

Jacek ŁYP\*

## Przestrzenne prognozy zapotrzebowania na moc i energię elektryczną

**STRESZCZENIE.** W artykule opisano propozycję ujęcia zagadnienia modelowania rozkładu zapotrzebowania na moc i energię elektryczną dla dużych regionów kraju jako narzędzia składowego w zadaniach długoterminowego i krokowego prognozowania rozkładu obciążeń węzłów zasilających. Do modelowania użyto zasad logiki rozmytej. Koncepcja została opisana i zilustrowana.

**SŁOWA KLUCZOWE:** prognozowanie, elektroenergetyka, logika rozmyta

### Wprowadzenie

Mapę rozkładu zużycia energii elektrycznej dla danego obszaru, można zaprezentować na wiele sposobów. Odzworowaniem naturalnym byłaby mapa z naniesionymi na niej punktami poboru energii i przyporządkowanymi do tych punktów wartościami charakteryzującymi ten pobór. W zależności od założonego lub dostępnego poziomu szczegółowości punkty mogą odpowiadać różnym podmiotom. Z jednej strony można w ich roli widzieć miejscowości, węzły sieci rozdzielczej, punkty pomiaru energii odbiorców końcowych lub wręcz pojedyncze odbiory, z drugiej zaś mogą to być syntetycznie wyznaczone środki ciężkości powiatów, województw, terenów odpowiadających obszarom działalności spółek

---

\* Dr inż. – Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.

dystrybucyjnych lub ich oddziałów. Również przyporządkowane punktom wartości charakteryzujące pobór mogą być w zależności od potrzeb ujęte na różne sposoby: energie roczne, miesięczne lub obciążenia w określonej godzinie doby charakterystycznej. Taka forma mapy jest jednak mało sugestywna dla czytelnika i potencjalnie mało przydatna do celów aplikacyjnych. Zdecydowanie lepszą formą byłaby mapa odwzorowująca rozkład zużycia energii analogicznie do odwzorowania wysokości nad poziomem morza na mapach poziomicowych. Forma taka będąca aproksymacją rozkładu stanowiłaby swego rodzaju jego uogólnienie, oferując uwolnienie od konkretnych punktów i szersze możliwości dalszego wykorzystania.

## 1. Rozkład gęstości zużycia energii

W celu uzyskania map rozkładu gęstości zużycia energii, dyskretny zbiór danych o zużyciu energii w postaci wartości przyporządkowanych do określonych punktów geograficznych należy rozmyć w ich otoczeniu tak, aby uzyskać funkcję określającą wartość zużycia energii w dowolnie zadanych współrzędnych geograficznych. Wartością tą może być zużycie na jednostkę powierzchni, przy czym jednostką tą może być powierzchnia elementarnego w modelu oczka siatki kartograficznej.

Przy próbach stosowania konwencji logiki rozmytej, kluczem do powodzenia wydaje się być zastosowanie odpowiedniej funkcji przynależności, niezbędnej do oszacowania średniej rozmytej.

W [1] opisano algorytm szacowania średniej rozmytej do aproksymacji funkcji punktowej bazujący na metodzie Lin-Cunninghama [2].

### 1.1. Postać A

Ogólną funkcję przynależności zbioru rozmytego  $\{W_i\}$  do zmiennej odniesienia  $W_0$  przyjęto bazując na funkcji Gaussa i w oparciu o miarę euklidesową odległości wektorów  $W$ :

$$\sigma(W_0, W_i) = e^{-\frac{d_{0,i}^2}{b^2}} \quad (1)$$

gdzie:  $0, i$  – indeks,  
 $d_{0,i}$  – odległość wektora  $W_i$  od  $W_0$ .

Parametr  $b$  podlega eksperymentalnej optymalizacji. Według [2]  $b$  powinno być rzędu 20% zakresu zmienności  $d_{0,i}$ .

