozwolą na wyciągnięcie bardziej ogólnych wniosków.

Autor: dr hab. inż. Prof. AGH Jerzy Mikulik, AGH w Krakowie, Wydział Zarządzania, Katedra Inżynierii Zarządzania, ul. Gramatyka 10 30-067 Kraków, E-mail: jmikulik@zarz.agh.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Kost, C., Mayer, J. N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., ... & Schlegl, T. (2013). Levelized cost of electricity renewable energy technologies. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.
- [2] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45). Progress in photovoltaics: research and applications, 23(1), 1-9.
- [3] Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environment International, 74, 136-143.
- [4] Fraunhofer, I. S. E. (2015). Recent facts about photovoltaics in Germany. Fraunhofer Inst. Sol. Energy Syst., Freiburg, Tech. Report.[Online]. Available: www.pv-fakten.de, 19.
- [5] Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Energy Policy, 39(3), 1154-1169.
- [6] Delucchi, M. A., & Jacobson, M. Z. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. Energy policy, 39(3), 1170-1190.
- [7] Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8), 2096-2103.
- [8] Teale, G. S. M. (1984). 35,000-kW-hr Later-A User's Experience of Photovoltaic Solar Panels. Journal of petroleum technology, 36(05), 787-792.
- [9] Jones, L. E. (2014). Renewable energy integration: practical management of variability, uncertainty, and flexibility in power grids. Academic Press.
- [10] Teo, T. T., Logenthiran, T., & Woo, W. L. (2015, November). Forecasting of photovoltaic power using extreme learning machine. In Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE Innovative (pp. 1-6). IEEE.
- [11] Popławski, T., Dąsal, K., & Łyp, J. (2009). Problematyka prognozowania mocy i energii pozyskiwanych z wiatru. Polityka energetyczna, 12, 511-523.
- [12] Parol, M. (2014). Prognozowanie ultrakrótkoterminowe mocy generowanej w odnawialnych źródłach energii z wykorzystaniem logiki rozmytej. Przegląd Elektrotechniczny, 90(6), 265-268.
- [13] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. Renewable and sustainable energy reviews, 13(6), 1513-1522.
- [14] Monforti, F., Huld, T., Bódis, K., Vitali, L., D'isidoro, M., & Lacal-Arántegui, R. (2014). Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach. Renewable Energy, 63, 576-586.
- [15] Jurasz, J., & Piasecki, A. (2016). Evaluation of the Complementarity of Wind Energy Resources, Solar Radiation and Flowing Water—a Case Study of Piła. Acta Energetica.
- [16] Jurasz, J., Piasecki, A., & Wdowikowski, M. (2016). Assessing temporal complementarity of solar, wind and hydrokinetic energy. In E3S Web of Conferences (Vol. 10, p. 00032). EDP Sciences.
- [17] Bajor, M., Ziolkowski, P., & Widelski, G. (2015). Badanie współzależności poziomów generacji wiatrowej i potencjalnej generacji ze źródeł PV na obszarze ENERGA-OPERATOR SA. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.
- [18] Khare, V., Nema, S., & Baredar, P. (2016). Solar-wind hybrid renewable energy system: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 23-33.
- [19] Marchel, P., & Paska, J. (2015). Niezawodność wytwarzania energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym przy uwzględnieniu odnawialnych źródeł energii. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, (42), 39-42.
- [20] Ceran, B., & Sroka, K. (2016). Wielokryterialna analiza współpracy hybrydowego systemu wytwórczego z systemem elektroenergetycznym. Polityka Energetyczna, 19.
- [21] Jurasz, J., & Mikulik, J. (2016). Investigating Theoretical PV Energy Generation Patterns with Their Relation to the Power Load Curve in Poland. International Journal of Photoenergy, 2016.
- [22] Jurasz, J., Krzywda, M., & Mikulik, J. (2016). How might residential PV change the energy demand curve in Poland. In E3S Web of Conferences (Vol. 10, p. 00059). EDP Sciences.
- [23] Jurasz, J., Mikulik, J., & Piasecki, A. Wpływ zmienności temperatury na zapotrzebowanie na moc elektryczną w Polsce w latach 2002-2015. Przegląd Elektrotechniczny 92, 257-261 (2016).
- [24] Jurasz, J., & Mikulik, J. (2015). Solar and wind hybrid power source for residential building mathematical model approach. Architecture Civil Engineering Environment, 8(4), 5-10.
- [25] AIR X – the new 400 Watt turbine – owner's manual. Southwest Windpower Inc; 2002.
- [26] Kusakana, K., & Vermaak, H. J. (2013). Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries. Renewable Energy, 51, 419-425.
- [27] <http://ec.europa.eu/eurostat>
- [28] Fleck, B., & Huot, M. (2009). Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use. Renewable Energy, 34(12), 2688-2696.
- [29] Kim, H. C., Wallington, T. J., Arsenault, R., Bae, C., Ahn, S., & Lee, J. (2016). Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis. Environmental Science & Technology, 50(14), 7715-7722.
- [30] Fthenakis, V. M., Kim, H. C., & Alsema, E. (2008). Emissions from photovoltaic life cycles. Environmental science & technology, 42(6), 2168-2174.