

WYKORZYSTANIE MODELI TAKAGI–SUGENO DO KRÓTKOTERMINOWEGO PROGNOZOWANIA ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ ODBIORCÓW WIEJSKICH

Małgorzata Trojanowska

Katedra Energetyki Rolniczej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Jerzy Małopolski

Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Opracowano modele z wnioskowaniem typu Takagi–Sugeno o gaussowskich funkcjach przynależności w przestrzeni wejściowej do krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorców wiejskich. Ze względu na charakter zmienności obciążeń opracowano odrębne modele dla typowych dni tygodnia. Przeprowadzona analiza wykazała przydatność modeli Takagi–Sugeno do predykcji z wyprzedzeniem godzinowym i ich konkurencyjność w stosunku do rozmytych modeli Mamdaniego.

Słowa kluczowe: energia elektryczna, prognozowanie krótkoterminowe, modele rozmyte

Wprowadzenie

Prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną jest zadaniem szczególnie ważnym dla spółek dystrybucyjnych trudniących się jej dostawą. Jakość prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną, zwłaszcza godzinowych z wyprzedzeniem dobowym, ma znaczący wpływ na wyniki finansowe tych przedsiębiorstw. Stąd nie ustają poszukiwania coraz bardziej efektywnych metod prognostycznych. W ostatnich latach, zarówno w kraju jak i za granicą, coraz powszechniej wykorzystuje się do celów predykcji metody sztucznej inteligencji, zwłaszcza sztuczne sieci neuronowe, gdyż w wielu przypadkach okazują się one bardziej skuteczne aniżeli tzw. metody klasyczne. Pojawiają się też opracowania wskazujące na przydatność do tych celów modeli rozmytych.

Najważniejszymi i najczęściej stosowanymi modelami rozmytymi są modele Mamdaniego, stanowiące jakościowy opis systemu najbliższy językowi naturalnemu [Mamdani 1974, 1977]. W pracy Trojanowskiej i Małopolskiego [2007] wykazano, że zastosowanie do krótkoterminowej predykcji zapotrzebowania na energię elektryczną modeli z wnioskowaniem typu Mamdani daje prognozy dobrej jakości. Wydaje się, że dokładność prognoz można jeszcze zwiększyć wykorzystując do celów predykcji rozmyte modele z wnioskowaniem typu Takagi–Sugeno [Takagi i Sugeno 1985].

Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbudowanie predykcyjnych modeli rozmytych z wnioskowaniem typu Takagi–Sugeno (TK) przydatnych do lokalnego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną z wyprzedzeniem godzinowym. Praca zawiera także porównania jakości prognoz wyznaczonych na podstawie zbudowanych w pracy modeli TK z predykcją w oparciu o rozmyte modele Mamdaniego (M).

Metodyka pracy

Cel pracy zrealizowano w oparciu o dane dotyczące zapotrzebowania na moc elektryczną odbiorców wiejskich z terenów Małopolski. Do predykcji tego zapotrzebowania wykorzystano modele rozmyte z wnioskowaniem typu Takagi–Sugeno (TK), które są modelami alternatywnymi wobec modeli Mamdaniego, wyróżniającymi się funkcyjną postacią konkluzji reguł. Najczęściej są to funkcje liniowe.

W przestrzeniach rozważań zmiennych wejściowych modeli Takagi–Sugeno zbiory rozmyte mają zazwyczaj trapezowe lub gaussowskie funkcje przynależności. Ponieważ użycie pierwszego typu zbiorów rozmytych wymaga znacznie większej liczby reguł modeli, w pracy zastosowano modele Takagi–Sugeno o gaussowskich funkcjach przynależności.

Przy budowie prognostycznych modeli Takagi–Sugeno dążono do opracowania takich modeli, które opisywałyby dokładnie przebieg obciążenia, a jednocześnie miały możliwie jak najmniejszą liczbę zmiennych wejściowych i jak najprostszą strukturę. Cel ten osiągnięto w sposób opisany w publikacji Trojanowskiej i Małopolskiego [2007].

