

Prognozowanie krótkoterminowe profili odbiorczych i zdolności wytwórczych w klastrach energii

Streszczenie. Rozwój elektroenergetyki obywatelskiej na poziomie regionalnym i lokalnym wymaga podejmowania działań optymalizacyjnych, w tym realizacji założonych funkcji celu. Rozwój klastrów energii będzie generował potrzebę tworzenia narzędzi prognostycznych zarówno pod kątem prognozowania zapotrzebowania na moc i energię, jak również pod kątem optymalnego wykorzystania zdolności regulacyjnych istniejących w ramach struktur klastrów. W referacie omówiono wyniki stosowania wybranych modeli prognostycznych. Wykorzystane dane odwzorowują rzeczywiste profile zapotrzebowania i zdolności wytwórcze w rozdzielczości dobowo-godzinowej.

Abstract. The development of civil power engineering at the regional and local level requires undertaking optimization activities including the implementation of the assumed objective functions. The dynamic development of energy clusters will generate the need to create forecasting tools both in terms of forecasting demand for electric power and energy, as well as in terms of optimal use of regulatory capacity of existing structures within clusters. The article discusses the results of using selected forecasting models. The data used will be mapped to actual demand profiles and generating capacities in hourly granulation for every 24 hours. (**Short-term forecasting of demand and generation profiles in energy clusters**).

Słowa kluczowe: prognozowanie krótkoterminowe, zdolności wytwórcze i profile odbiorcze, klastrów energii, grupy taryfowe.

Keywords: Short-Term Forecasting, Generating Capacities and Demand Profiles, Energy Cluster, Tariff Group.

Wprowadzenie

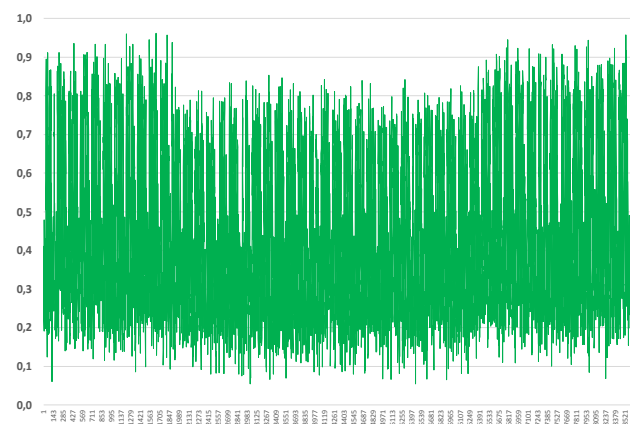
Klasy energii tworzone są w celu m.in. poprawy lokalnego bezpieczeństwa energetycznego, zmniejszenia energochłonności gospodarki, zwiększenia udziału OZE w krajowym miksie energetycznym, zmniejszenia emisji szkodliwych gazów oraz poprawy innowacyjności lokalnej gospodarki. Zgodnie z definicją klastrów energii to cywilnoprawne porozumienie dotyczące osób fizycznych, prawnych, jednostek naukowych, instytutów badawczych lub jednostek samorządu terytorialnego, dotyczące wytwarzania i równoważenia zapotrzebowania, dystrybucji lub obrotu energią z odnawialnych źródeł energii lub z innych źródeł lub paliw, w ramach sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV, na obszarze działania tego klastra nieprzekraczającym granic jednego powiatu lub 5 gmin (art. 2 pkt 15a Ustawy o OZE) [1]. Należy podkreślić, że mimo iż cele KE definiuje się na poziomie lokalnym, ich realizacja, poprzez efekt skali, może przynieść korzyści dalece wykraczające poza obszar gminy/powiatu i uwidaczniać się na poziomie regionalnym, a nawet krajowym [2].

Podstawowym zadaniem realizowanym przez klastr energii jest równoważenie energii wytwarzanej i pobieranej w ramach tego klastra [3], [4]. Z punktu widzenia koordynatora klastra ważnym aspektem jest uzyskiwanie prognoz zdolności wytwórczych (dla potrzeb artykułu nazwanych profilami) i profili odbiorczych o jak najwyższej dokładności. Za zadowalający poziom dokładności prognoz wyrażonych za pomocą wartości błędów MAPE, w analizowanym przykładzie, uznano poziom <2% dla prognoz wygasłych.