Dla takiej postaci funkcji przynależności, średnia rozmyta funkcji  $z(W_0)$ , jest średnią ważoną zdefiniowaną jako:

$$z(X_0) = \frac{\sum_i \sigma(W_0, W_i) \cdot z_i}{\sum_i \sigma(W_0, W_i)} \quad (2)$$

Przyjmując za składowe wektorów  $W$  współrzędne punktów na płaszczyźnie, zaś za funkcję  $z(W)$  dyskretne wartości zużycia energii w tych punktach, mapa rozkładu zużycia energii będzie obrazem powierzchni, której każdy punkt pomiarowy o wysokości  $z$  jest określony na płaszczyźnie wektorem współrzędnych  $(x, y)$ .

W takim ujęciu definicja funkcji przynależności położenia  $i$ -tego punktu  $(x_i, y_i)$  do punktu odniesienia  $(x_0, y_0)$  zdefiniowana jest następująco:

$$\sigma_{0,i} = e^{-\frac{(x_0-x_i)^2+(y_0-y_i)^2}{(d_L \cdot \beta)^2}} \quad (3)$$

W (3) licznik wykładnika jest kwadratem odległości punktu  $(x_i, y_i)$  od punktu odniesienia,  $d_L$  – długością przekątnej oczka siatki kartograficznej, a  $\beta$  – empirycznie dobranym współczynnikiem.

Mając funkcję przynależności można wykonać dwa rodzaje map:

- ✧ mapę średniej rozmytej zużycia energii,
- ✧ mapę środków ciężkości tego zużycia.

Analogicznie do (2) mapę średniej rozmytej zużycia energii wyznacza się według wzoru:

$$z_0 = \frac{\sum_i z_i \cdot \sigma_{0,i}}{\sum_i \sigma_{0,i}} \quad (4)$$

w którym:

- $z_i$  – zużycie energii w punkcie  $(x_i, y_i)$ ,
- $z_0$  – średnia rozmyta zużycia energii w punkcie  $(x_0, y_0)$ .

Miejszem geometrycznym punktu odniesienia  $(x_0, y_0)$  jest centrum oczka siatki kartograficznej. Punktów odniesienia jest tyle ile oczek w siatce. Całe oczko charakteryzuje się średnim zużyciem energii  $z_0$ .

Funkcja przynależności  $\sigma_{0,i}$  nie ma atrybutu masy. Masą będzie iloczyn  $z_i \cdot \sigma_{0,i}$ . Środek ciężkości zużycia energii  $c(z)_s$  zazwyczaj będzie oddalony od punktu odniesienia i znajdzie się w punkcie  $(x_s, y_s)$ , co wynika ze wzorów:

$$c(z)_s = \frac{\sum_i z_i^2 \cdot \sigma_{0,i}}{\sum_i z_i \cdot \sigma_{0,i}} \quad (5)$$

$$x_s = \frac{\sum_i x_i \cdot z_i \cdot \sigma_{0,i}}{\sum_i z_i \cdot \sigma_{0,i}} \quad (6)$$

$$y_s = \frac{\sum_i y_i \cdot z_i \cdot \sigma_{0,i}}{\sum_i z_i \cdot \sigma_{0,i}} \quad (7)$$

w których:

- $c(z)_s$  – rozmyty środek ciężkości zużycia energii, wyrażony w jednostkach tego zużycia,
- $(x_s, y_s)$  – położenie środka ciężkości  $c(z)_s$  na płaszczyźnie  $(x, y)$ .

Mapa średniej rozmytej zużycia energii informuje o przestrzennej strukturze tego zużycia, natomiast mapa środków ciężkości informuje o jego koncentracji.

Pierwszą z tych map można wykorzystać do przestrzennych analiz i prognoz, druga natomiast będzie wskazywać pożądane punkty zasilania odbiorów w otoczeniu punktu odniesienia.

## 1.2. Postać B

Alternatywne podejście do tworzenia mapy polega na skumulowaniu w każdym punkcie odniesienia wartości rozmytych energii od wszystkich punktów reprezentujących oryginalne zużycie energii z uwzględnieniem wag wszystkich węzłów siatki.

