

Zbigniew Handzel¹

Mirosław Gajer²

Energetyka wiatrowa jako główna konkurencja dla fotowoltaiki i wynikające stąd problemy związane z koniecznością zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym

Wind power as a major competitor to photovoltaics and the resulting problems associated with the need to balance capacity in the electricity system

Streszczenie: Obecnie w Polsce obserwujemy bardzo szybki wzrost udziału źródeł odnawialnych w produkcji energii elektrycznej. Zdecydowanie na pierwszy plan wysuwa się tutaj fotowoltaika, ale równie silny rozwój przewidywany jest w przyszłości dla energetyki wiatrowej, co związane jest z planowaną budową licznych farm wiatrowych na wodach Morza Bałtyckiego. Tak szybkie zwiększanie wartości mocy zainstalowanej zarówno w elektrowniach fotowoltaicznych, jak i w siłowniach wiatrowych powodować będzie w nieuchronny sposób, że oba wymienione źródła energii odnawialnej stawać się będą systematycznie coraz to większą wzajemną konkurencją. Istniejący w naszym kraju system elektroenergetyczny ma bardzo ograniczone możliwości, jeżeli chodzi o zdolności do przyjęcia większych nadwyżek mocy generowanej ze źródeł odnawialnych. Taki stan rzeczy spowodowany jest nie tylko dawnymi zaszczościami związanymi z niedorozwojem elektroenergetycznych sieci przesyłowych najwyższych napięć, ale również tym, że krajowa elektroenergetyka oparta jest w zdecydowanej mierze na wykorzystaniu bloków energetycznych opalanych węglem kamiennym lub brunatnym, które posiadają ograniczone możliwości obniżenia swej mocy w sytuacji wystąpienia znacznej podaży energii elektrycznej po-

¹⁾ Dr inż., Prof. WSEI Wyższa Szkoła Ekonomii i Informatyki w Krakowie

²⁾ Dr inż. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

chodzącej ze źródeł odnawialnych. W naszym kraju nie posiadamy także dostatecznej mocy zainstalowanej w elektrowniach szczytowo-pompowych, które umożliwiłyby gromadzenie nadwyżek energii wyprodukowanej ze źródeł odnawialnych. Większy eksport energii elektrycznej do krajów ościennych także stoi pod dużym znakiem zapytania, ponieważ nasz zachodni sąsiad również bardzo mocno inwestuje w odnawialne źródła energii, w tym w fotowoltaikę, w związku z czym będziemy zmuszeni w przyszłości konkurować z nim cenowo (wymuszony eksport energii elektrycznej do krajów sąsiednich praktycznie za darmo). Jedynym typem elektrowni opartych na spalaniu paliw kopalnych są elektrownie z turbinami gazowymi, które mogą zostać uruchomione z pełną mocą już po kilkadziesiąt minutach i równie szybko mogą zostać odstawione ponownie z ruchu. Jednak w tym przypadku zapewnianie potrzebnych do ich funkcjonowania odpowiednich ilości gazu zimnego w ostatnich czasach stało się wysoce problematyczne. Równie dyskusyjne wydaje się w rozważanym kontekście inwestowanie w naszym kraju w energię jądrową, ponieważ elektrownie atomowe w zasadzie nie mają w ogóle możliwości jakiegokolwiek regulacji generowanej mocy, a jeśli już, to w stosunkowo niewielkim przedziale ponadto jest to proces bardzo powolny. W związku z tym słabo nadają się do współpracy z odnawialnymi źródłami energii, takimi jak fotowoltaika i siłownie wiatrowe, gdzie normalnym zjawiskiem jest występowanie bardzo dużych i stosunkowo szybkich zmian wartości generowanej mocy. Podsumowując panującą obecnie w polskiej elektroenergetyce sytuację, należy z przykrością stwierdzić, że w wyraźny sposób brakuje tutaj jakiegoś dalekosiężnego i spójnego planu rozwoju tej jakże ważnej dla całości gospodarki branży, a podejmowane w tej materii działania i inicjatywy przejawiają raczej charakter przypadkowy, żeby wręcz nie powiedzieć, że całkowicie chaotyczny.

Abstract: Poland is currently witnessing a very rapid increase in the share of renewable sources in electricity production. Photovoltaics is definitely in the forefront here, but an equally strong development is predicted for wind energy in the future, which is linked to the planned construction of numerous wind farms in the waters of the Baltic Sea. Such a rapid increase in the installed capacity of both photovoltaic and wind power plants will inevitably result in these two sources of renewable energy becoming increasingly competitive with each other. Our country's existing electricity system has very limited capacity to accommodate the larger surpluses of power generated from renewable sources.

This is due not only to the underdevelopment of the extra-high voltage electricity transmission grid caused by the past, but also to the fact that the country's electricity sector is based predominantly on coal- and lignite-fired power units, which have limited capacity to reduce their output when there is a significant supply of electricity from renewable sources. Our country also lacks sufficient pumped storage capacity to store surplus energy produced from renewable sources. Increased export of electricity to neighbouring countries is also highly questionable, as our western neighbour is also investing heavily in renewable energy sources, including photovoltaics, and we will therefore be forced to compete with them on price in the future (forced export of electricity to neighbouring countries virtually for free). The only type of power plants based on the combustion of fossil fuels are those with gas turbines, which can be put into full operation after only a few tens of minutes and can be taken out of service again just as quickly. However, in this case, the provision of the required quantities of cold gas for their operation has become highly problematic in recent times. It seems equally debatable in the context under consideration to invest in nuclear power in our country, as nuclear power plants do not in principle have the possibility of any regulation of the power generated, or if they do, it is within a relatively small range, and it is also a very slow process. As a result, they are not suitable for cooperation with renewable energy sources such as photovoltaics and wind power plants, where it is normal for very large and relatively rapid changes in the value of the generated power to occur. To sum up the current situation in the Polish power sector, it is regrettable to note that there is a distinct lack of any long-term and coherent plan for the development of this industry, which is so important for the economy as a whole, and the actions and initiatives undertaken in this area are rather haphazard, if not downright chaotic.