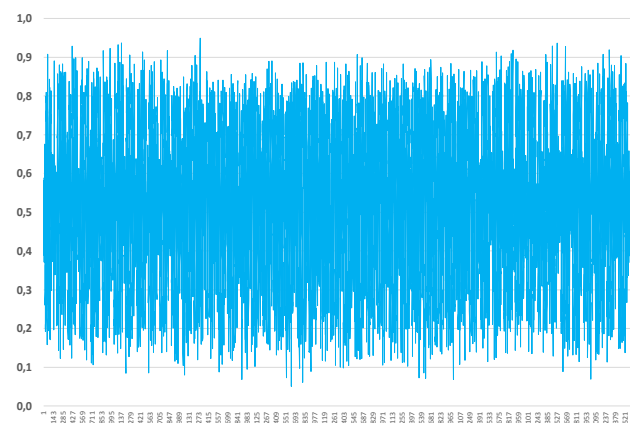
Profile odbiorcze

W przeprowadzonych badaniach uwzględniono trzy profile odbiorcze odzwierciedlające odbiorców zgrupowanych w trzech odrębnych grupach taryfowych: C11, C12a oraz C12b. Grupie C11 przyporządkowano uśredniony profil odbiorczy PO1 (rys. 1) będący średnią arytmetyczną dla 3 odbiorców. Grupie taryfowej C12a przyporządkowano odpowiednio uśredniony profil odbiorczy PO2 (rys. 2), wynikający z zapotrzebowania 4 różnych odbiorców. W przypadku grupy taryfowej C12b uśredniony profil PO3 (rys. 3) jest średnim arytmetycznym złożeniem

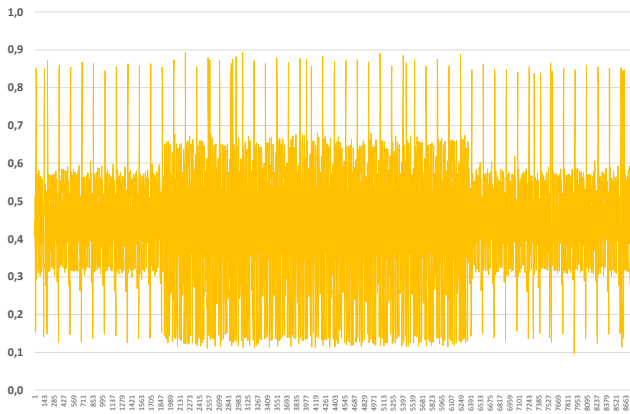
profilu 49 odbiorców. Przeprowadzony wybór liczby odbiorców podyktowany był potrzebą zapewnienia wyboru małych grup odbiorców (grupa taryfowa C11 i C12a) oraz dużej grupy odbiorców (grupa taryfowa C12b). Każdy z profili odbiorczych obejmujących wszystkie godziny z 2017 roku poddano normalizacji.



Rys. 1. Profil odbiorczy PO1 (grupa taryfowa C11)



Rys. 2. Profil odbiorczy PO2 (grupa taryfowa C12a)



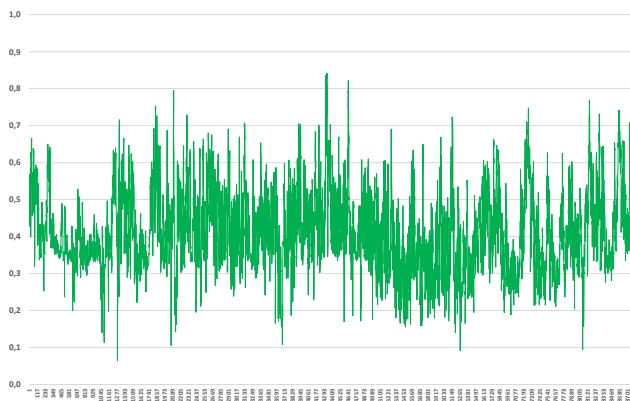
Rys. 3. Profil odbiorczy PO3 (grupa taryfowa C12b)

Największą zmiennością spośród profili odbiorczych charakteryzuje się profil PO1 (44,39%), następnie profil PO2 (36,96%) i profil PO3 (28,94%). Skośnością znacząco odbiegającą od wartości zerowej charakteryzuje się profil PO1 (0,42676). Współczynniki skośności pozostałych dwóch profili wynoszą odpowiednio PO2 (-0,19986), PO3 (0,11878). W przypadku PO1 i PO2 odnotowane wartości są ujemne (odpowiednio -0,86000 oraz -0,95973). Kurtроза dla profilu PO3 osiąga wartość 1,03105.

