

Dane wsadowe do symulacji systemu energetycznego

Wprowadzenie

Żeby porządnie zrobić symulację, bez większych błędów systematycznych, trzeba uporządkować dane i zmierzyć się z drobnymi, acz upierdliwymi szczegółami, takimi jak własne zużycie prądu przez prosumentów, ponad dwukrotny wzrost mocy fotowoltaiki w ciągu roku, konieczność unormowania mocy starych turbin wiatrowych względem nowych czy też brak danych rzeczywistych o produkcji prądu przez morskie farmy wiatrowe w Polsce.

To zresztą nie wszystkie niuanse... Weźmy się za nie po kolei:

Kwestia 1. Z danych Krajowych Sieci Elektroenergetycznych wynika, że instalacje PV wprowadziły do sieci w 2021 r. 4,6 TWh energii elektrycznej. Jednak w rzeczywistości instalacje PV wyprodukowały więcej, ponieważ ok. 70% mocy fotowoltaiki w Polsce w 2021 r. stanowiły instalacje prosumenckie, których prąd jest najpierw zużywany na miejscu, a do sieci oddawana jest jedynie nadwyżka. W praktyce więc do sieci energię oddawało nie 5,5 GW instalacji PV, lecz mniej.

Co z tym zrobić. Typowy współczynnik autokonsumpcji prosumentów (czyli procent wytwarzanej energii, która jest od razu wykorzystywana na miejscu) wynosi 15-25%. Przyjmując, że prąd wytwarzany przez instalacje prosumenckie w 20% został zużyty na miejscu, można policzyć, że na potrzeby sieci pracowało $5,5 \cdot 0,3 + 5,5 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = 4,7$ GW.

Kwestia 2. W ciągu 2021 roku, będącego dla nas punktem odniesienia, moc fotowoltaiki wzrosła ponad dwukrotnie. To miło, ale wolelibyśmy przyjrzeć się generacji energii przez źródła o ustalonej mocy, musimy więc dokonać przeliczenia danych (upraszczając: gdyby moc instalacji PV była stała, generacja energii w pierwszych miesiącach roku byłaby większa niż była w rzeczywistości, a w końcowych miesiącach – niższa).

Co z tym zrobić. Przyjmijmy, że moc zainstalowanych źródeł rosta liniowo w ciągu roku. Czyli, jeśli na przykład na początku roku wynosiłaby 4 GW, a na końcu 7 GW (zaokrąglam tu, żeby liczby były wygodne w śledzeniu, w symulatorze przeliczenia robione są bez takich zaokrągleń), to jako średnią moc w roku przyjęlibyśmy 5,5 GW, rosnącą w ciągu liniowo z 4 do 7 GW. Jednak musimy pamiętać (kwestia 1), że do sieci odprowadzana była tylko część energii produkowanej przez instalacje PV. Można policzyć, że na początku roku na potrzeby sieci pracowało 3,4 GW, a na końcu 6,1 GW, a średniorocznie 4,75 GW. Powiedzmy, że 1 stycznia i 31 grudnia fotowoltaika w południe dawała po 1 GW. 1 stycznia ten 1 GW wyprodukowały instalacje o mocy 3,4 GW, więc 4,75 GW instalacji dałoby $4,75/3,4=1,4$ GW. Z kolei 31 grudnia ten 1 GW wyprodukowały instalacje o mocy 6,1 GW, więc 4,75 GW dałoby $4,75/6,1=0,78$ GW.

Kwestia 3. W ciągu 2021 roku, będącego dla nas punktem odniesienia, moc farm wiatrowych wzrosła z 6,6 GW do 7,3 GW).

Co z tym zrobić. Przeliczenie analogiczne jak w fotowoltaice, w przypadku farm wiatrowych nie jest potrzebne robienie korekty na własne zużycie prądu przez prosumentów. Średnia moc to 6,95 GW.

Kwestia 4. Spora część polskich turbin wiatrowych jest dość leciwa i na jednostkę mocy nominalnej wytwarza mniej prądu niż nowoczesne turbiny; ponieważ będziemy analizować budowę nowych efektywnych turbin wiatrowych, powinniśmy przeliczyć istniejące moce na ekwiwalent produkcji energii w nowoczesnych instalacjach.