Słowa kluczowe: energetyka wiatrowa, ogniwa fotowoltaiczne, współpraca z systemem elektroenergetycznym, bilans mocy

Keywords: wind energy, photovoltaic cells, cooperation with the power system, power balance

JEL classification codes: D61, Q2

Wprowadzenie

Ze wszystkich dostępnych obecnie źródeł odnawialnej energii elektrycznej najwcześniej wykorzystywana w naszym kraju była energia wodna. Co więcej, jeszcze kilkadziesiąt lat temu było to w zasadzie jedyne odnawialne źródło energii elektrycznej wykorzystywane w Polsce. Niestety, w ogólnym bilansie energetycznym naszego kraju energia wodna nie ma większego znaczenia (z tego źródła pochodzi zaledwie około 1,5% wytworzonej energii elektrycznej) i mieć w żadnym wypadku nie może, ponieważ Polska jest krajem relatywnie ubogim w wodę, a ponadto nie posiadamy wielkich rzek, takich jak Amazonka, Ganges, Nil czy Jangcy, aby na wykorzystaniu ich potencjału można było oprzeć energetykę całego państwa [1].

Ogólnie rzecz ujmując, elektrownie wodne dzielą się na przepływowe i zbiornikowe. Te pierwsze muszą pracować w sposób ciągły na tak zwane obciążenie podstawowe, ponieważ nie dysponują żadnymi możliwościami gromadzenia nadmiaru wody. Tego rodzaju elektrownie wodne dostarczają w naszym kraju w sposób ciągły zaledwie około 200 MW mocy elektrycznej. Jednak o wiele ważniejsze są elektrownie wodne zbiornikowe wyposażane w zaporę wodną, która umożliwia przez dłuższy czas gromadzenie pokaźnych mas wodnych, których to energia potencjalna może następnie zostać wykorzystana do generacji większych już wartości mocy elektrycznej w godzinach szczytu, gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną jest największe i jest ona w związku z tym relatywnie najdroższa [8].

W ostatnich latach sytuacja w obszarze odnawialnych źródeł energii w naszym kraju uległa diametralnej zmianie, ponieważ najpierw pojawiły się elektrownie wiatrowe, a obecnie z kolei na pierwszy plan wysuwa się fotowoltaika, co jest do pewnego stopnia zaskoczeniem, ponieważ jeszcze kilka lat temu miała ona znaczenie wręcz marginalne [1]. Jak już uprzednio wspomniano, energetyka wodna nie ma w zasadzie w polskim systemie elektroenergetycznym żadnego istotnego znaczenia (oczywiście poza tym, że stanowi bardzo istotny rezerwuar mocy szczytowej i interwencyjnej), gdyż na pierwszy plan zdecydowanie wysuwa się fotowoltaika, która silnie zaczyna konkurować z energetyką wiatrową.

Zarówno fotowoltaika, jak i energetyka wiatrowa charakteryzują się do pewnego stopnia sezonowością produkcji, jej dobową cyklicznością oraz występowaniem licznych nieprzewidywalnych czynników o charakterze losowym, mających jednak istotny wpływ na ostateczną wielkość produkcji energii elektrycznej. Wszystko to powoduje, że niekiedy fotowoltaika i ener-

getyka wiatrowa mogą wzajemnie się uzupełniać, jednak często dochodzić może również do sytuacji nałożenia się szczytowej produkcji energii ze źródeł fotowoltaicznych ze znaczną jej podażą ze źródeł wiatrowych. Niejednokrotnie w takim wypadku niektóre ze źródeł fotowoltaicznych, bądź wiatrowych muszą przymusowo zostać odłączone od sieci elektroenergetycznej, aby zapewnić zbilansowanie mocy w systemie elektroenergetycznym, bez czego oczywiście jego poprawne funkcjonowanie nie jest w ogóle możliwe.

Obecnie mówi się bardzo wiele o pilnej konieczności modernizacji i rozbudowy sieci elektroenergetycznych, aby możliwe było przyłączenie do nich kolejnych wiatraków i paneli fotowoltaicznych. Tego rodzaju działania wiążą się oczywiście z ogromnymi kosztami, a modernizacja wszystkich sieci niskich i średnich napięć (zwłaszcza na terenach wiejskich) jest procesem, którego realizacja może zająć nawet i kilka dekad [4]. W powszechnej opinii panuje również przekonanie, że systematyczne zwiększanie mocy w elektrowniach wiatrowych i fotowoltaicznych jest działaniem jak najbardziej pożądanym, z czym związane są li tylko same korzyści. Autorzy niniejszego artykułu wykazują, że w rozważanym obszarze występują także istotne ograniczenia, które nie są związane tylko i wyłącznie ze zdolnościami przesyłowymi krajowych sieci elektroenergetycznych, ponieważ nagłe pojawienie się w systemie elektroenergetycznym nadwyżek mocy rzędu kilku gigawatów, generowanej ze źródeł odnawialnych, stanowić może o wiele bardziej poważny problem, mający niebagatelny wpływ na bezpieczeństwo funkcjonowania całego systemu elektroenergetycznego kraju (zagrożenie tzw. *blackoutem*) [7].

Wpływ zmienności prędkości wiatru

Ogólnie rzecz ujmując, w powszechnej świadomości jest raczej mało znanym faktem, że energia kinetyczna gnanych wiatrem mas powietrza zależy aż od trzeciej potęgi ich prędkości [8]. Dlaczego tak się dzieje? Przecież z elementarnych wiadomości z dziedziny fizyki wynika, że energia kinetyczna zależy od kwadratu prędkości, zgodnie z następującym wzorem:

$$E = mv^2/2 \quad (1)$$

Tylko że w przypadku wiatru masa przepływającego powietrza zależy również od jego prędkości, ponieważ masa jest iloczynem gęstości i objętości:

$$m = \rho V \quad (2)$$

Z kolei objętość jest iloczynem pola powierzchni przekroju poprzecznego i długości:

$$V = Sd \quad (3)$$

Natomiast długość jest iloczynem prędkości i czasu:

$$d = vt \quad (4)$$

Ostatecznie energia kinetyczna pędzonych wiatrem mas powietrza wyraża się następującym wzorem:

$$E = \rho S v^3 t / 2 \quad (5)$$

W przypadku wiatraków pole powierzchni przekroju poprzecznego jest kołem, czyli:

$$S = 4\pi r^2 \quad (6)$$

W związku z powyższym energia kinetyczna mas powietrza przepływająca przez rotor wiatraka wyraża się wzorem:

$$E = 4\pi r^2 \rho v^3 t / 2 \quad (7)$$

Ponieważ moc jest definiowana jako pochodna energii po czasie, w związku z tym moc elektrowni wiatrowej dana jest następującym wzorem:

$$P = 4\pi r^2 \rho v^3 / 2 \quad (8)$$

We wzorze (8) (r) jest promieniem rotora wiatraka, (ρ) oznacza gęstość powietrza, a z kolei (v) prędkość wiatru. Analizując powyższy wzór widać że moc elektrowni wiatrowej zależy aż do trzeciej potęgi prędkości wiatru. Jest to bardzo silna zależność, sprawiająca że nawet stosunkowo niewielkie zmiany prędkości wiatru powodować będą bardzo duże wahania mocy elektrowni wiatrowej.