Profile zdolności wytwórczych

W przeprowadzonych badaniach zastosowano trzy znormalizowane profile zdolności wytwórczych. Każdy z profili zdolności wytwórczych stanowi średnią arytmetyczną profili zdolności wytwórczych źródeł kilku typów:

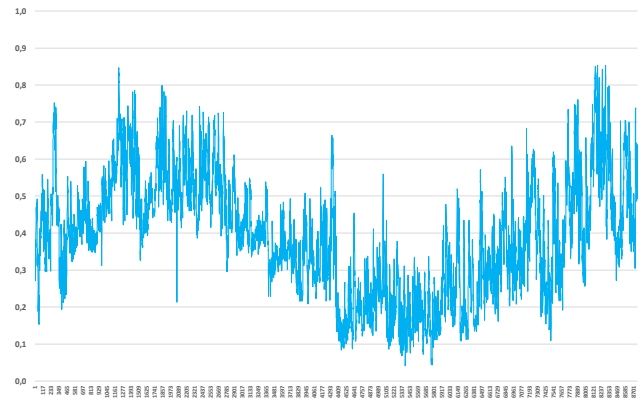
- profil zdolności wytwórczych PW1 obejmuje:
2 źródła wiatrowe, 1 źródło wodne, 1 źródło biogazowe,
1 źródło PV (rys. 4);
- profil zdolności wytwórczych PW2 obejmuje:
2 źródła wiatrowe, 2 źródła wodne, 1 źródło kogeneracyjne (rys. 5);
- profil zdolności wytwórczych PW3 obejmuje:
1 źródło wiatrowe, 1 źródło wodne, 1 źródło biogazowe,
1 źródło kogeneracyjne, 1 źródło PV (rys. 6).



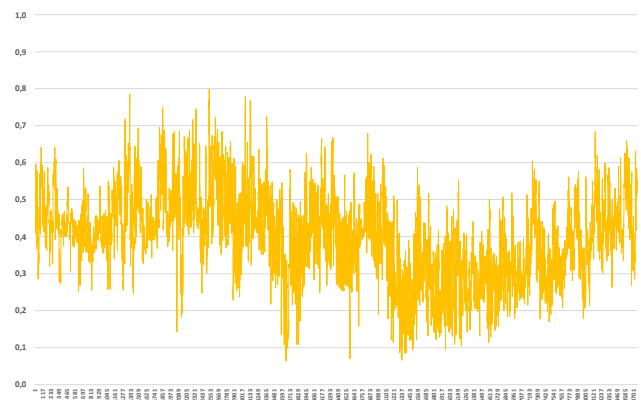
Rys. 4. Profil zdolności wytwórczych PW1 (4 typy źródeł)

Największą zmiennością spośród profili zdolności wytwórczych charakteryzuje się profil PW2 (40,52%), następnie profil PW3 (29,30%) i profil PW1 (26,55%). Skośnością znacząco odbiegającą od wartości zerowej charakteryzuje się profil PW1 (0,50529). Pozostałe dwa profile jedynie nieznacznie odbiegają od wartości zerowej - PW2 (0,18072), PW3 (0,02856). Kurtроза osiąga wartości mniejsze niż w przypadku profili odbiorczych. W przypadku

PW2 i PO3 odnotowane wartości są ujemne (odpowiednio -0,52956 oraz -0,10353). Kurtроза dla profilu PO1 osiąga wartość 0,16537.



