

*Małgorzata Trojanowska, Jerzy Małopolski**
Zakład Energetyki Rolniczej
**Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki*
Akademia Rolnicza w Krakowie

PORÓWNANIE PRZYDATNOŚCI WYBRANYCH MODELI ROZMYTYCH DO PREDYKCJI ZAPOTRZEBOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA TERENACH WIEJSKICH

Streszczenie

W pracy porównywano przydatność opartych na teorii zbiorów rozmytych modeli Mamdaniego i modeli Takagi-Sugeno do prognozowania miesięcznego zapotrzebowania energii elektrycznej na terenach wiejskich. Posłużono się przy tym danymi dotyczącymi sprzedaży energii elektrycznej przez wybraną spółkę dystrybucyjną odbiorcom wiejskim z obszaru województwa małopolskiego w latach 1993–2002. Przeprowadzone obliczenia wykazały większą trafność prognoz opracowanych w oparciu o modele Takagi-Sugeno.

Słowa kluczowe: energia elektryczna, prognoza, modele rozmyte

Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój badań nad metodami modelowania rozmytego do zastosowań w sterowaniu, optymalizacji, wspomaganie podejmowania decyzji itp. Próbuje się także wykorzystywać modele rozmyte do celów predykcyjnych, a w szczególności do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Realia rynku energii elektrycznej, a zwłaszcza regulacje różnicujące ceny rozliczeniowe, skłaniają bowiem spółki odpowiedzialne za zaopatrzenie w energię do poszukiwania nowych metod dających bardziej dokładne prognozy sprzedaży energii elektrycznej. Zainteresowanie wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych do predykcji potrzeb elektroenergetycznych bierze się zaś stąd, że jest ona dogodnym narzędziem pozwalającym opisać niepewność i niedokładność danych wejściowych, które nieodłącznie towarzyszą procesowi prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną.

Cel i przedmiot pracy

Najczęściej spotykanymi modelami rozmytymi są modele z wnioskowaniem typu Mamdani oraz modele z wnioskowaniem typu Takagi-Sugeno. W związku z tym celem pracy było porównanie przydatności tych modeli do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną.

Cel pracy zrealizowano w oparciu o dane dotyczące miesięcznego zużycia energii przez odbiorców wiejskich jako charakterystycznej grupy użytkowników energii. Obliczenia niezbędne do opracowania modeli prognostycznych i porównania ich przydatności przeprowadzono w oparciu o sprawozdania miesięcznej sprzedaży energii elektrycznej w latach 1993-2002 odbiorcom wiejskim z obszaru województwa małopolskiego przez wybraną spółkę dystrybucyjną. Dotyczą one 292 tys. odbiorców. W tej liczbie mieści się ok. 125 tys. gospodarstw rolnych, z których 40% nie przekracza powierzchni 2 ha. Aktualnie średnie miesięczne zużycie energii elektrycznej przez statystycznego odbiorcę wiejskiego z obszaru województwa małopolskiego kształtuje się na poziomie 200 kWh, zmieniając się od ok. 180 kWh w miesiącu wrześniu do 240 kWh w grudniu.

Metodyka badań

Modele Mamdaniego [Mamdani 1974; Mamdani 1977] stanowią jakościowy opis systemu najbardziej bliski językowi naturalnemu. Wnioskowanie rozmyte przeprowadza się za pomocą bazy reguł postaci:

$$R1 : \text{JEŚLI } (x \text{ jest } A_1) \text{ TO } (y \text{ jest } B_1) \quad (1)$$

⋮

$$Rm: \text{JEŚLI } (x \text{ jest } A_m) \text{ TO } (y = B_m),$$

gdzie:

x – wejście systemu,

y – wyjście systemu,

$A_1 \dots A_m$ – zbiory rozmyte odniesienia w przestrzeni wejściowej X ,

$B_1 \dots B_m$ – zbiory rozmyte odniesienia w przestrzeni wyjściowej Y .

Stosując operator implikacji Mamdaniego, oblicza się stopień aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł według wzoru:

$$\mu_{R_i}(x,y) = \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)) \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

gdzie:

$\mu_{A_i}(x)$ – funkcja przynależności zbioru rozmytego A_i ,

$\mu_{B_i}(y)$ – funkcja przynależności zbioru rozmytego B_i .