Przykładowo, dwukrotne zwiększenie prędkości wiatru powodować będzie aż ośmiokrotne zwiększenie mocy elektrowni wiatrowej. Jeśli elektrownia wiatrowa osiąga swą moc maksymalną przy prędkości wiatru, założmy dla ustalenia uwagi równej 20 m/s, to jej zmniejszenie do 10 m/s sprawi, że rozważana elektrownia generować będzie jedynie 12,5% swej mocy maksymalnej. Z kolei zmniejszenie prędkości wiatru do 5 m/s sprawi, że rozpatrywana siłownia wiatrowa pracować będzie z mocą równą zaledwie 1,5% jej mocy maksymalnej.

Niestety, wiatr jest zjawiskiem bardzo kapryśnym, można wręcz powiedzieć, że chimerycznym, i nie mamy absolutnie żadnego, nawet najmniejszego wpływu na to, kiedy wieje, przy czym nie koniecznie musi to być dokładnie wtedy, gdy akurat w systemie elektroenergetycznym występuje szczyt zapotrzebowania na energię elektryczną. Co więcej, w żadnym wypadku nie wystarczy, że wiatr w ogóle wieje, lecz aby był z tego jakiś większy pożytek, musi wiać jeszcze z odpowiednio dużą prędkością. Z kolei prędkość ta nie może być znowu zbyt wielka, ponieważ wtedy wiatraki muszą zostać bezwzględnie zatrzymane, gdyż w innym razie grozi to bardzo poważną awarią – wręcz katastrofą z oderwaniem łopat wirników przez siły odśrodkowe włącznie, bądź w najlepszym wypadku spalaniem uzwojeń generatorów (niestety takie przypadki od czasu do czasu również zdarzają się także i w naszym kraju).

Aczkolwiek w Polsce wiatry wiejące z dużymi prędkościami nie występują zbyt często. To sprawia, że przez większość czasu wiatraki pracują z mocą wynoszącą zaledwie kilka procent ich mocy maksymalnej. Na Rys. 1 przedstawiono publikowane przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S. A. (PSE) w czasie rzeczywistym dane dotyczące aktualnego zapotrzebowania na moc

w krajowym systemie elektroenergetycznym oraz wartości mocy generowanej przez poszczególne rodzaje źródeł. W dniu 29 maja 2023 roku w jedenastej godzinie doby zainstalowane na terenie Polski wiatraki generowały zaledwie 423 MW mocy przy całkowitym zapotrzebowaniu na moc w krajowym systemie elektroenergetycznym wynoszącym 19853 MW. Wynika stąd, że w rozważanym czasie elektrownie wiatrowe pokrywały zaledwie 2,1% krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Rysunek 1. Dane dotyczące mocy generowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 29 maja 2023

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	19 853
GENERACJA [MW]	19 928
el. ciepłe	11 375
el. wodne	217
el. wiatrowe	423
el. fotowoltaiczne	7 914
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	106 EKSPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	49,991

Źródło: <https://pse.pl/home>.

Niestety, ale przez zdecydowaną większość czasu polskie turbiny wiatrowe pracują ze zbliżoną wartością mocy do tej podanej na Rys. 1. Wziąwszy pod uwagę, że w chwili pisania niniejszego artykułu łączna moc zainstalowana w polskich turbinach wiatrowych wynosiła około 9 GW, to wynika z tego, że polskie wiatraki pracują jedynie na poziomie około 4,7 % swej mocy maksymalnej. Jednak niekiedy jest znacznie gorzej, gdy prędkość wiatru spada

w okolicie 5 m/s, wówczas turbiny wiatrowe w ogóle przestają się obracać, gdyż do ich stabilnej pracy wymagana jest pewna minimalna prędkość wiatru [6]. Sytuacja taka miała miejsce między innymi w dniu 22 kwietnia 2023 roku, co pokazano na Rys. 2.

Rysunek 2. Dane dotyczące mocy generowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 22 kwietnia 2023

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	18 276
GENERACJA [MW]	18 044
el. ciepłe	10 009
el. wodne	328
el. wiatrowe	53
el. fotowoltaiczne	7 652
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	202 IMPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	50,055

Źródło: <https://pse.pl/home>.

Jak wynika z Rys. 2, w rozważanym dniu siłownie wiatrowe generowały jedynie 53 MW mocy, co daje zaledwie 0,6% wartości mocy zainstalowanej we wszystkich polskich elektrowniach wiatrowych. Jednak należy uczciwie przyznać, że od czasu do czasu zdarza się również, że mocy generowanej przez elektrownie wiatrowe jest w krajowym systemie elektroenergetycznym całkiem sporo. Przykładowo, tego rodzaju sytuacja miała miejsce w dniu 13 marca 2023 roku, co ukazano na Rys. 3. W rozpatrywanym dniu elektrownie wiatrowe dostarczyły do systemu elektroenergetycznego łącznie 7308 MW mocy, co stanowiło 81,2% wartości całkowitej mocy zainstalowanej

w polskich wiatrakach. Tego rodzaju sytuacje należą jednak do rzadkości – są to zwykle pojedyncze dni w roku – a w rzeczywistości mocy generowanej w siłowniach wiatrowych jest znacznie mniej.

Rysunek 3. Dane dotyczące mocy generowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 13 marca 2023

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	23 096
GENERACJA [MW]	22 445
el. ciepne	14 167
el. wodne	970
el. wiatrowe	7 308
el. fotowoltaiczne	0
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	650 IMPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	50,012

Źródło: <https://pse.pl/home>.