Rys. 5. Profil zdolności wytwórczych PW2 (3 typy źródeł)



Rys. 6. Profil zdolności wytwórczych PW3 (5 typów źródeł)

Zastosowane metody i modele prognostyczne

W symulacjach prognostycznych wykonanych w trybie *ex post* wykorzystano pięć metod. Dwie pierwsze z metod to metody naiwne. W pierwszej z metod naiwnych (MN 1) założono, że prognozowana wartość mocy (zapotrzebowanej; wytwarzanej) będzie taka sama jak w dniu poprzednim. W drugiej metodzie naiwnej (MN 2) założono, że analogiczna wielkość będzie taka sama jak siedem dni kalendarzowych wcześniej. Trzecim podejściem prognostycznym było zastosowanie modelu wykładniczego Browna (M. Browna). Czwarte podejście prognostyczne polegało na zastosowaniu modelu Wintersa (M. Wintersa). Ostatnim modelem prognostycznych zastosowanym do symulacji prognostycznych była metoda adaptacyjna regresyjna Earth wykorzystująca krzywe sklejane (ang. *Enhanced Adaptive Regression Through Hinges* - M. Earth) [5], znana jako metoda Multivariate Adaptive Regression Splines, która w 1991 r. została zaproponowana przez amerykańskiego naukowca Jerome H. Friedman'a.

Dla analizowanych metod (modeli) zastosowano następujące oznaczenia wraz ze skrótowym opisem:

- MN 1 – najprostsza z metod naiwnych (1 doba wstecz);
- MN 2 – metoda naiwna (7 dób wstecz);
- M. Browna – model Browna jest najprostszą z metod wykładniczego (ang. *Exponential Smoothing*);

Metoda najczęściej stosowana dla szeregów bez wyraźnego trendu i przy braku tendencji rozwojowej oraz o wahaniach wynikających z czynników losowych. Szereg czasowy poddawany analizie wygładzany jest za pomocą

średniej ruchomej (wagi wyznaczone są w oparciu o prawo wykładnicze). Zastosowanie wygładzania skutkuje m.in. usunięciem szumu, pozostawiając jedynie sygnał, ułatwiając prognozowanie krótkoterminowe.

- M. Wintersa – model Wintersa należący do grupy metod wygładzania szeregów czasowych z występującymi wahaniami sezonowymi, przypadkowymi i tendencją rozwojową;

W artykule przeanalizowano jakość prognozowania wygasłego zarówno dla modelu addytywnego jak i multiplikatywnego.

- M. Earth – metoda wielozmiennej regresji adaptacyjnej z wykorzystaniem funkcji sklepanych.

Metoda zaproponowana w 1991 r., stosowana jest zarówno do rozwiązywania zagadnień regresyjnych, jak i klasyfikacyjnych. Metoda poszukuje wartości zmiennych zależnych na podstawie zmiennych niezależnych. Zaletą tej metody jest brak konieczności określania założeń dotyczących zależności między zmiennymi zależnymi (wyjściowymi) a zmiennymi niezależnymi (wejściowymi) czyli prognozowanymi).

Metoda naiwna MN 1 (opóźnienie 1 doby)

Zastosowanie prognozowania wygasłego w oparciu o metodę naiwną zakładającą wystąpienie w kolejnej dobie godzinowych wartości zapotrzebowania na moc takich samych jak dobę wcześniej daje, w odniesieniu do prognozowania profili odbiorczych, najmniej korzystne rezultaty w porównaniu do wyników uzyskiwanych przy zastosowaniu pozostałych metod. Metoda ta najmniej skutecznie radziła sobie z prognozowaniem profilu PO1 (28,87%), następnie z prognozowaniem profilu PO2 (21,39%). Najniższą wartość błędu MAPE dla tej metody uzyskano w przypadku prognozowania profilu PO3 (19,66%). Uśrednione błędy MAPE dla trzech analizowanych profili wskazują, że zastosowanie metody naiwnej MN 1 dawało wyniki prognoz wygasłych o najniższej skuteczności (23,31%). Analogiczna analiza w odniesieniu do profili zdolności wytwórczych wskazuje, że uzyskane wyniki (średnia arytmetyczna dla trzech profili na poziomie 22,21%) były dokładniejsze w porównaniu do metody MN 2 (analogiczny wynik średni arytmetyczny na poziomie 29,45%). Najmniej korzystne wyniki uzyskano dla profilu PW2 (24,47%), następnie dla profilu PW1 (22,34%). Największą dokładnością charakteryzował się profil PW3 (19,82%). Dokładność prognoz uzyskanych metodą MN 1 należy uznać za bardzo słabą.

Metoda naiwna MN 2 (opóźnienie 7 dób)

Prognozowanie profili odbiorczych, podobnie jak w przypadku metody MN 1, charakteryzowało się największą skutecznością w przypadku profilu PO3 (5,98%); na kolejnych pozycjach znalazły się profil PO2 (15,42%) oraz profil PO3 (21,99%). Odnotowano znaczące zwiększenie dokładności prognozy wygasłej dla PO3 na tle pozostałych profili odbiorczych i na tle metody MN 1.

