

## WYKORZYSTANIE MODELI MAMDANIEGO DO PREDYKCJI DOBOWYCH OBCIĄŻEŃ WIEJSKICH SIECI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Jerzy Małopolski

*Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

Małgorzata Trojanowska

*Katedra Energetyki Rolniczej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** Opracowano modele z wnioskowaniem typu Mamdani do dobowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorców wiejskich, jako charakterystycznej grupy użytkowników energii. W pracy modele zbudowano dla wszystkich dni tygodnia, oddzielnie modelując profil dnia, wartość średnią mocy dobowej oraz odchylenie standardowe przebiegu dobowego obciążenia. Przeprowadzona analiza wykazała przydatność takich modeli do krótkoterminowej predykcji i ich atrakcyjność ze względu na niski nakład pracy potrzebny do opracowania.

**Słowa kluczowe:** energia elektryczna, prognozowanie krótkoterminowe, modele rozmyte

### Wprowadzenie

Urynkowienie polskiej gospodarki i związana z tym restrukturyzacja sektora elektroenergetycznego spowodowały znaczne osłabienie wiarygodności prognoz opracowywanych w oparciu o dotychczas stosowane klasyczne techniki prognostyczne. Prognozowanie, które bazuje zazwyczaj na analizie przeszłości, stało się bowiem znacznie trudniejsze. W następstwie tego w ostatnich latach zwiększyło się zainteresowanie możliwościami wykorzystania do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną metod alternatywnych. Wśród nich najpopularniejsza jest grupa metod znana pod wspólną nazwą metod sztucznej inteligencji. Spośród tych metod najmniej uwagi poświęcano do tej pory zastosowaniu do celów predykcyjnych teorii zbiorów rozmytych, chociaż jest ona dogodnym narzędziem matematycznym pozwalającym opisać niepewność i niedokładność danych wejściowych, które nieodłącznie towarzyszą procesowi prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Najważniejszymi i najczęściej stosowanymi modelami rozmytymi są modele Mamdaniego. Opierają się one na zbiorze reguł JEŚLI– TO i stanowią jakościowy opis systemu najbliższy językowi naturalnemu [Mamdani 1974, 1977].

## Cel i zakres pracy

Przedsiębiorstwa odpowiedzialne za zaopatrzenie w energię elektryczną sporządzają prognozy dobowego jej zapotrzebowania. W związku z tym celem pracy było opracowanie modeli, które umożliwiają efektywne prognozowanie zużycia energii elektrycznej dla takiego właśnie wyprzedzenia czasowego.

Wyniki obliczeń przedstawiono na przykładzie modelowania dobowych obciążeń elektroenergetycznych w sieciach wiejskich.

## Metodyka pracy

Badania prowadzono na obszarach wiejskich obsługiwanych przez wybrane przedsiębiorstwo energetyczne z terenu Polski Południowej. Przedsiębiorstwo to jest odpowiedzialne za dostawę energii elektrycznej do ok. 64,5 tys. odbiorców wiejskich, którzy są zaopatrywani w energię elektryczną z siedmiu GPZ-tów, za pośrednictwem 1,2 tys. km linii średniego napięcia (SN), 2,2 tys. km linii niskiego napięcia (nN) oraz 830 stacji transformatorowych SN/nN. Wśród odbiorców przeważają gospodarstwa domowe (33,6 tys.) i rolne (21,7 tys.). Średnie roczne zużycie energii elektrycznej przez wiejskie gospodarstwo kształtuje się na poziomie 2,3 MWh.

W pracy oddzielnie modelowano profil dnia, wartość średnią mocy dobowej oraz odchylenie standardowe przebiegu dobowego [Dudek 2000]. Składowe wektora profilu doby  $d$  określono dla każdego przebiegu dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną według wzoru:

$$p_{hd} = \frac{P_{hd} - P_{\text{śrd}}}{\sigma_d}, \quad h = 1, 2, \dots, 24 \quad (1)$$

gdzie:

- $p_{hd}$  –  $h$ -ta składowa wektora profilu doby  $d$ ,
- $P_{hd}$  – zapotrzebowanie na energię elektryczną w  $h$ -tej godzinie doby  $d$ ,
- $P_{\text{śrd}}$  – średnie godzinowe zapotrzebowanie na energię elektryczną w dobie  $d$ ,
- $\sigma_d$  – odchylenie standardowe godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną w dobie  $d$ .