Typowa sytuacja dotycząca generacji mocy w siłowniach wiatrowych miała miejsce w dniu 8 marca 2023 roku, co przedstawiono na Rys. 4. Wówczas elektrownie wiatrowe generowały łącznie 507 MW mocy, co jest najczęściej spotykanym rzędem wielkości w przypadku polskich elektrowni wiatrowych.

Rysunek 4. Dane dotyczące mocy generowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 8 marca 2023

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	24 065
GENERACJA [MW]	21 490
el. ciepłe	19 793
el. wodne	1 190
el. wiatrowe	507
el. fotowoltaiczne	0
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	2 576 IMPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	50,011

Źródło: <https://pse.pl/home>.

Jak wynika z omówionych przykładów, zależność mocy elektrowni wiatrowych aż od trzeciej potęgi prędkości wiatru powoduje, że w rzadkich przypadkach do systemu elektroenergetycznego wprowadzane będą bardzo duże ilości mocy, co jest źródłem licznych problemów związanych z koniecznością zapewnienia jego stabilnej pracy [7]. Najczęściej będą to jednak ilości stosunkowo niewielkie, które nie mają w zasadzie większego znaczenia z punktu widzenia zbilansowania mocy w systemie elektroenergetycznym (typowo wartości rzędu kilkuset megawatów). W świetle zamieszczonych rozważań, nie jest już żadnym zaskoczeniem, że wartość średniorocznego współczynnika wykorzystania mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych kształtuje się na poziomie zaledwie około 20% w przypadku wiatraków zainstalowanych na lądzie [8]. W przypadku wiatraków morskich, które w Polsce mają dopiero powstać, jest to nieco więcej, bo około 30% [1].

Reasumując powyższe rozważania, należy zdecydowanie stwierdzić, że wiatr jest zjawiskiem ze wszech miar kapryśnym i zwykle nie wieje z odpo-

wiednio wysoką prędkością dokładnie wtedy, kiedy byśmy sobie tego życzyli. Wynika stąd, że co prawda gnane wiatrem masy powietrza są nośnikami olbrzymiej energii kinetycznej, jednak w praktyce okiełznanie tego rodzaju naturalnych sił przyrody, a tym bardziej wyrwanie naturze drzemiącego w niej potencjału nie jest zadaniem bynajmniej łatwym do realizacji.

Problemy z efektywnym zagospodarowaniem nadwyżki generowanej mocy

Tak duże wahania mocy generowanych przez elektrownie wiatrowe stanowią poważny problem także z punktu widzenia stabilności pracy całego systemu elektroenergetycznego, gdzie zachodzi konieczność bilansowania mocy, co oznacza, że moc generowana w elektrowniach musi ze swą wartością nadążać nieustannie za zmieniającą się w sposób ciągły mocą zapotrzebowaną przez odbiorców [6].

W sytuacji, gdy wieją silne wiatry i w związku z tym mocy generowanej przez wiatraki jest zbyt dużo w stosunku do aktualnych potrzeb, powstaje poważny problem, co zrobić z pojawiającą się okazałą nadwyżką mocy. Pierwszym rozwiązaniem jest podjęcie próby jej wyeksportowania poza granice naszego kraju. Posiadamy w tym celu bezpośrednie połączenia z krajami, takimi jak Niemcy, Czechy, Słowacja, Ukraina, Litwa i Szwecja (połączenie stałoprądowe kablem pod dnem Bałtyku) [4]. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE) publikują na bieżąco, właściwie można powiedzieć, że w zasadzie w czasie rzeczywistym, dane dotyczące aktualnych wartości przepływów mocy na połączeniach transgranicznych, czego przykład można zobaczyć na Rys. 5.

Rysunek 5. Przykładowe dane dotyczące wymiany mocy na połączeniach transgranicznych



Źródło: <https://pse.pl/home>.

Niestety nie zawsze jest to możliwe, z tej prostej przyczyny, że nasi zachodni sąsiedzi w ostatnich latach bardzo mocno zainwestowali w energetykę wiatrową, w związku z czym łączna moc zainstalowana w niemieckich wiatrakach przekracza obecnie już wartość 58 GW. Zatem przy dużych prędkościach wiatrów mają dokładnie ten sam problem co i my, czyli będą musieli rozstrzygnąć, co zrobić ze sporą nadwyżką generowanej mocy. Jak wynika z Rys. 5, moc generowana w niemieckich wiatrakach jest przesyłana przez terytorium Polski głównie do naszych południowych sąsiadów.

Inną możliwością jest podjęcie próby zmagazynowania nadwyżek energii elektrycznej wytworzonej w wiatrakach. Do tego celu służą przede wszystkim elektrownie szczytowo-pompowe, w przypadku których nadmiar energii elektrycznej w systemie wykorzystywany jest do przepompowywania wody ze

zbiornika dolnego do zbiornika górnego elektrowni, w związku z czym energia ta zamieniana jest w energię potencjalną mas wodnych, która może ponownie zostać częściowo odzyskana w trakcie trwania szczytu zapotrzebowania [2]. Oczywiście cały cykl magazynowania energii w elektrowniach szczytowo-pompowych charakteryzuje się określoną sprawnością, która zwykle wynosi nieco ponad 70%. Wiąże się to ze stratami przesyłowymi, gdyż elektrownie szczytowo-pompowe budowane są zwykle w rejonach górskich, znacznie odległych zarówno od elektrowni ciepłych, jak i od ośrodków przemysłowych konsumujących największe ilości energii. Dodatkowo dochodzą do tego straty elektryczne powstałe w silnikach i generatorach (tzw. straty w żelazie i miedzi) oraz straty mechaniczne w pompach i turbinach, a także i straty hydrauliczne, związane z oporami przepływu wody w rurociągach [6]. Natomiast zdecydowanie mniejsze znaczenie mają straty związane z przeciekaniem wody ze zbiorników górnych elektrowni szczytowo-pompowych do gruntu oraz z jej parowaniem.