Prognozowanie wygasłego profilu zdolności wytwórczych przy wykorzystaniu metody MN 2 nie dało korzystniejszych wyników w porównaniu do metody MN 1. Najniższy błąd prognozy wygasłej uzyskano dla profilu PW3 (26,23%), następnie dla profilu PW1 (28,33%) i dla profilu PW2 (33,79%). Dokładność prognoz uzyskanych za pomocą metody MN 2 należy uznać za bardzo słabą, za wyjątkiem przypadku profilu PO3.

Metoda wygładzania wykładniczego Browna

Dla metody wygładzania wykładniczego Browna przeprowadzono symulacje optymalizacyjne współczynników α dla każdej z metod obliczania

pierwszego momentu czasowego Y_1 . W pierwszej opcji założono, że moment ten będzie równy wartości Y_1 , w drugiej, że będzie stanowił średnią z 3 początkowych wyrazów szeregu czasowego, a w trzeciej opcji będzie średnią z 5 początkowych wartości szeregu czasowego. Wyniki symulacji prognoz wygasłych, wyrażone za pomocą błędów MAPE, przedstawia tabela 1, zarówno dla profili odbiorczych, jak i profili zdolności wytwórczych. Założone parametry modeli prognostycznych prezentuje tabela 2. Skrót p.w. odzwierciedla pierwsze wyrazy szeregu czasowego. Jedyne zauważalne różnice w jakości prognozowania wygasłego odnotowywano dla profilu PO1. Zastosowanie metody M. Browna dawało najkorzystniejsze rezultaty w odniesieniu do prognozowania profili zdolności wytwórczych. Najwyższą skutecznością charakteryzował się profil PW2 (6,51%), następnie PW1 (7,68%) i PW3 (7,94%). Profile odbiorcze o niższej jakości prognozowania opisuje błąd MAPE na poziomie 13,77% (PO3), 18,61% (PO2) i ok. 22% (PO1). Dokładność prognoz uzyskanych metodą M. Browna dla profili odbiorczych należy uznać za bardzo słabą, natomiast dla profili zdolności wytwórczych jako słabą.

Tabela 1. Błędy MAPE ex post dla profili odbiorczych i wytwórczych M. Browna

1. moment czasowy	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
$Y_1 = Y_1$	22,95	18,62	13,77	7,68	6,51	7,94
$Y_1 = \text{śr. z 3 p.w.}$	22,05	18,61	13,77	7,68	6,51	7,94
$Y_1 = \text{śr. z 5 p.w.}$	22,94	18,61	13,77	7,68	6,51	7,94

Tabela 2. Wartości współczynnika α M. Browna

α	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
$Y_1 = Y_1$	0,90	0,96	1,00	0,10	0,10	0,10
$Y_1 = \text{śr. z 3 p.w.}$	0,88	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$Y_1 = \text{śr. z 5 p.w.}$	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Metoda wygładzania wykładniczego Wintersa

Zastosowanie modelu wygładzania wykładniczego Wintersa dało wyniki, które zamieszczono w tabeli 3 (dla ustawień parametrów zamieszczonych w tabelach 4, 5, 6). Dla tej metody przeprowadzono symulacje optymalizacyjne współczynników α , β , γ dla modelu multiplikatywnego i dla modelu addytywnego. Współczynnik r pozostawał na niezmiennym poziomie (wartość 3).

Tabela 3. Błędy MAPE ex post dla profili odbiorczych i wytwórczych M. Wintersa

Model	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
Multiplikatywny	23,25	18,73	14,22	7,77	6,69	8,13
Addytywny	23,26	18,71	14,26	7,82	6,79	8,16

Tabela 4. Wartości współczynnika α M. Wintersa

α	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
Multiplikatywny	0,86	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96
Addytywny	0,63	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96

Tabela 5. Wartości współczynnika β M. Wintersa

β	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
Multiplikatywny	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00
Addytywny	0,45	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03

Tabela 6. Wartości współczynnika γ M. Wintersa

γ	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
Multiplikatywny	0,08	0,06	0,14	3,00	0,09	0,33
Addytywny	0,11	0,13	0,17	0,16	0,17	0,16