Co z tym zrobić. W 2021 roku mieliśmy w Polsce lądowe farmy wiatrowe o średniej mocy 6,85 GW, które wyprodukowały 15,2 TWh prądu ([źródło](#)). Oznacza to produkcję energii elektrycznej z 1 GW równą $15,2/6,85 = 2,2$ TWh rocznie oraz

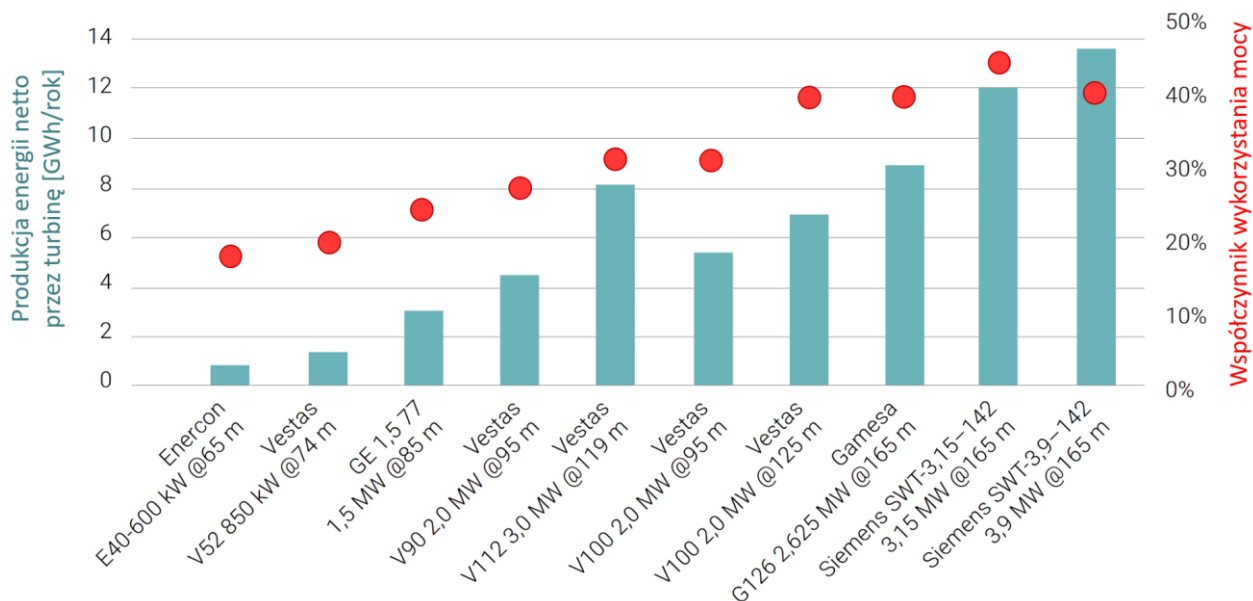
współczynnik wykorzystania mocy (czyli stosunek średniej mocy do mocy maksymalnej) 25% (gdyby instalacja o mocy 1 GW pracowała cały czas z mocą maksymalną, w ciągu godziny dostarczyłaby 1 GWh energii, a w ciągu roku $1 \cdot 365 \cdot 24 = 8760$ GWh. Wyprodukowanie 2200 GWh oznacza, że jej współczynnik wykorzystania mocy wyniósł $2200/8760 = 25\%$).

Porównanie z innymi latami pokazuje, że był to rok o dość słabych warunkach wiatrowych.



Ilustracja 1. Współczynnik wykorzystania mocy lądowych elektrowni wiatrowych w Polsce w kolejnych latach. Źródła: [Moc zainstalowana farm wiatrowych, Rynek elektryczny w Polsce](#); [Praca KSE - generacja źródeł wiatrowych i fotowoltaicznych, Polskie Sieci Elektroenergetyczne](#).

Średnio w ostatnich latach współczynnik wykorzystania mocy polskich lądowych farm wiatrowych wynosił 27%. Dla nowych, większych i efektywniejszych turbin wiatrowych współczynnik ten jest rzędu 40%.