Obecnie na terytorium naszego kraju istnieje zaledwie sześć elektrowni szczytowo-pompowych, z których jedynie dwie można uznać za obiekty relatywnie duże (Żarnowiec – 716 MW, Porąbka-Żar – 500 MW). Pozostałe cztery to instalacje o stosunkowo niewielkiej mocy, nie mające w systemie elektroenergetycznym większego znaczenia (Solina – 200 MW, Żydowo – 167 MW, Czorsztyn-Niedzica-Sromowce Wyżne – 94 MW, Dychów – 90 MW)³. Wymienione elektrownie mogą pracować w sposób ciągły przez około trzy godziny, pompując wodę do swych zbiorników górnych, pobierają wówczas łącznie z sieci elektroenergetycznej moc o wartości około 2 GW [3].

Jak widać, istniejące w Polsce elektrownie szczytowo-pompowe nie są w stanie zapewnić magazynowania na jakimś istotnym poziomie energii elektrycznej wytworzonej w elektrowniach wiatrowych. Gdyby wszystkie istniejące w naszym kraju elektrownie szczytowo-pompowe tłoczyły wodę do swych zbiorników górnych z pełną mocą przez okres około trzech godzin, czyli praktycznie do całkowitego ich wypełnienia, wówczas z systemu elektroenergetycznego pobrałyby w tym celu około 6 GWh energii elektrycznej. Tymczasem, jak wynika z Rys. 3, w dniu 13 marca 2023 roku tylko w ciągu jednej godziny siłownie wiatrowe wprowadziły do systemu elektroenergetycznego ponad 7,3 GWh energii elektrycznej. Wynika stąd, że mocy zain-

³) Podane wartości mocy dotyczą pracy wymienionych elektrowni szczytowo-pompowych w tzw. trybie generatorowym, tzn. gdy oddają energię do sieci elektroenergetycznej. W przypadku ich pracy w tzw. trybie pompowym pobierana przez nie z sieci moc elektryczna jest o około 30% większa.

stalowanej w polskich elektrowniach szczytowo-pompowych powinno być przynajmniej dziesięć razy więcej [3]. Ponadto elektrownie te powinny dysponować zbiornikami górnymi o odpowiedni dużej objętości, pozwalającymi na ich wielogodzinną pracę z pełną mocą pompową.

Jako swego rodzaju ciekawostkę można podać, że obecnie największa na świecie elektrownia szczytowo-pompowa znajduje się w Chinach w miejscowości Fengning. Elektrownię tę uruchomiono na początku 2022 roku, a widok jej zbiornika górnego przedstawiono na Rys. 6. Moc w trybie generatorowym rozważanej elektrowni szczytowo-pompowej wynosi 3,6 GW. Ponadto pozwala ona na zmagazynowanie około 40 GWh energii elektrycznej.

Rysunek 6. Największa obecnie na świecie elektrownia szczytowo-pompowa w Chinach



Źródło: <https://swiatoze.pl/elektrownia-szczytowo-pompowa-o-najwiekszej-mocy-zainstalowanej-na-swiecie-juz-dziala-w-chinach/>

Drugą co do wielkości elektrownią szczytowo-pompową na świecie jest elektrownia położona w USA w stanie Virginia w miejscowości Bath County. Jej moc generatorowa wynosi 3 GW i umożliwia zmagazynowanie aż 24 GWh energii elektrycznej. Z kolei największy tego typu obiekt w Europie znajduje się we francuskich Alpach. Rozważana elektrownia szczytowo-pompowa osiąga w trybie generatorowym moc 1,8 GW i umożliwia zmagazynowanie około 35 GWh energii elektrycznej – może zatem pracować ze swą mocą maksymalną przez wiele kolejnych godzin.

Niestety, w Polsce o tego typu obiektach możemy jedynie pomarzyć. Największa polska elektrownia szczytowo-pompowa miała swego czasu powstać w Kotlinie Kłodzkiej w miejscowości Młoty, ale w porównaniu ze światową czołówką i tak byłaby w sumie raczej niewielkich rozmiarów karłem, gdyż jej moc generatorowa miała wynosić zaledwie 750 MW [6]. Budowę tej elektrowni przerwano pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku z powodu chronicznego kryzysu ekonomicznego. Od ponad roku sporo się mówi o jej ukończeniu, ale jak dotychczas na mówieniu li tylko się kończy. Mówi się także o konieczności budowy analogicznych obiektów nad Zalewem Wiślany oraz nad Jeziorem Rożnowskim, jednak konkretnych czynów w tej materii nie widać. Jest rzeczą wręcz nieprawdopodobną, aby jakaś nowa elektrownia szczytowo-pompowa mogła powstać w naszym kraju w przeciągu najbliższych dziesięciu lat. Wypływa stąd smutny wniosek, że dużych magazynów energii po prostu nie mamy i w najbliższym czasie mieć nie będziemy, a z drugiej strony występuje niezwykle silna presja na dalsze inwestowanie zarówno tak w wiatraki, jak i w fotowoltaikę.

Rysunek 7. Rozmieszczenie akumulatorowych magazynów energii, których budowa przewidywana jest w najbliższym czasie



Źródło: <https://wysokienapiecie.pl/84360-magazyny-energii-sa-niezbedne/>.

Na koniec wypada także wspomnieć o innych dostępnych sposobach magazynowania energii elektrycznej niż wykorzystanie w tym celu elektrowni szczytowo-pompowych. Bowiern wyprodukowany nadmiar energii elektrycznej można zamienić na energię chemiczną zgromadzoną w akumulatorach. W najbliższych latach planowana jest w naszym kraju budowa co najmniej kilkunastu tego rodzaju magazynów energii, co pokazano na Rys. 7.

Tylko że w porównaniu z elektrowniami szczytowo-pompowymi akumulatorowe magazyny energii to instalacje o znacznie niższej mocy i o wiele mniejszej pojemności zmagazynowanej energii. Spośród przedstawionych na Rys. 7 lokalizacji wybranych pod akumulatorowe magazyny energii jedynie Żarnowiec może zostać uznany za obiekt posiadający jakiegokolwiek większe znaczenie w systemie elektroenergetycznym. Rozważany magazyn energii ma dysponować mocą 205 MW oraz ma umożliwiać zgromadzenie 820 MWh energii elektrycznej, z czego wynika, że z pełną mocą może pracować przez około cztery godziny. Pozostałe akumulatorowe magazyny energii to instalacje małe o mocy kilkunastu lub co najwyżej kilkudziesięciu megawatów, bądź wręcz mikroskopijne o mocy zaledwie kilku megawatów, które w krajowym systemie elektroenergetycznym praktycznie nie mają żadnego istotnego znaczenia.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest zapewnienie przesyłu mocy generowanych w elektrowniach wiatrowych. W tym wypadku problem polega na tym, że wiatraki rozmieszczone są na terenie naszego kraju bardzo nierównomiernie – najwięcej ich znajduje się w północnej Polsce w pobliżu wybrzeża morskiego, ponieważ to właśnie tam panują najbardziej korzystne warunki wietrzności. Tymczasem północne rejony naszego kraju są relatywnie słabo zaludnione, podczas gdy na południu mieszka kilkanaście milionów ludzi, a także znajdują się tam duże ośrodki przemysłowe, generujące wysokie zapotrzebowanie na moc elektryczną. W związku z powyższym w okresie, gdy wieją silne wiatry zachodzi konieczność przesyłu znacznej mocy elektrycznej na kierunku północ-południe.