Niech  $z_j$  będzie  $j$ -tym spośród  $n_z$  wielkości zużycia energii, odwzorowanych na dwuwymiarowej powierzchni za pośrednictwem współrzędnych  $(x_j, y_j)$ . Powierzchnia ta została podzielona na prostokątną siatkę o  $n_w$  węzłach w punktach  $(x_i, y_i)$ .

Oryginalne  $z_j(x_j, y_j)$  reprezentowane jest w każdym  $i$ -tym węźle wartością rozmytą:

$$z_{ij} = \frac{\sigma_{ij} \cdot z_j}{\sum_{k=1}^{n_w} \sigma_{kj}} \quad (8)$$

gdzie:  $\sigma_{kj} = \exp\left(-\frac{(x_k - x_j)^2 - (y_k - y_j)^2}{(d_L \cdot \beta)^2}\right)$  – miara przynależności  $k$ -tego węzła o współrzędnych  $(x_k, y_k)$  do otoczenia  $z_j(x_j, y_j)$ .

Dla celów prognostycznych, istotne jest, że suma zużycia rozmytego na wszystkie węzły siatki jest równa oryginałowi:

$$\sum_{i=1}^{n_w} z_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{n_w} \sigma_{ij} \cdot z_j}{\sum_{k=1}^{n_w} \sigma_{kj}} \quad (9)$$

Sumując zużycia rozmyte (8) od wszystkich danych  $z_j$  ( $j = 1, \dots, n_z$ ) w poszczególnych węzłach siatki, otrzymuje się powierzchniową mapę:

$$z_i = \sum_{j=1}^{n_z} z_{ij} = \sum_{j=1}^{n_z} \frac{\sigma_{ij} \cdot z_j}{\sum_{k=1}^{n_w} \sigma_{kj}} \quad \text{dla } i=1, \dots, n_w \quad (10)$$

Analogicznie przeprowadza się obliczenie rozmytych środków ciężkości i ich współrzędnych.

## 2. Próba sporządzenia map rozkładu zużycia energii elektrycznej na cele bytowo-komunalne

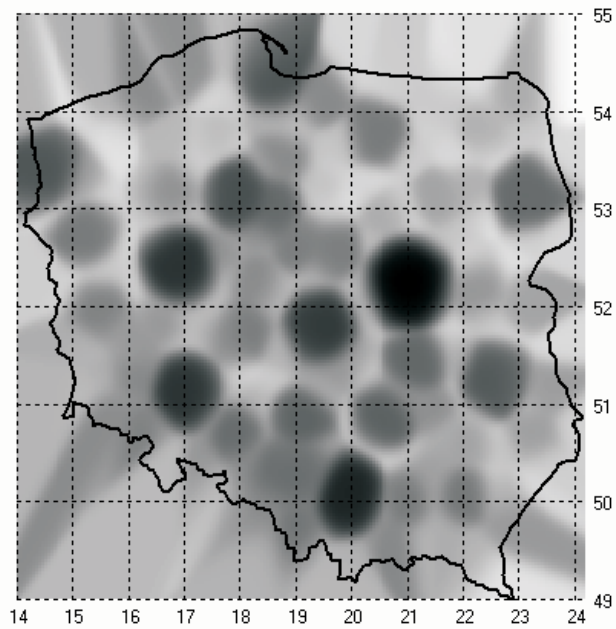
W roli współrzędnych liniowych  $x$  i  $y$  użyto przeskalowanej długości ( $\lambda$ ) i nieprzetworzonej szerokości geograficznej ( $\varphi$ ). Skalowanie zapewni uwzględnienie skracania łuku kąta długości geograficznej w miarę wzrostu szerokości:

$$\begin{aligned} x &= \lambda \cdot \cos(\varphi) \\ y &= \varphi \end{aligned} \quad (11)$$

Mapy sporządzono przy uwzględnieniu 335 miast powiatowych. Zużycie energii ustalono symulacyjnie na podstawie danych GUS dla województw, dotyczących gospodarki komunalnej. Dane geolokacyjne pochodzą z serwisu Google Maps.