Ilustracja 2. Kluczowe parametry lądowych turbin wiatrowych: roczna produkcja energii netto (niebieskie słupki w GWh rocznie, skala po lewej stronie) oraz współczynnik wykorzystania mocy (czerwone kropki, skala po prawej stronie) – od turbin wiatrowych starszego typu do nowocześniejszych. Przykładowo, turbina umieszczona najdalej po prawej stronie – „Siemens SWT-3,9-142 3,9 MW@165” w ciągu roku wytwarza blisko 14 GWh prądu i ma współczynnik wykorzystania mocy blisko 40%. Druga od prawej turbina Siemens – podobna konstrukcja (taka sama wysokość i rozmiar łopat) różniąc się tylko mniejszą mocą turbiny, w ciągu roku wytwarza 12 GWh prądu, przy współczynniku wykorzystania mocy 43%. Dlaczego tak jest? Przerysowując – gdy na wielkim wiatraku wstawimy turbinę o małej mocy, to nawet przy słabym wiatryku będzie ona pracować na 100%, a współczynnik wykorzystania mocy będzie bardzo wysoki – choć ilość wyprodukowanego prądu będzie bardzo mała. Dane

rzeczywiste, zebrane w lokalizacji testowej o przeciętnych warunkach wietrzności w południowo-zachodniej Polsce. Źródło *Współczynnik wykorzystania mocy i produktywność różnych modeli turbin wiatrowych dostępnych na polskim rynku*, [DNV GL 2017](#)

Rzecz jasna turbiny nie pracują cały czas ze swoją mocą nominalną, tylko z mniejszą mocą, zależną od prędkości wiatru. Starsze lądowe turbiny wiatrowe, jakie były instalowane w Polsce w minionej dekadzie, miały współczynnik wykorzystania mocy na średnim poziomie 27% (patrz Materiały Dodatkowe, ilustracja MD.1.). Nowoczesne modele, pracujące w tych samych warunkach, mają sprawność na poziomie 40%. Dla naszych obliczeń przyjmijmy współczynnik wykorzystania mocy dla lądowych turbin wiatrowych 36%.

Przyjęty przez nas do obliczeń współczynnik wykorzystania mocy równy 36% jest mocno konserwatywny. Po pierwsze najlepsze turbiny w lokalizacjach o przeciętnych warunkach wiatrowych mają sprawność ok. 40%, nie sięgamy więc po instalacje z najwyższej półki. Po drugie cały czas trwa poprawa parametrów turbin, my jednak bierzemy to, co jest już obecnie dostępne. Po trzecie zaś te same turbiny umieszczone w lokalizacji o dobrych warunkach wietrzności w północnej Polsce mają współczynnik wykorzystania mocy wyższy o kilka punktów procentowych ([źródło](#)), a biorąc pod uwagę, że zakładamy wykorzystanie pod farmy wiatrowe do 2% powierzchni kraju, moglibyśmy stawiać je w miejscach o bardzo dobrych warunkach.

Przyjmując zachowawczo 36% (nie tylko zakładamy tu, że nowe turbiny wiatrowe będą pracować poniżej swoich możliwości w polskich warunkach, ale też pomijamy dalszą prognozowaną poprawę sprawności turbin wiatrowych, zatrzymując się na obecnie dostępnych technologiach), te 6,85 GW instalacji z 2021 roku odpowiada z grubsza $6,85 \cdot 27/36 = 5,14$ GW w nowoczesnych turbinach wiatrowych. Gdybyśmy postawili 50 GW w nowoczesnych turbinach wiatrowych na lądzie, mielibyśmy z nich $50/5,14 = 9,7$ x więcej energii niż z farm wiatrowych działających w Polsce w 2021 roku. W warunkach pogodowych 2021 roku dałyby nam one $9,7 \cdot 15,2$ TWh = 147 TWh prądu.

Kwestia 5. W Polsce nie ma morskich farm wiatrowych, skoro więc chcemy oszacować produkcję tego źródła energii godzina po godzinie musimy oprzeć się na innych danych – zrobimy to w oparciu o przeskalowaną pracę turbin wiatrowych na lądzie.