Ponieważ przebiegi zmienności tygodniowych obciążeń w tych samych miesiącach były w znacznym stopniu podobne do siebie, profile danego dnia tygodnia ustalonego miesiąca obliczono posługując się średnią arytmetyczną profili tych samych dni tygodnia w danym miesiącu. Dysponując modelami prognostycznymi średniej mocy dobowej ( $M_p$ ) oraz odchylenia standardowego na dobę  $d$  ( $M_\sigma$ ), dokonano prognozy przebiegu dobowego korzystając z przekształconej zależności (1):

$$\hat{P}_{hd} = p_{hd} \hat{\sigma}_d + \hat{P}_{\text{śrd}}, \quad h = 1, 2, \dots, 24 \quad (2)$$

gdzie:

- $\hat{P}_{hd}$  – prognoza zapotrzebowania na energię elektryczną w h-tej godzinie doby d,
- $p_{hd}$  – h-ta składowa wektora profilu doby d,
- $\hat{P}_{srd}$  – prognoza średniego godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną w dobie d,
- $\hat{\sigma}_d$  – prognoza odchylenia standardowego godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną w dobie d.

Oba modele miały jednowymiarową zmienną wejściową i jednowymiarową zmienną wyjściową.

W pracy wyznaczano modele o stałej strukturze (samonastrajające się modele rozmyte [Driankov i in. 1996]) tj. modele o ustalonych zmiennych wejściowych, a także o stałej bazie reguł i stałej liczbie zbiorów rozmytych. Ze zbioru danych wyodrębniono zbiór uczący i zbiór testujący. Opracowując modele należy tak wyznaczać ich parametry, aby sumaryczne błędy kwadratowe modeli na zbiorach uczących były minimalne. W pracy optymalizacji dokonano za pomocą metody gradientów sprzężonych [Osowski 1996], wyznaczając parametry startowe rozmytą metodą c-środków [Piegat 1999]. W celu przyspieszenia procesu minimalizacji błędu modelu, optymalizowano przemiennie parametry warstwy defuzyfikacyjnej i fuzyfikacyjnej.

Dla potrzeb realizacji celu pracy w zakresie prognozowania dobowego wykorzystano procedury wyznaczania rozmytych modeli predykcyjnych, a w szczególności algorytm doboru zmiennych wejściowych do modeli oraz algorytm wyznaczania ich struktury. W pierwszym algorytmie zastosowano metodę analizy współczynników korelacji [Dąsał 2002]. W celu minimalizacji zbioru zmiennych wejściowych modeli, do średniego absolutnego błędu procentowego prognoz *ex post* (*mean absolute percentage error*, MAPE) liczonego na zbiorze uczącym modelu dodawano tzw. człon kary będący iloczynem kary jednostkowej [Lula 2000] i liczby uwzględnionych zmiennych. Przy wyznaczaniu struktury modeli stosowano zasadę konstruktywną, rozpoczynając procedurę od modeli o najprostszej strukturze. Następnie stopniowo rozbudowywano strukturę modeli do momentu minimalizacji na zbiorach testujących miernika zdefiniowanego jako suma MAPE i jego odchylenia standardowego [Francik 2003].

Funkcje przynależności zbiorów rozmytych  $A_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) określonych w przestrzeni wejściowej są symetrycznymi funkcjami Gaussa. Z kolei w przestrzeni wyjściowej funkcje przynależności zbiorów rozmytych  $B_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) są singletonami. Za wartość i-tego odchylenia standardowego przyjęto jedną trzecią odległości i-tego centrum od centrum jego najbliższego sąsiada. Umożliwia to przedstawienie bazy reguł w postaci:

$$R1: \text{JEŚLI } (x_1 \text{ blisko } c_{11}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_r \text{ blisko } c_{1r}) \text{ TO } (y \text{ blisko } b_1) \quad (3)$$

.

.