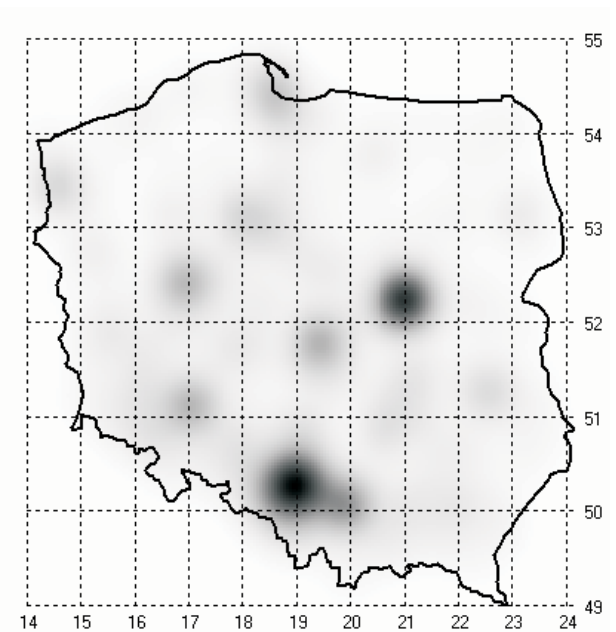
## 3. Perspektywy wykorzystania map w prognozowaniu przestrzennym

W [1] proponowana jest procedura prognozy polegająca na sporządzeniu stosunkowo prostej ekstrapolacji trendu osobno dla każdego oczka siatki kartograficznej. Proponowane



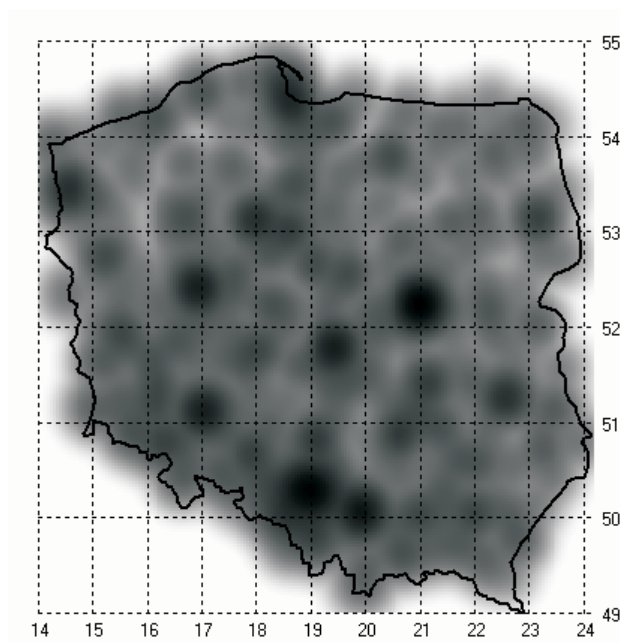
Rys. 1. Średnie rozmyte wartości zużycia energii (postać A,  $\beta = 3$ , skala logarytmiczna)

Fig. 1. Fuzzy average energy consumption values (form A,  $\beta = 3$ , logarithmic scale)