Co z tym zrobić. Typowy współczynnik wykorzystania mocy w nowoczesnych turbinach wiatrowych na Bałtyku to trochę ponad 50%, czyli 1,85x więcej niż 27% w istniejących lądowych turbinach wiatrowych. Liczymy jednak nie sumaryczny bilans w roku, lecz godzina po godzinie. W sytuacji, gdy wiatraki na lądzie podczas silnego wiatru pracowały z maksymalną mocą, turbiny na morzu również pracowałyby z pełną mocą, a nie na 185% mocy maksymalnej. Jednocześnie nowoczesne konstrukcje pracują wydajniej przy słabszym wietrze. Dokonamy więc liniowego zwiększenia mocy farm wiatrowych na morzu, tak, żeby w przypadku osiągnięcia swojej mocy maksymalnej pracowały z tą mocą i żeby jednocześnie w ciągu roku wytwarzały ilość energii zgodną ze swoim współczynnikiem mocy. Zauważmy jeszcze, że w praktyce, ze względu na inną lokalizację instalacji, nie miałyby miejsca 100-procentowa korelacja mocy dostarczanej przez lądowe i morskie farmy wiatrowe. Przyjęte założenie stanowi więc utrudnienie bilansowania produkcji i zużycia. Tym niemniej przyjmijmy taki algorytm, traktując to jako przyczynek do stress-testów.

Kwestia 6. Wróćmy do farm wiatrowych na lądzie. Przyjmując, że będziemy budować nowoczesne turbiny wiatrowe, o średnim współczynniku wykorzystania mocy 36%, dokonując przeskalowania z 27% dla pracujących obecnie turbin, mamy podobny problem jak dla morskich farm wiatrowych – proste pomnożenie mocy w danej godzinie w sytuacji

silnego wiatru dałoby nam pracę z mocą przekraczającą moc maksymalną. Nie uwzględnilibyśmy też lepszej pracy nowoczesnych turbin przy słabszym wietrze.

Co z tym zrobić. To samo co w poprzednim punkcie dla morskich turbin wiatrowych: zrobić liniowe zwiększenie mocy turbin wiatrowych, tak, żeby w przypadku osiągnięcia swojej mocy maksymalnej pracowały z tą mocą i żeby jednocześnie w ciągu roku wytwarzały ilość energii zgodną ze swoim współczynnikiem mocy.

Kwestia 7. W przypadku farm wiatrowych wiemy już, że produkcja energii przez farmy wiatrowe obliczona na postawie warunków pogodowych 2021 roku będzie o 7% (25/27≈93%) mniejsza od średniej (ilustracja MD.1.). A jak wygląda sytuacja z fotowoltaiką?

Co z tym zrobić. Wystarczy sprawdzić w danych meteorologicznych udostępnianych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej: nasłonecznienie w 2021 r. o ok. 2% wyższe od średniej ([źródło](#)). Chcesz wiedzieć, jaka byłaby produkcja prądu w średnim pod względem nasłonecznienia roku – odejmij 2%. To tak marginalna korekta, że darujemy ją sobie.

Kwestia 8. Wróćmy do prosumentów. Produkowana przez ich instalacje energia nie była zużywana cały czas w takiej samej części: w ciągu dnia, gdy instalacje produkowały dużo prądu, ludzie byli w pracy i nie używali prądu w domu, do sieci trafiało go więcej. Z kolei gdy wracali i włączali czajniki, telewizory czy komputery, zużywało to tyle energii, że z tego co produkowała instalacja PV (późnym popołudniem i wieczorem zresztą mniej niż w środku dnia) na oddanie do sieci nie było nawet złamanego wata.

Co z tym zrobić. Zasadniczo podbija to pik dzienny prądu z PV w KSE, a ścina „boki” rano i wieczorem. Z sieciowego punktu widzenia bilansowania produkcji i zużycia jest to utrudnienie. Zostawmy to bez zmian, traktując jako kolejny przyczynek do stress-testów.

Opis pliku MS Excel do przygotowania danych wsadowych

[Plik do pobrania](#)

Arkusz „Dane źródłowe – prąd”

Tu wprowadzamy dane źródłowe godzina po godzinie, od wiersza 4, wszystkie dane pochodzą z [PSE](#).