W pracy funkcje przynależności zbiorów rozmytych A_i ($i = 1, \dots, m$), określonych w przestrzeni wejściowej, są symetrycznymi funkcjami Gaussa, a konkluzje reguł modeli są funkcjami liniowymi. Za wartość i -tego odchylenia standardowego przyjęto jedną trzecią odległości i -tego centrum od centrum jego najbliższego sąsiada. Dzięki temu bazy reguł można przedstawiać w postaci:

$$R1: \text{JEŚLI } (x_1 \text{ blisko } c_{11}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_r \text{ blisko } c_{1r}) \text{ TO } (y = a_{10} + a_{11}x_1 + \dots + a_{1r}x_r) \quad (1)$$

$$\vdots$$

$$Rm: \text{JEŚLI } (x_1 \text{ blisko } c_{m1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_r \text{ blisko } c_{mr}) \text{ TO } (y = a_{m0} + a_{m1}x_1 + \dots + a_{mr}x_r),$$

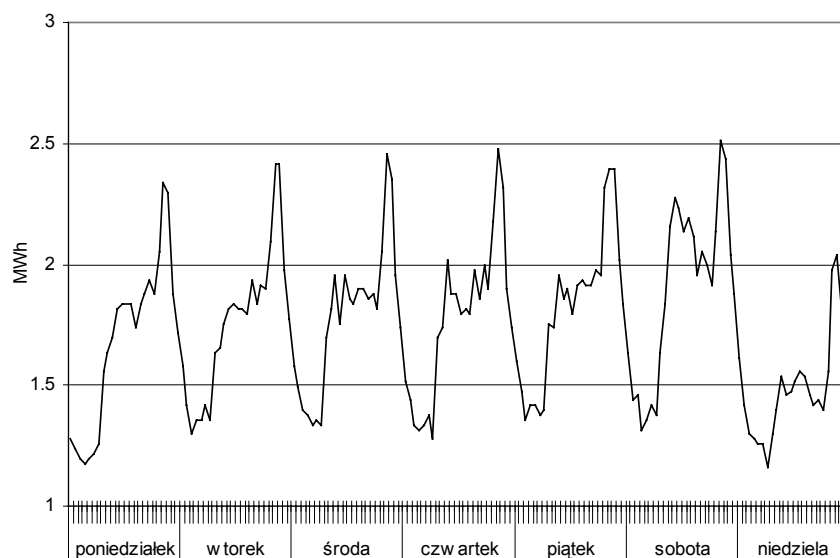
gdzie:

- x_1, \dots, x_r – wejścia systemu,
- y – wyjście systemu,
- c_{i1}, \dots, c_{ir} – współrzędne centrum zbioru A_i ,
- a_{ik} – współczynniki funkcji liniowej,
- $i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, r$.

Wyniki badań

Do opracowania rozmaitych modeli prognostycznych posłużono się wynikami pomiarów godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną grupy odbiorców większych zasilanych z wybranego GPZ–tu w latach 2003–2005. Grupa ta jest w miarę jednorodna pod względem użytkowania energii elektrycznej i stosunkowo nieliczna. Dlatego zużycie energii charakteryzuje duża zmienność zarówno w ciągu doby, jak i tygodnia. Jego przebieg dla wybranego z okresu badań tygodnia zaprezentowano na rysunku 1. Analiza omawianego procesu pozwoliła wyodrębnić okresowość tygodniową oraz pseudookresowość dobową, w następstwie czego wyróżniono cztery charakterystyczne rodzaje dni, tj. poniedziałek, pozostałe dni robocze tygodnia, sobotę i niedzielę. Przebieg obciążeń w każdym z wyróżnionych dni zamodelowano w oparciu o wybrane dane pomiarowe z lat 2003–2004. Pozostałe dane posłużyły do testowania modeli.

Ponieważ zaobserwowano istotną zależność wielkości zapotrzebowania na energię elektryczną w danej godzinie od wielkości tego zapotrzebowania w godzinach poprzednich, wyboru zmiennych wejściowych do modeli dokonano ze zbioru wartości obciążenia godzinowego w zakresie opóźnień od 1 do 168 godzin (x_1, \dots, x_{168}). Tabela 1 przedstawia wyniki doboru zmiennych wejściowych do poszczególnych modeli oraz liczbę ich reguł. Przykładowo podano też bazę reguł modelu dla dni roboczych tygodnia od wtorku do piątku.