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

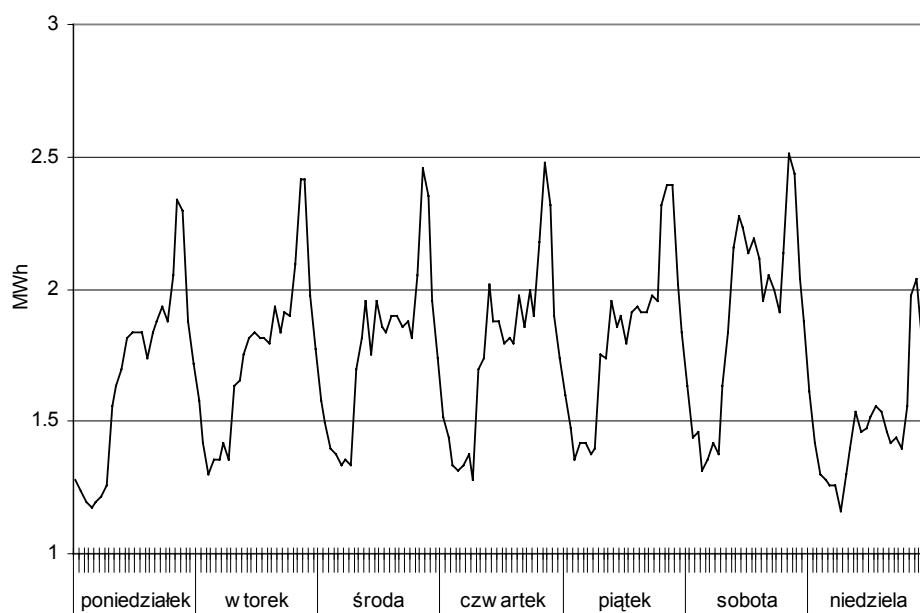
gdzie:

- $x_1, \dots, x_r$  – wejścia systemu,
- $y$  – wyjście systemu,
- $c_{i1}, \dots, c_{ir}$  – współrzędne centrum zbioru  $A_i$ ,
- $b_i$  – wartość modalna zbioru  $B_i$ ,
- $i = 1, \dots, m$ .

Opierając się na przedstawionej bazie reguł przeprowadzono inferencję MAX-MIN, a przy defuzyfikacji zastosowano metodę wysokości [Piegat 1999].

## Wyniki badań

Opracowanie rozmaitych modeli prognostycznych przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną grupy odbiorców wiejskich zasilanych z wybranego GPZ w latach 2003–2005. Charakterystyczną cechą zapotrzebowania na energię elektryczną jest duża zmienność obciążeń zarówno w ciągu doby, jak i w dniach tygodnia czy w różnych porach roku. Przebieg zmienności tego zapotrzebowania dla wybranego tygodnia przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg zmienności obciążeń elektroenergetycznych wybranej sieci wiejskiej od 7 do 13 kwietnia 2003 roku

Fig. 1. The trajectory of variability of electrical power loads for a selected rural network between April 7 and 13, 2003

Do budowy modelu dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną posłużyły dane pomiarowe z lat 2003-2004. Zbiór uczący obejmował 462 dni (66 tygodni), a zbiór testujący 224 dni (32 tygodni). Również dane z roku 2005 (341 dni) wykorzystano do testowania modelu. Wyboru zmiennych wejściowych do modeli  $M_p$  i  $M_\sigma$  dokonano odpowiednio ze zbioru wartości średnich mocy dobowych oraz odchyłeń standardowych dobowego przebiegu w zakresie opóźnień od 1 do 7 dni ( $(P_{\text{sr}1}, P_{\text{sr}2}, \dots, P_{\text{sr}7}), (\sigma_1, \dots, \sigma_7)$ ). Wyniki doboru zmiennych wejściowych oraz liczbę reguł poszczególnych modeli zawiera tabela 1. Przykładowo wyniki obliczeń parametrów modelu średniej mocy dobowej przedstawiono w tabeli 2.

W oparciu o zbudowane modele średniej mocy dobowej ( $M_p$ ) oraz odchylenia standardowego przebiegu dobowego ( $M_\sigma$ ) wyznaczono prognozy wygasłe i na ich podstawie wyliczono błędy MAPE (tab. 3) jako najczęściej stosowane w technice prognostycznej wskaźniki oceny jakości predykcji.

Tabela 1. Wyniki doboru zmiennych wejściowych do modelu średniej mocy dobowej ( $M_p$ ) i modelu odchylenia standardowego przebiegu dobowego ( $M_\sigma$ )

Table 1. The results of selecting input variables for model of average twenty-four hour power ( $M_p$ ) and model of twenty-four hour progress standard deviation ( $M_\sigma$ )

Model	$M_p$	$M_\sigma$
Zmienne wejściowe	$P_{\text{sr}1}, P_{\text{sr}2}, P_{\text{sr}3}, P_{\text{sr}6}, P_{\text{sr}7}$	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_6, \sigma_7$
Liczba reguł	7	6

Tabela 2. Wyniki estymacji rozmytego modelu Mamdaniego ( $M_p$ ) średniej mocy dobowej w latach 2003–2004

Table 2. Estimation results for Mamdani fuzzy model ( $M_p$ ) of average twenty-four hour power in years 2003 - 2004