Kolumna C – zużycie prądu w krajowej sieci elektroenergetycznej

Kolumna D – ilość prądu wprowadzana do sieci przez lądowe turbiny wiatrowe

Kolumna E – ilość prądu wprowadzana do sieci przez morskie turbiny wiatrowe (uwaga: ponieważ w 2021 r. w Polsce nie było morskich farm wiatrowych, tu występują zera, a dalsze obliczenia prowadzone są w oparciu o przeliczone dane z produkcji prądu przez farmy wiatrowe na lądzie)

Kolumna F – ilość prądu wprowadzana do sieci przez panele PV

	A	B	C	D	E	F
1			Zużycie prądu w PL (KSE) [GW]	Produkcja prądu Polska 2021 [GW] Dane oryginalne		
2				Wiatr ląd	Wiatr	PV
3	Godz. w roku	Suma	174 634	15,25	0,00	4,61
4	0	01.01.2021 00:30	15,29	0,54	0,00	0,00
5	1	01.01.2021 01:30	14,68	0,47	0,00	0,00
6	2	01.01.2021 02:30	14,10	0,43	0,00	0,00
7	3	01.01.2021 03:30	13,71	0,44	0,00	0,00
8	4	01.01.2021 04:30	13,61	0,43	0,00	0,00

Dodatkowo w kolumnie Q ustawić można parametry (wyjaśnione w części „Wprowadzenie”):

Wiatr na lądzie			
Moc zainstalowana na początku roku	[GW]		6,6
Moc zainstalowana na końcu roku	[GW]		7,3
Współczynnik zainstalowanej mocy obecnie	[%]		27%
Współczynnik zainstalowanej mocy w przyszłości	[%]		36%
Wiatr na morzu			
Współczynnik zainstalowanej mocy w przyszłości	[%]		50%
Fotowoltaika (PV)			
Moc zainstalowana na początku roku	[GW]		3,94
Moc zainstalowana na końcu roku	[GW]		7,12
Udział prosumentów	[%]		70%
Współczynnik autokonsumpcji prosumentów	[%]		20%

Arkusz „Przeliczenia – prąd”

Tu, na podstawie danych z poprzedniego arkusza, dokonywane są korekty opisane w pierwszej części dokumentu.

Kolumny A, B: kolejne godziny w roku

Kolumny D-F: wyniki końcowe przeliczeń, dla wygody przeniesione na początek arkusza

Kolumny H-J: dane wejściowe, przeniesione z arkusza „Dane źródłowe – prąd”

Kolumny K-Q: przeliczenia dla wiatru na lądzie

K: wiersz pomocniczy

L: przeliczenie dla „Kwestii 3”

M: przeliczenie produkcji prądu na 1 GW mocy zainstalowanej

N-Q: przeliczenie jak dla „Kwestii 4 i 6”. Dane finalne w kolumnie Q

Kolumny R-Y: przeliczenia dla wiatru na morzu. Analogicznie jak dla wiatru na lądzie. Dane finalne w kolumnie Y

Kolumna Z: przeliczenia dla PV jak dla „Kwestii 1 i 2”.

Arkusze „Dane źródłowe – temperatura”

Tu zbierane są dane o temperaturze powietrza, wykorzystywane przy obliczaniu zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków. W kolumnie C podawana jest średnia dzienna temperatura dla Warszawy, traktowana jako przybliżenie dla Polski. W kolumnach F-H dokonywane jest przeformatowanie danych na godziny. W obecnej wersji pomijana jest kwestia niższych temperatur w nocy, a wyższych w ciągu dnia. Ze względu na dużą bezwładność termiczną budynków oraz magazyny ciepła w docelowym systemie energetycznym uwzględnienie tej zmienności ma pomijalne znaczenie.

Arkusze „Dane finalne”

Dane gotowe do wykorzystania w symulatorze (dane z kolumn C-F do przekopiowania do arkusza symulatora w zakładce „Prąd – dane” do kolumn C-F; dane temperaturowe z kolumny G do przekopiowania w zakładce „Ciepło - dane i obliczenia” do kolumny E).

Możesz dokonać dowolnych zmian w danych, parametrach i algorytmach przeliczeniowych według swojego uznania i zaimportować je z arkusza „Dane finalne” do Symulatora.