Najniższe wartości błędu MAPE uzyskano dla modelu multiplikatywnego, zarówno w odniesieniu do prognozowania wygasłego profili odbiorczych, jak i zdolności wytwórczych. Należy zaznaczyć, że różnica w porównaniu do modelu addytywnego dla średniej arytmetycznej profili odbiorczych wyniosła zaledwie 0,01% (18,73%, w porównaniu do 18,74%) natomiast dla profili zdolności wytwórczych 0,06% (7,53%, w porównaniu do

7,59%). Najniższe wartości błędów dla modelu multiplikatywnego osiągnięte zostały dla profili zdolności wytwórczych (odpowiednio 6,69% dla PW2; 7,77% dla PW1 oraz 8,13% dla PW3). W odniesieniu do profili odbiorczych uzyskane wartości błędów były ponad dwukrotnie wyższe – odpowiednio 14,22% dla PW3; 18,73% dla PW2; 23,25 dla PW1.

Metoda Earth

Zgodnie z metodyką opracowywania prognoz z zastosowaniem metody Earth niezbędne jest przygotowanie zbioru zmiennych objaśniających (ZO), do których zaliczono:

- ZO1 - godzinę doby (jako zmienna jakościowa);
- ZO2 - dzień tygodnia;
- ZO3 – miesiąc;
- ZO4 - święta oficjalne (kodowanie binarne);
- ZO5 - trzecia środa miesiąca (kodowanie binarne);
- ZO6-Z12 - dzień tygodnia (kodowanie binarne);
- ZO13 - logarytm z wartości zmiennej objaśnianej (PO1-PO3 oraz PW1-PW3);
- ZO14 - pierwiastek kwadratowy z wartości zmiennej objaśnianej (PO1-PO3 oraz PW1-PW3);
- ZO15 - iloczyn wartości zmiennej objaśnianej, jej pierwiastka kwadratowego oraz Liczby Pi.

Wstępne symulacje wykazały, że pierwiastek kwadratowy z wartości zmiennej objaśnianej (ZO14) jest najkorzystniejszą zmienną objaśniającą (zarówno dla profili odbiorczych, jak i profili zdolności wytwórczych). Dodatkowymi zmiennymi objaśniającymi dającymi najkorzystniejsze rezultaty są ZO2-ZO12 oraz ZO1. Wyniki symulacji prognostycznych *ex post* dla profili odbiorczych przedstawia tabela 7, natomiast w odniesieniu do profili zdolności wytwórczych tabela 8.

Tabela 7. Błędy MAPE *ex post* dla profili odbiorczych - minima

Metoda/ Model	PO1	PO2	PO3	Średnia Arytm.
MN 1	28,87	21,39	19,66	23,31
MN 2	21,99	15,42	5,98	14,46
M. Browna	22,05	18,61	13,77	18,14
M. Wintersa	23,25	18,73	14,22	18,73
M. Earth	1,73	1,35	1,30	1,46

Tabela 8. Błędy MAPE *ex post* dla profili zdolności wytwórczych - minima

Metoda/ Model	PW1	PW2	PW3	Średnia Arytm.
Naiwna 1	22,34	24,47	19,82	22,21
Naiwna 2	28,33	33,79	26,23	29,45
Browna	7,68	6,51	7,94	7,38
Wintersa	7,77	6,69	8,13	7,53
Earth	0,28	1,80	1,08	1,05

Tabela 9. Błędy ME metody Earth dla profili zdolności wytwórczych i profili odbiorczych

Scenariusz	<i>ex post</i>		
	PO1	PO2	PO3
PW1	-0,03	-0,11	-0,03
PW2	-0,06	-0,14	-0,06
PW3	-0,05	-0,13	-0,05

Tabela 10. Błędy MAPE metody Earth dla profili odbiorczych i profili zdolności wytwórczych

Błąd	PO1	PO2	PO3	PW1	PW2	PW3
<i>ex post</i>	1,73	1,35	1,30	0,28	1,80	1,08
<i>ex ante</i>	23,44	18,77	14,03	7,69	7,00	8,11
<i>ex ante - ex post</i>	21,71	17,42	12,73	7,41	5,20	7,03