Na Rys. 8 przedstawiano mapę ukazującą przebieg znajdujących się na terenie naszego kraju elektroenergetycznych linii przesyłowych najwyższych napięć [9]. Jak wynika z Rys. 8 Polska relatywnie posiada raczej dość słabo rozbudowaną sieć linii przesyłowych o najwyższych napięciach, czyli 220 kV, a zwłaszcza 400 kV, co znacznie ogranicza możliwości transferu mocy na kierunku północ-południe.

Rysunek 8. Mapa ukazująca przebieg elektroenergetycznych sieci przesyłowych najwyższych napięć na terenie naszego kraju



Źródło: <https://pse.pl/home>.

troenergetyczna linia przesyłowa prądu stałego ma mieć docelowo długość ponad 600 km i ma umożliwić transfer mocy o wartości około 4 GW. Jej budowa jest bezwzględnie koniecznością, jeśli tylko chcemy poważnie myśleć o dalszym rozwoju energetyki wiatrowej na polskim wybrzeżu, a zwłaszcza w kontekście budowy farm wiatrowych na Bałtyku o łącznej mocy przekraczającej 6 GW [5]. Obecnie istniejące sieci przesyłowe po prostu nie są już w stanie przyjąć tak wielkich ilości mocy. Zatem bez ich istotnej rozbudowy przyłączenie kolejnych farm wiatrowych, zwłaszcza tych budowanych na Bałtyku, nie będzie w ogóle możliwe. Na Rys. 9 przedstawiono także przebieg planowanych nowych elektroenergetycznych linii przesyłowych o napięciu 400 kV, których zadaniem będzie umożliwienie przesyłu energii z wybrzeża Bałtyku do centralnych obszarów Polski.

Fotowoltaika jako główny konkurent dla energetyki wiatrowej

W ostatnim czasie jesteśmy świadkami spektakularnego wręcz przyrostu mocy w polskich instalacjach fotowoltaicznych, której w momencie pisania niniejszego artykułu zainstalowano już około 14 GW. W ten sposób w okresie zaledwie trzech lat fotowoltaika z pozycji wręcz raczkującej wyrosła na głównego i zarazem potężnego konkurenta dla energetyki wiatrowej. Co istotne, w nadchodzących latach przewidywany jest dalszy dynamiczny przyrost mocy w polskich instalacjach fotowoltaicznych. Przewiduje się nawet, że już za trzy lata całkowita moc zainstalowana w polskich panelach fotowoltaicznych wręcz może ulec podwojeniu, osiągając wartość rzędu 30 GW.

W przypadku realizacji w najbliższej przyszłości takiego scenariusza pojawią się równocześnie poważne problemy związane ze zbilansowaniem mocy w systemie elektroenergetycznym. Przykładowo na Rys. 10 zamieszczono dane dotyczące mocy generowanych w polskim systemie elektroenergetycznym w dniu 30 maja 2023 roku w okolicy trzynastej godziny doby.

Rysunek 10. Dane dotyczące mocy generowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 30 maja 2023

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	20 365
GENERACJA [MW]	20 077
el. ciepne	10 874
el. wodne	190
el. wiatrowe	755
el. fotowoltaiczne	8 257
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	262 IMPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	50,054

Źródło: <https://pse.pl/home>.

Jak wynika z Rys. 10, w rozważanej porze elektrownie fotowoltaiczne dostarczały aż 8257 MW mocy przy całkowitym zapotrzebowaniu na moc w systemie elektroenergetycznym wynoszącym 20365 MW. W przypadku podwojenia mocy zainstalowanej w panelach fotowoltaicznych elektrownie fotowoltaiczne teoretycznie mogłyby generować również dwa razy więcej mocy, czyli około 16,5 GW.

Przy takim samym zapotrzebowaniu na moc, wynoszącym około 20,5 GW, pozostałe źródła musiałyby pokryć jedynie około 4 GW. Jak wynika z Rys. 10, mocy rzędu 1 GW dostarczają w przypadku typowych warunków pracy elektrownie wiatrowe i elektrownie wodne przepływowe. W związku z powyższym elektrownie ciepne musiałyby dostarczyć jedynie około 3 GW mocy. Z tym wiąże się jednak pewien poważny problem. Mianowicie, istniejące w Polsce elektrownie ciepne w przeważającej większości starszych typów

charakteryzują się relatywnie niskim poziomem elastyczności mocy, która nie może zostać istotnie obniżona, ponieważ, aby blok ciepły mógł pracować w sposób stabilny, jego moc nie może spaść poniżej pewnej krytycznej wartości minimalnej [6]. W przypadku nowoczesnych bloków ciepłych, takich jak te zainstalowane w ostatnich latach w elektrowniach Bełchatów, Koźienice, Opole i Jaworzno z rozważanym współczynnikiem elastyczności mocy jest nieco lepiej, ale i tak mocy tego rodzaju bloków zaprojektowanych na tzw. parametry nadkrytyczne nie można obniżyć do mniej niż około 40% wartości ich mocy maksymalnej. Zatem blok w elektrowni Koźienice o mocy maksymalnej wynoszącej 1075 MW może co najwyżej obniżyć swą moc do około 500 MW. Niestety, w takim przypadku znacznemu pogorszeniu ulegają parametry jego pracy, a zwłaszcza spada jego sprawność. Powstaje zatem pytanie o sensowność swego rodzaju „duszenia” nowoczesnych bloków o parametrach nadkrytycznych codziennie przez okres kilku godzin tylko po, aby w tym czasie fotowoltaika mogła wprowadzać generowaną przez siebie moc do sieci, w celu poprawienia statystyk dotyczących udziału energii wyprodukowanej przez źródła odnawialne w tzw. miksie energetycznym.