Rys. 1. Przebieg zmienności zapotrzebowania na energię elektryczną w okresie od 7 do 13 kwietnia 2003 roku

Fig. 1. Trajectory of electric energy demand variability in the period from April 7 until 13, 2003

Tabela 1. Wyniki doboru zmiennych wejściowych i liczby reguł modeli Takagi–Sugeno godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną w latach 2003–2004
 Table 1. Results of selecting input variables and the number of rules in Takagi–Sugeno models of hourly demand for electric energy in years 2003–2004

Dzień tygodnia	Zmienne wejściowe do modelu	Liczba reguł modelu
Poniedziałek	$x_1, x_{47}, x_{72}, x_{73}, x_{168}$	8
Pozostałe dni robocze	$x_1, x_{24}, x_{25}, x_{168}$	5
Sobota	$x_1, x_{24}, x_{130}, x_{168}$	5
Niedziela	$x_1, x_{48}, x_{50}, x_{168}$	5

- R1: JEŚLI (x_1 blisko 1,86) I (x_{24} blisko 1,53) I (x_{25} blisko 2,47) I (x_{168} blisko 2,27)
 TO ($y = 0,15 + 0,32x_1 + 0,29x_{24} - 0,31x_{25} + 0,74x_{168}$)
- R2: JEŚLI (x_1 blisko 2,19) I (x_{24} blisko 1,93) I (x_{25} blisko 1,90) I (x_{168} blisko 2,05)
 TO ($y = 0,01 + 0,45x_1 + 0,74x_{24} - 0,38x_{25} + 0,19x_{168}$)
- R3: JEŚLI (x_1 blisko 1,74) I (x_{24} blisko 2,03) I (x_{25} blisko 2,47) I (x_{168} blisko 1,81)
 TO ($y = 1,59 + 0,57x_1 + 0,19x_{24} - 0,44x_{25} - 0,12x_{168}$) (2)
- R4: JEŚLI (x_1 blisko 1,26) I (x_{24} blisko 1,26) I (x_{25} blisko 1,53) I (x_{168} blisko 1,79)
 TO ($y = 0,04 + 0,42x_1 + 0,60x_{24} - 0,39x_{25} + 0,34x_{168}$)
- R5: JEŚLI (x_1 blisko 1,48) I (x_{24} blisko 1,70) I (x_{25} blisko 2,10) I (x_{168} blisko 1,47)
 TO ($y = 0,33 + 0,41x_1 + 0,71x_{24} - 0,44x_{25} + 0,15x_{168}$)

W oparciu o wyznaczone, na podstawie opracowanych modeli, prognozy wygasłe wyliczono średnie absolutne błędy prognoz *ex post* – MAPE [Dittman 2003], jako najczęściej stosowane wskaźniki oceny jakości predykcji. Uzyskane wyniki przykładowo dla zbioru testującego z 2005 r. przedstawiono w tabeli 2. W tabeli tej zamieszczono również wartości analogicznych błędów prognoz wyznaczonych w oparciu o modele Mamdaniego.

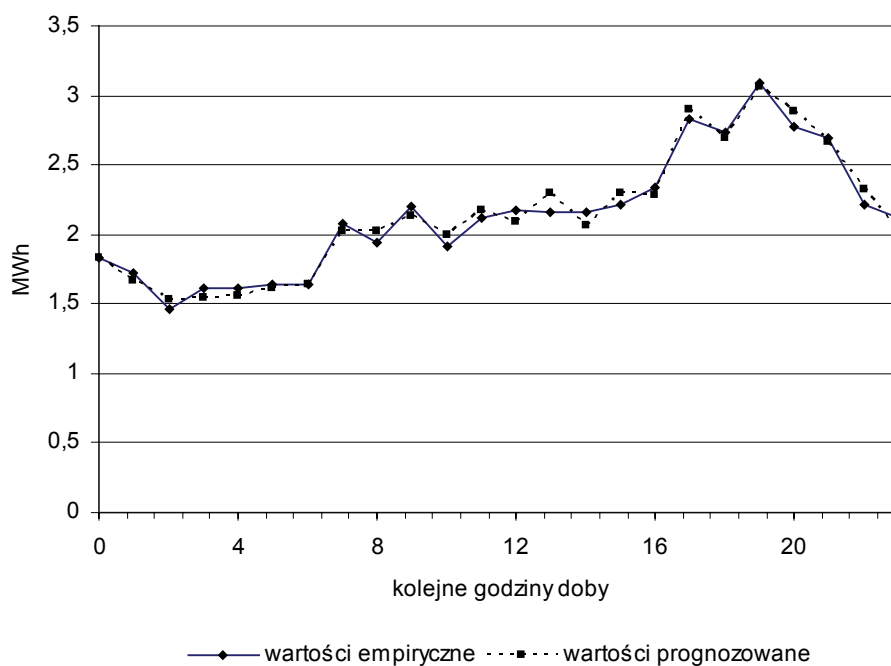
Tabela 2. Średnie absolutne błędy prognoz *ex post* godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną wyznaczonych w oparciu o modele Takagi–Sugeno i modele Mamdaniego
 Table 2. Mean absolute errors of *ex post* forecasts of hourly demand for electric energy, determined according to Takagi–Sugeno models and Mamdani models