Dalsze analizy porównawcze profili zdolności wytwórczych z poszczególnymi profilami odbiorczymi przeprowadzono z zastosowaniem metody Earth (ze

względu na najkorzystniejsze wyniki). Wyniki tych analiz dla błędu średniego (ang. *Mean Average* – ME) prezentuje tabela 9. Wartości błędu ME wskazują, że metoda Earth w kontekście optymalizacji założonej funkcji celu dla profili zdolności wytwórczych opisanych scenariuszami PW1, PW2 oraz PW3 skutkuje niedoszacowaniami prognoz po stronie zagregowanych odbiorców i reprezentowanych przez nich profili odbiorczych. Najmniejsze dokładności prognoz odnotowuje się dla każdego z profili zdolności wytwórczych w odniesieniu do profilu odbiorczego reprezentowanego przez scenariusz PO2. Takie samo porównanie dla profili reprezentowanych przez PO1 i PO3 skutkuje uzyskaniem takich samych rezultatów dla każdego z profili zdolności wytwórczych.

Podsumowanie i wnioski

Badania przeprowadzono w oparciu o 5 metod prognostycznych obejmujących 2 metody naiwne, 2 metody wygładzania wykładniczego oraz 1 metodę regresyjną. W przypadku metody naiwnej z opóźnieniem dobowym i tygodniowym zarówno w odniesieniu do profili odbiorczych jak i profili zdolności wytwórczych uzyskano skuteczność *ex post* wyrażoną wartościami błędów MAPE jako dyskwalifikującą. Modele wygładzania wykładniczego Browna i Wintersa w przypadku profili odbiorczych również dały niezadowolający poziom dokładności prognoz. Również w przypadku profili zdolności wytwórczych uzyskano słabą dokładność prognoz. Jedynie przy zastosowaniu metody regresyjnej Earth możliwe było uzyskanie zadowolających wyników – wyrażonych wartością błędów MAPE – dla prognoz wygasłych (poziom <2%). Najniższy błąd MAPE dla profili odbiorczych odnotowano dla profilu PO3, a dla profili zdolności wytwórczych dla profilu PW2 (tab. 10). W przypadku profili odbiorczych uzyskana jakość prognoz jest niewystarczająca, natomiast w przypadku profili zdolności wytwórczych dopuszczalna, jednakże wymagająca pogłębionych dalszych badań optymalizacyjnych. Podobne tendencje odnotowano dla prognozowania *ex ante*. Szeregi czasowe poddano losowej modyfikacji w przedziale $\pm 20\%$ dla każdej wartości godzinowej. Uzyskano niezadowolającą skuteczność dla profili odbiorczych i przeciętną skuteczność dla profili zdolności wytwórczych. Zastosowane metody i modele prognostyczne należą do prostych w budowie i przystępnych w kontekście możliwości prognostycznych niedużych klastrów energii, zarówno pod względem nakładów roboczo-godzin jak i kosztu ich wdrożenia i stosowania.

Autorzy: mgr inż. Rafał Czapaj, PSE Innowacje Sp. z o.o., Al. Jerozolimskie 132, 02-305 Warszawa, E-mail: rafal.czapaj@pse.pl; dr inż. Mateusz Szablicki, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, E-mail: mateusz.szablicki@pse.pl; dr inż. Piotr Rzepka, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, E-mail: piotr.rzepka@pse.pl; dr inż. Maciej Sołtysik, Ekspert, PSE Innowacje Sp. z o.o., Al. Jerozolimskie 132, 02-305 Warszawa, E-mail: maciej.soltysik@pse.pl

LITERATURA

- [1] Ustawa z 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2015 r. poz. 478, 2365, z 2016 r. poz. 925, 1579)
- [2] Koncepcja funkcjonowania klastrów energii w Polsce, Opracowanie na zlecenie Skarbu Państwa – Ministra Energii, Konsorcjum w składzie KAPE S.A. i inni
- [3] Rzepka P., Sołtysik M., Szablicki M.: Modele funkcjonowania klastrów energii. Energetyka 2018 nr 2, s. 75-80
- [4] Rzepka P., Sołtysik M., Szablicki M.: Klastry energii – idea wdrażania w KSE. Materiały XX Seminarium ENERGOTESTU „Automatyka w elektroenergetyce”, Krynica Zdrój, kwiecień 2017, s. 7.1-7.8.
- [5] Witryna internetowa: www.cran.r-project.org/package=earth.