Do przeprowadzenia wyostrzenia najczęściej stosuje się metodę wysokości. Wyjście systemu y oblicza się jako średnią ważoną wartości modalnych zbiorów rozmytych $B_1 \dots B_m$, gdzie wagami są stopnie aktywizacji konkluzji poszczególnych reguł. Wadą modeli Mamdaniego jest niemożność zawarcia w nich obiektywnej wiedzy o systemie w jawnej postaci, która to wiedza nie może być często wcielona w ramy zbiorów rozmytych. Tego rodzaju wiedza bywa jednak dostępna i może stanowić podstawę do modelowania rozmytego. Wady tej nie posiadają modele zaproponowane przez zespół kierowany przez Sugeno, a nazywane zazwyczaj modelami Takagi-Sugeno [Takagi i Sugeno 1985]. W modelach tych baza reguł ma postać:

$$R1 : \text{JEŚLI } (x \text{ jest } A_1) \text{ TO } (y \text{ jest } f_1(x)) \quad (3)$$

⋮

$$Rm: \text{JEŚLI } (x \text{ jest } A_m) \text{ TO } (y = f_m(x)),$$

gdzie:

x – wejście systemu,

y – wyjście systemu,

$A_1 \dots A_m$ – zbiory rozmyte odniesienia w przestrzeni wejściowej X ,

$f_1(x), \dots, f_m(x)$ – funkcje liniowe.

Stopień aktywizacji konkluzji reguł R_i równa się $\mu_{A_i}(x)$, $i = 1, \dots, m$. Jeśli x jest wejściem systemu, to wyjście systemu y oblicza się jako średnią ważoną wartości funkcji $f_1(x), \dots, f_m(x)$, gdzie wagami są stopnie aktywizacji konkluzji reguł R_1, \dots, R_m .

Ze względu na charakter zmienności miesięcznego zapotrzebowania na energię elektryczną budowano rozmyte modele Mamdaniego i Takagi-Sugeno opisujące zależność funkcyjną $x_t = f(x_{t-1}, x_{t-12})$, gdzie x_t jest zużyciem energii elektrycznej w t -tym miesiącu. Rozpatrywano modele Mamdaniego systemów z jednym wejściem i jednym wyjściem (tzw. systemy SISO) i modele Takagi-Sugeno systemów z dwoma wejściami i jednym wyjściem (tzw. systemy MISO). W modelach Mamdaniego funkcje przynależności zbiorów rozmytych określonych w dwuwymiarowej przestrzeni wejściowej są funkcjami Gaussa, a w przestrzeni wyjściowej określono singletony (w jednym punkcie wartość funkcji przynależności singletonu jest równa 1, a w pozostałych 0). Za wartość i -tego odchylenia standardowego przyjęto jedną trzecią odległości i -tego centrum od centrum jego najbliższego sąsiada. Wtedy bazę reguł można przedstawić w następujący sposób:

$$R1: \text{JEŚLI } (x_{t-1} \text{ blisko } a_{11}) \text{ I } (x_{t-12} \text{ blisko } a_{12}) \text{ TO } (x_t \text{ blisko } b_1) \quad (4)$$

⋮

$$Rm: \text{JEŚLI } (x_{t-1} \text{ blisko } a_{m1}) \text{ I } (x_{t-12} \text{ blisko } a_{m2}) \text{ TO } (x_t \text{ blisko } b_m)$$

gdzie:

- a_{i1}, a_{i2} – współrzędne centrum zbioru A_i ,
- b_i – wartość modalna zbioru B_i ,
- $i = 1, \dots, m$.

W modelach Takagi-Sugeno na każdym z wejść określano podzbiory rozmyte (podzbiory A_{11}, \dots, A_{1k} na pierwszym wejściu i podzbiory A_{21}, \dots, A_{2n} na drugim wejściu) o trapezowych funkcjach przynależności, spełniających warunek podziału jedności. Wtedy baza reguł ma postać:

$$R1: \text{ JEŚLI } (x_{t-1} \text{ jest } A_{11}) \text{ I } (x_{t-12} \text{ jest } A_{21}) \text{ TO } y_1 = b_{10} + b_{11}x_{t-1} + b_{12}x_{t-12} \quad (5)$$

.

$$Rm : \text{ JEŚLI } (x_{t-1} \text{ jest } A_{1k}) \text{ I } (x_{t-12} \text{ jest } A_{2n}) \text{ TO } y_m = b_{m0} + b_{m1}x_{t-1} + b_{m2}x_{t-12}$$

W pracy do optymalizacji modeli Mamdaniego i modeli Takagi-Sugeno stosowano metodę gradientów sprzężonych. W przypadku modeli Mamdaniego parametry startowe obliczono za pomocą metody c-środków [Findeisen i in. 1977; Osowski 1996; Piegat 1999]. Stopień trafności prognoz wyznaczonych w oparciu o opracowane modele Mamdaniego i Takagi-Sugeno mierzono przy użyciu średniego względnego błędu Ψ prognoz ex post w przedziale weryfikacji [Prognozowanie gospodarcze ... 1999]:

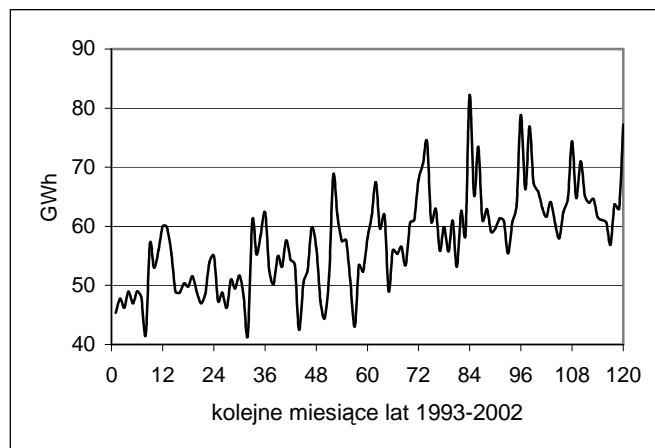
$$\Psi = \frac{1}{T - n} \sum_{t=n+1}^T \frac{|y_t - y_t^*|}{y_t} \cdot 100 \quad t = n+1, \dots, T \quad (6)$$

gdzie:

- y_t – realizacja zmiennej w czasie t ,
- y_t^* – prognoza zmiennej na czas t ,
- n – liczba obserwacji użyta do wyznaczenia prognozy,
- $[n+1, \dots, T]$ – przedział empirycznej weryfikacji prognoz.

Wyniki badań

Przebieg miesięcznego zużycia energii elektrycznej w latach 1993-2002 przez analizowanych odbiorców wiejskich przedstawiono na rysunku 1. Do opracowywania modeli prognostycznych wykorzystywano dane odpowiednio z lat 1993-2001, 1994-2001, ...1997-2001, a dane z 2002 r. użyto do sprawdzenia trafności prognoz wyznaczonych na podstawie tych modeli.



Rys. 1. Przebieg miesięcznego zużycia energii elektrycznej w latach 1993-2002 przez odbiorców wiejskich z terenu województwa małopolskiego

Fig. 1. The function of monthly energy consumption between 1993 and 2002 by rural subscribers from Małopolskie Voivodeship

Modele Mamdaniego

Opracowując modele Mamdaniego zmieniano liczbę danych dotyczących miesięcznego zużycia energii elektrycznej i liczbę reguł opisujących modele. Wyznaczono sześć modeli Mamdaniego M9, ... M4, wykorzystując do obliczeń dane dotyczące miesięcznego zużycia energii elektrycznej odpowiednio z ostatnich 9, 8, 7, 6, 5 i 4 lat. Modele opisano za pomocą pięciu reguł, gdyż we wszystkich przypadkach takie modele okazały się najlepsze. Wyniki obliczeń parametrów a i b (wzór 4) przykładowo dla modelu M7 oraz wartości błędów prognoz ex post zestawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Wyniki estymacji modelu Mamdaniego M7 miesięcznego zapotrzebowania energii elektrycznej przez odbiorców wiejskich w latach 1995-2001

Table 1. Results of estimation of Mamdani M7 model of monthly demand for electric energy by rural subscribers between 1995-2001

a_{11}	a_{12}		b_1	a_{21}		a_{22}		b_2
49,4	51,81		49,16	54,39		52,6		56,52
a_{31}	a_{32}	B_3	a_{41}	a_{42}	b_4	a_{51}	a_{52}	b_5
51,93	53,65	59,38	82,2	66,78	62,25	80,22	73,98	74,79

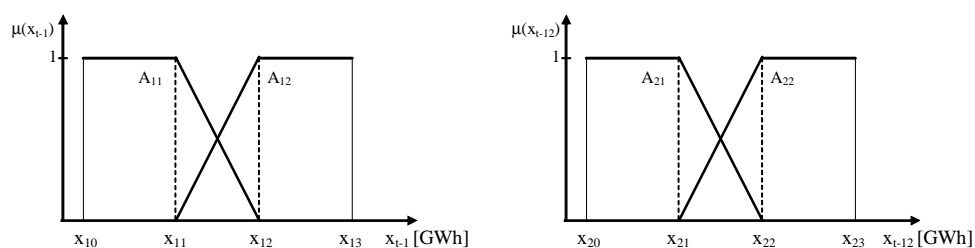
Tabela 2. Błędy prognoz miesięcznego zapotrzebowania energii elektrycznej przez odbiorców wiejskich w roku 2002 wyznaczone w oparciu o modele Mamdaniego

Table 2. Errors in the demand for electric energy by rural subscribers in 2002, established based on Madmani models

Model	M9	M8	M7	M6	M5	M4
Ψ [%]	4,87	4,79	4,22	4,62	5,8	5,92

Modele Takagi-Sugeno

Analogicznie jak w przypadku modeli Mamdaniego opracowano sześć modeli typu Takagi-Sugeno TS9, TS8, ... TS4, opisując każdy z modeli za pomocą czterech reguł. Wcześniejsze badania przeprowadzone przez autorów wykazały bowiem, że przyjęcie większej liczby reguł nie poprawia jakości modeli, a znacznie utrudnia przeprowadzenie optymalizacji. Funkcje przynależności i ogólną postać bazy reguł dla analizowanych modeli przedstawiono na rysunku 2.