Dzień tygodnia	MAPE [%]	
	Modele Takagi-Sugeno	Modele Mamdaniego
Poniedziałek	4,15	4,07
Pozostałe dni robocze	3,72	3,80
Sobota	4,44	4,67
Niedziela	3,80	3,87
Wszystkie dni	3,90	3,97

Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań wykazały użyteczność przedstawionych w pracy rozmytych modeli Takagi–Sugeno o gaussowskich funkcjach przynależności do krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorców wiejskich. Obliczone zgodnie z tymi modelami prognozy poprawnie odtwarzają przebieg zapotrzebowania godzinowego (rys. 2), a błędy MAPE tylko w sporadycznych przypadkach przekraczają 4%, co pozwala uznać prognozy za dobre [Zeliaś i in. 2004].

Przydatność modeli Takagi-Sugeno do predykcji krótkoterminowej wydaje się też być konkurencyjna w stosunku do modeli Mamdaniego, gdyż błędy prognoz wyznaczonych w oparciu o modele TK są nieco mniejsze niż obliczonych na podstawie rozmytych modeli Mamdaniego.



Rys. 2. Przebieg godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną i prognoza wygasła tego zapotrzebowania określona na zbiorze uczącym dla przykładowej doby zimowej

Fig. 2. Trajectory of hourly demand for electric energy, and expired forecast of this demand determined on the basis of teaching set for a model winter day

Bibliografia

- Dittman P.** 2003. Prognozowanie w przedsiębiorstwie. Oficyna Ekonomiczna. Kraków. ISBN 83-89355-05-1.
- Mamdani E. H.** 1974. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proceedings IEEE, No. 121 (12). s. 1585–1588.
- Mamdani E. H.** 1977. Applications of fuzzy algorithms to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE Transactions on Computers 1977, vol. C-26, No.12. s. 1181–1182.
- Takagi T., Sugeno M.** 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, No. 1. s. 116–132.
- Trojanowska M., Małopolski J.** 2007. Krótkoterminowe prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorców wiejskich przy wykorzystaniu modeli Mamdaniego. Problemy Inżynierii Rolniczej Nr 3(57). s. 35–42. ISSN 1231-0093.
- Zeliaś A., Pawelek B., Wanat S.** 2004. Prognozowanie ekonomiczne. WN PWN Warszawa. ISBN 83-01-14043-7.

USING THE TAKAGI–SUGENO MODELS FOR SHORT-TERM FORECASTING OF RURAL CONSUMERS' DEMAND FOR ELECTRIC ENERGY

Abstract. Models with concluding, Takagi–Sugeno type, with Gaussian functions of affiliation in entry space were developed for short-term forecasting of rural consumers' demand for electric energy. Due to loads variability character separate models were developed for typical week days. Completed analysis proved usability of the Takagi-Sugeno models for prediction with hourly advance, and their competitiveness compared to Mamdani fuzzy models.

Key words: electric energy, short-term forecasting, fuzzy models

Adres do korespondencji:

Małgorzata Trojanowska; e-mail: trojanowska@ur.krakow.pl
Katedra Energetyki Rolniczej
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116
30–149 Kraków