$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$c_{16}$	$c_{17}$	$b_1$
1,99	2,40	1,73	1,91	2,14	2,21
$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$	$c_{26}$	$c_{27}$	$b_2$
2,36	1,94	2,15	1,99	1,57	1,83
$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$	$c_{36}$	$c_{37}$	$b_3$
1,35	1,76	1,80	1,81	2,05	1,66
$c_{41}$	$c_{42}$	$c_{43}$	$c_{46}$	$c_{47}$	$b_4$
1,62	1,99	2,11	1,63	1,99	1,90
$c_{51}$	$c_{52}$	$c_{53}$	$c_{56}$	$c_{57}$	$b_5$
1,84	1,85	1,79	1,96	2,39	1,88
$c_{61}$	$c_{62}$	$c_{63}$	$c_{66}$	$c_{67}$	$b_6$
2,39	1,81	2,12	1,76	2,40	2,30
$c_{71}$	$c_{72}$	$c_{73}$	$c_{76}$	$c_{77}$	$b_7$
1,97	2,17	1,84	2,09	1,36	1,43

Tabela 3. Średnie absolutne błędy prognoz *ex post* dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną wyznaczonych na zbiorze uczącym i testującym z lat 2003-2004 oraz w 2005 roku  
 Table 3. Average absolute errors of *ex post* forecasts of twenty-four hour electric energy demand, determined using teaching and testing set from years 2003-2004, and in 2005

MAPE [%]		
Zbiór uczący	Zbiór testujący	Rok 2005
3,70	3,73	4,96

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań potwierdziły przydatność zaprezentowanych w pracy rozmaitych modeli prognostycznych z wnioskowaniem typu Mamdani do predykcji dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną odbiorców wiejskich. Wyznaczone w oparciu o opracowane modele prognozy można bowiem uznać za dobre, gdyż błędy MAPE nie przekraczają 5% [Zeliaś i in. 2004]. Do tego stosunkowo niewielka liczebność zbioru uczącego oraz brak podziału tygodnia na charakterystyczne dni przyspiesza proces wyznaczania takich modeli. Ponieważ prognozy profili nie zależą od momentu ich rozpoczęcia, a jedynie wartości średnie i odchylenia standardowe są uzależnione od powiązań z najbliższą przeszłością, opracowane w pracy modele można wykorzystać do predykcji z większym wyprzedzeniem czasowym.

## Bibliografia

- Dąsal K.** 2002. Wpływ doboru zmiennych na błąd prognozy w modelu sieci neuronowej. VI Konferencja Naukowa PE 2002 „Prognozowanie w elektroenergetyce”. Częstochowa. s. 98-108.
- Dudek G.** 2000. Krótkoterminowe prognozowanie obciążenia systemu elektroenergetycznego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych o radialnych funkcjach bazowych. Materiały V Konferencji Naukowej „Prognozowanie w elektroenergetyce PE 2000”. s. 59-69.
- Francik S.** 2003. Możliwości wykorzystania SSN do prognozowania sprzedaży maszyn rolniczych w warunkach rynkowych. Inżynieria Rolnicza. Nr 12(54). s. 97-105.
- Lula P.** 2000. Wykorzystanie sztucznej inteligencji w prognozowaniu. Materiały Seminarium Statsoft. „Prognozowanie w przedsiębiorstwie”. Warszawa. s. 39-69.
- 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.
- Osowski S.** 1996. Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym. WNT. Warszawa. ISBN 83-204-2197-7.
- Piegat A.** 1999. Modelowanie i sterowanie rozmyte. AOW EXIT. Warszawa. ISBN 83-87674-14-1.
- Zeliaś A., Pawelek B., Wanat S.** 2004. Prognozowanie ekonomiczne. WN PWN Warszawa. ISBN 83-01-14043-7.

## USING OF THE MAMDANI MODELS TO PREDICT DAILY LOADS OF RURAL POWER NETWORKS

**Abstract.** Mamdani type concluding models were developed for twenty-four hour forecasting of electric energy demand for rural consumers, being characteristic group of energy users. For the research purposes the models were built for all weekdays, with separate modelling of day profile, twenty-four hour power average value and standard deviation of twenty-four hour load progress. Completed analysis proved usefulness of these models for short-term prediction, and their attraction due to low amount of labour necessary to prepare them.

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

**Adres do korespondencji:**

Jerzy Małopolski; email: [malopolski@ar.krakow.pl](mailto:malopolski@ar.krakow.pl)  
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 116B  
30-149 Kraków