JEŚLI $(x_{t-1} = A_{11})$ I $(x_{t-12} = A_{21})$ TO $x_t = b_{10} + b_{11} x_{t-1} + b_{12} x_{t-12}$

JEŚLI $(x_{t-1} = A_{11})$ I $(x_{t-12} = A_{22})$ TO $x_t = b_{20} + b_{21} x_{t-1} + b_{22} x_{t-12}$

JEŚLI $(x_{t-1} = A_{12})$ I $(x_{t-12} = A_{21})$ TO $x_t = b_{30} + b_{31} x_{t-1} + b_{32} x_{t-12}$

JEŚLI $(x_{t-1} = A_{12})$ I $(x_{t-12} = A_{22})$ TO $x_t = b_{40} + b_{41} x_{t-1} + b_{42} x_{t-12}$

Rys. 2. Przebiegi funkcji przynależności i baza reguł dla modeli Takagi-Sugeno

Fig. 2. Function of belonging and base of principles for Takagi-Sugeno models

W tabeli 3 zestawiono przykładowo wyniki obliczeń parametrów modelu TS7, zaś wartości błędów prognoz ex post zawiera tabela 4.

Tabela 3. Wyniki estymacji modelu Takagi-Sugeno TS7 miesięcznego zapotrzebowania energii elektrycznej przez odbiorców wiejskich w latach 1995-2001

Table 3. Results of estimation of Takagi-Sugeno M7 model of monthly demand for electric energy by rural subscribers between 1995-2001

x_{10}	x_{11}		x_{12}	x_{13}		x_{20}	x_{21}		x_{22}	x_{23}	
42,49	54,31		56,29	82,22		41,61	53,17		65,24	82,22	
b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{30}	b_{31}	b_{32}	b_{40}	b_{41}	b_{42}
-70,26	0,91	1,55	-139,71	0,62	2,61	20,28	0,61	-0,01	24,48	-0,07	0,72

Tabela 4. Błędy prognoz miesięcznego zapotrzebowania energii elektrycznej przez odbiorców wiejskich w roku 2002 wyznaczone w oparciu o modele Takagi-Sugeno

Table 4. Errors in the demand for electric energy by rural subscribers in 2002, established based on Takagi-Sugeno models

Model	TS9	TS8	TS7	TS6	TS5	TS4
Ψ [%]	3,89	3,98	3,76	3,83	3,78	4,98

Podsumowanie

Bardziej trafne okazały się prognozy opracowane w oparciu o modele Takagi-Sugeno. Średnie absolutne błędy prognoz ex post wyznaczone dla roku 2002 były dla tych prognoz średnio o 1% mniejsze niż dla opracowanych na podstawie modeli Mamdaniego. Dodatkowo do otrzymania prognoz możliwych do zaakceptowania przez spółki dystrybucyjne przy predykcji w oparciu o modele Takagi-Sugeno wystarcza mniejsza liczba obserwacji niż w oparciu o modele Mamdaniego. Jednak przy opracowywaniu prognoz na podstawie większej liczby danych modele Mamdaniego są konkurencyjne w stosunku do modeli Takagi-Sugeno ze względu na szybszą optymalizację tych modeli.

Bibliografia

Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A. 1977. Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. WNT Warszawa.

Mamdani E. H. 1974. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proceedings IEEE, No 121 (12), pp. 1585-1588.

Mamdani E. H. 1977. Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-26, No. 12, pp. 1181-1182.

Oowski S. 1996. *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. WNT Warszawa.

Piegat A. 1999. *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. AOW EXIT Warszawa.

Prognozowanie gospodarcze. Metody i zastosowania. Red M. Cieślak. 1999. Warszawa Wydawnictwo Naukowe PWN.

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, pp. 116-132.

COMPARISON OF APPLICABILITY OF SELECTED FUSSY MODELS FOR PREDICTING ELECTRIC ENERGY DEMAND IN RURAL AREAS

Summary

The paper compares applicability of fussy Madmani and Takagi-Sugeno models, based on the theory of fussy sets, for predicting monthly demand for electric energy in rural areas. For that purpose data was used, regarding sales of electric energy by a selected distribution company to rural subscribers from the Małopolskie Voivodeship between 1993 – 2002. The calculations performed revealed better accuracy of forecasts developed based on the Takagi-Sugeno models.

Key words: electric energy, predicting, fussy models