Z drugiej strony rozważanych bloków elektrowni ciepłych opalanych węglem kamiennym bądź brunatnym nie można ot tak sobie po prostu na zaledwie kilka godzin trwania szczytu produkcji energii pochodzącej z fotowoltaiki całkowicie wyłączyć – mogą one natomiast przejść do tzw. gorącej rezerwy, co jest jeszcze większym marnotrawstwem paliw kopalnych i związaną z tym bezzasadną emisją różnego rodzaju zanieczyszczeń do atmosfery. W każdym razie, niedługo po tym, gdy szczyt produkcji ze źródeł fotowoltaicznych się kończy w systemie elektroenergetycznym pojawia się tzw. wieczorny szczyt zapotrzebowania, czyli w rozważanym czasie odbiorcy żądają najwięcej mocy, a fotowoltaika dostarcza wtedy dokładnie zero watów.

W związku z tym, że czas rozruchu bloku ciepłego opalanego węglem wynosi co najmniej sześć godzin ich odstawienie z ruchu na okres zaledwie kilku godzin, (gdy fotowoltaika osiąga szczyt generacji swej mocy), nie jest w żaden sposób uzasadnione, gdyż tuż po wyłączeniu bloku należałoby niezwłocznie przystąpić do jego ponownego rozpalamia. Taka czynność powtarzana cyklicznie miałaby dodatkowo fatalny wpływ na jego żywotność i stopień awaryjności zainstalowanych urządzeń.

Rysunek 11. Dane dotyczące mocy generowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 1 czerwca 2023

ZAPOTRZEBOWANIE [MW]	19 811
GENERACJA [MW]	20 269
el. ciepne	10 039
el. wodne	184
el. wiatrowe	2 425
el. fotowoltaiczne	7 621
el. inne odnawialne	0
SALDO WYMIANY CAŁKOWITEJ [MW]	483 EKSPORT
CZĘSTOTLIWOŚĆ [Hz]	50,013

Źródło: <https://pse.pl/home>.

Tak naprawdę jedynym paliwem kopalnym nadającym się do bezpośredniej współpracy z systemami fotowoltaicznymi jest gaz ziemny, ponieważ pełny rozruch turbiny gazowej trwa jedynie kilkadziesiąt minut [8]. Zatem mogą być one w cyklu dobowym szybko odstawiane z ruchu na okres kilku godzin, a następnie równie szybko uruchamiane ponownie, gdy tylko zachodzi taka konieczność. Jednak do tego potrzeba ogromnych ilości gazu ziemnego, których pozyskanie w chwili pisania niniejszego artykułu jest wysoce problematyczne. To właśnie z tego powodu Niemcy, które swego czasu postanowiły tak silnie inwestować w fotowoltaikę (mówi się tam nawet o zainstalowaniu ponad 200 GW mocy w tego typu elektrowniach), tak brutalnie forsowały budowę gazociągu Nord Stream 2, aby zapewnić sobie w potrzebnej ilości paliwo dla elektrowni gazowych współpracujących właśnie z fotowoltaiką. Jednocześnie w Niemczech podjęto decyzję o całkowitej rezygnacji z ener-

getyki jądrowej, ponieważ elektrownie atomowe do współpracy ze źródłami fotowoltaicznymi oraz elektrowniami wiatrowymi w zasadzie zupełnie się nie nadają, gdyż ich poziom elastyczności mocy jest właściwie zerowy – po prostu reaktor atomowy musi pracować przez cały czas ze swą mocą nominalną, a jakakolwiek zmiana mocy reaktora jest procesem bardzo długotrwałym, a ponadto nie jest pożądana ze względu na istotne skrócenie jego żywotności (zmiany temperatury powodują pojawianie się mikropęknięć) [1]. Jest to także wysoce nieekonomiczne. To właśnie z tego powodu, jeszcze przed uruchomieniem elektrowni atomowej w Żarnowcu, wybudowano tam elektrownię szczytowo-pompową, która *nota bene* obecnie stała się bardzo przydatna [3].

Głoszone obecnie plany budowy w Polsce aż trzech dużych elektrowni atomowych oraz kilku mniejszych (opartych na małych reaktorach modułowych o mocy kilkudziesięciu megawatów) w kontekście zamieszczonych rozważań mogą wydawać się także wysoce problematyczne, ponieważ rozważane elektrownie będą musiały pracować przez całą dobę ze swą mocą nominalną, czyli będą generować co najmniej 10 GW mocy. W takiej sytuacji pozostanie już niewiele miejsca do wykorzystania pod kątem możliwości wprowadzenia do krajowego systemu elektroenergetycznego dodatkowej mocy pochodzącej z dynamicznie rozwijającej się fotowoltaiki oraz budowanych na wodach Bałtyku elektrowni wiatrowych [5].

Na Rys. 11 zamieszczono dane dotyczące generacji mocy w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 1 czerwca 2023 roku w okolicach czternastej godziny doby. Jak widać, całkowite zapotrzebowanie na moc wynosiło wówczas niecałe 20 GW, przy czym fotowoltaika generowała około 7,6 GW. W rozważanym okresie czasu wiał jeszcze dość silny wiatr, tak że elektrownie wiatrowe wniosły do systemu elektroenergetycznego dodatkowe 2,4 GW. Ponadto elektrownie wodne przepływowe, które muszą pracować w sposób ciągły, ponieważ nie są wyposażone w zbiorniki gromadzące wodę, generowały jeszcze około 0,2 GW mocy. Jak wynika z zamieszczonych danych odnawialne źródła energii generowały łącznie 10,2 GW, czyli pokrywały około 51% krajowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Pozostałe 49% zapotrzebowania było pokrywane przez elektrownie ciepłne opalane węglem kamiennym lub brunatnym. Bloki rozważanych elektrowni ciepłych generowały łącznie nieco ponad 10 GW mocy.

Szacuje się, że minimalna łączna moc polskich elektrowni ciepłych zapewniająca bezpieczną i stabilną pracę systemu elektroenergetycznego wynosi około 8 GW, ponieważ nie można już mocy pracujących bloków energetycznych obniżyć poniżej ich dozwolonych wartości, ani tym bardziej ich trwale

wyłączyć z ruchu, ponieważ za kilka godzin będą one bezwzględnie potrzebne w celu zbilansowania mocy w systemie. Kluczowym zagadnieniem jest także utrzymanie na odpowiednim poziomie tzw. stałej inercji systemu elektroenergetycznego, która ma istotny wpływ na stabilizację częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. Tymczasem stała inercji dla źródeł fotowoltaicznych podłączonych do sieci poprzez falowniki wynosi dokładnie zero [7]. Jak wynika z zamieszczonych rozważań, w dniu 1 czerwca 2023 roku moc pracujących bloków elektrowni ciepłych można było jeszcze obniżyć o około 2 GW. Później można zapewne jeszcze do jakiegoś stopnia ratować się eksportem energii elektrycznej do krajów ościennych, ale zapewne byłoby to oddawanie im energii po wręcz śmiesznie niskich cenach – rzędu 20 złotych za megawatogodzinę, czyli praktycznie za darmo. Dalsze zwiększenie podaży mocy ze źródeł odnawialnych wymusiłoby już ich przymusowe odłączenie od sieci – tego rodzaju incydenty miały już miejsce w maju 2023 roku, a jest to zapewne dopiero wierzchołek góry lodowej, czyli zaledwie przedsmak tego, co w perspektywie kilku lat czeka nas nieuchronnie, jeśli tylko moc zainstalowana w fotowoltaice ulegnie podwojeniu, a na wodach Bałtyku powstaną farmy wiatrowe.

Zakończenie

W ostatnich latach w naszym kraju bardzo intensywnie rozwijane są odnawialne źródła energii elektrycznej. Obecnie na pierwszy plan wysunęła się nieoczekiwanie fotowoltaika, głównie dzięki dotacjom państwowym i powszechnemu entuzjazmowi, który udzielił się prosumentom. W najbliższej przyszłości planowany jest również intensywny rozwój energetyki wiatrowej, głównie poprzez budowę farm wiatrowych na wodach Bałtyku, ale także po uchynieniu tzw. ustawy 10H poprzez powstanie kolejnych wiatraków lądowych. Tak burzliwy rozwój odnawialnych źródeł energii obu wymienionych typów doprowadzi nieuchronnie – i to zapewne już w najbliższym czasie – do pojawienia się silnej wzajemnej ich konkurencji.

W pewien sposób fotowoltaika i energetyka wiatrowa mogą się jednak wzajemnie uzupełniać. Dotyczy to sezonowości ich produkcji, gdyż latem zdecydowanie więcej mocy wnosi fotowoltaika, a zimą energetyka wiatrowa (generalnie im zimniej, tym wiatry wieją z większą prędkością). Również kompensacja obu rodzajów źródeł zachodzi w cyklu dobowym, ponieważ fotowoltaika pracuje z powszechnie zrozumiałych powodów jedynie w dzień, a z kolei silniejsze wiatry wieją na ogół nocą. Nie są to jednak jakieś bezwzględnie obowiązujące reguły, ponieważ na rozważane cykle nałożony jest

jeszcze silny czynnik losowy, który powoduje, że niekiedy szczyt generacji mocy z fotowoltaiki zbiegać będzie się z relatywnie wysokim poziomem generacji mocy z elektrowni wiatrowych. W takiej sytuacji przy planowanym znacznym (nawet i ponad dwukrotnym) zwiększeniu mocy zainstalowanej zarówno w fotowoltaice, jak i w elektrowniach wiatrowych dochodziło będzie nieuchronnie do sytuacji, że odnawialne źródła energii będą musiały być przymusowo odłączane od sieci elektroenergetycznych. Wówczas będzie trzeba podejmować decyzję, co odłączyć? Duże farmy fotowoltaiczne, czy farmy wiatrowe? A może w skrajnych przypadkach i jedno, i drugie?

Oczywiście, tego rodzaju przymusowe odłączenia od sieci odnawialnych źródeł energii doprowadzą do zrównoważenia bilansu mocy w systemie elektroenergetycznym i ostatecznie uchronią nas przed *blackoutem*, ale odbywać się to wszystko będzie kosztem drastycznego wręcz zmniejszenia wartości współczynnika średniorocznego wykorzystania mocy zainstalowanej, który i tak w przypadku odnawialnych źródeł energii jest niewielki – w przypadku fotowoltaiki wynosi zaledwie około 10% (według danych podawanych przez PSE z przykładowego panelu fotowoltaicznego o mocy 1 kW zainstalowanego na terytorium Polski wyprodukowano około 827 kWh energii elektrycznej, co daje w tym wypadku wykorzystanie mocy zainstalowanej zaledwie na poziomie około 9,4% [10]). Tego rodzaju sytuacje prowadziły będą do istotnego pogorszenia ekonomicznej opłacalności inwestycji w odnawialne źródła energii, za co w otrzymywanych rachunkach płacić będą oczywiście odbiorcy końcowi.

Bibliografia

1. Chmielniak T., *Technologie energetyczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
2. Elzbieciak T., *Wodne elektrownie szczytowe mogą wrócić z wielką pompą*, <https://wysokienapiecie.pl/67151-wodne-elektrownie-szczytowe-moga-wrocic-z-wielka-pompa/>, 2023.
3. Handzel Z., Gajer M., *O pilnej potrzebie budowy w Polsce kolejnych elektrowni szczytowo-pompowych pełniących rolę magazynów energii*, Zeszyty Naukowe WSEI, nr 18.
4. Kujszczy S., Brociek S., Flisowski Z., Gryko J., Nazarko J., Zdun Z., *Elektroenergetyczne układy przesyłowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997
5. Latarska A., *Grupa PGE i Ørsted wybrały dostawcę turbin dla projektu Baltica 2*, Polska na morzu, nr 4(54), kwiecień 2023.

6. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., *Elektrownie*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
7. Machowski J., Lubośny Z., *Stabilność systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
8. Marecki J., *Podstawy przemian energetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
9. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012.
10. Zadrożniak M., *Kompendium wiedzy o elektrowniach wiatrowych, słonecznych, węglowych i atomowych*, Biblioteka Wolności, Warszawa 2023.