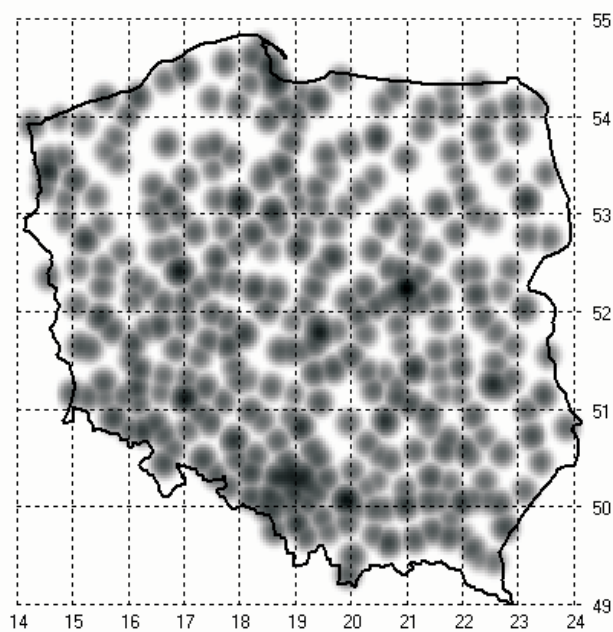
Rys. 2. Średnie rozmyte wartości zużycia energii (postać B,  $\beta = 5$ , skala liniowa)

Fig. 2. Fuzzy average energy consumption values (form B,  $\beta = 5$ , linear scale)



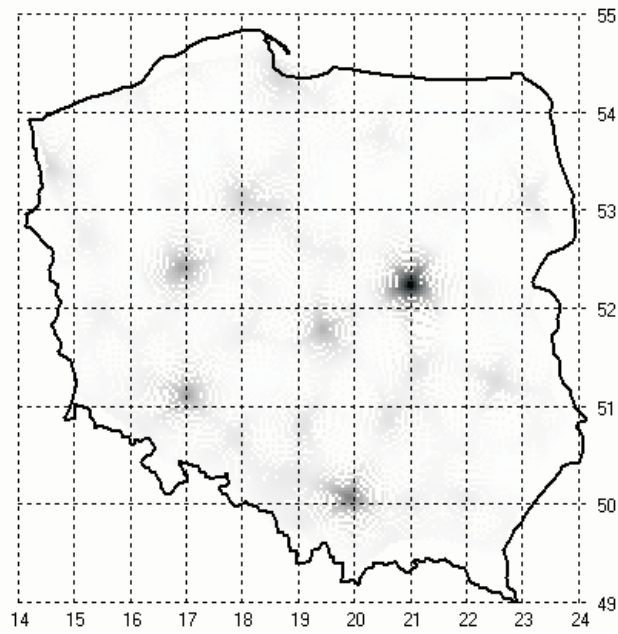
Rys. 3. Średnie rozmyte wartości zużycia energii (postać B,  $\beta = 3$ , skala logarytmiczna)

Fig. 3. Fuzzy average energy consumption values (form B,  $\beta = 3$ , logarithmic scale)



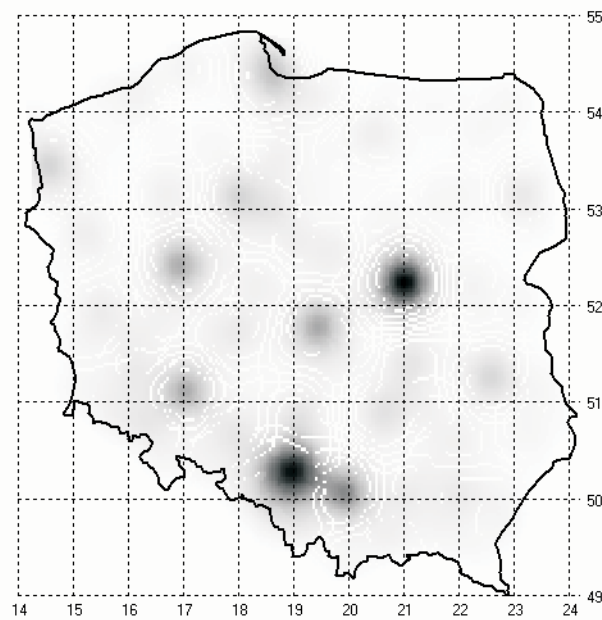
Rys. 4. Średnie rozmyte wartości zużycia energii (postać B,  $\beta = 1$ , skala logarytmiczna)

Fig. 4. Fuzzy average energy consumption values (form B,  $\beta = 1$ , logarithmic scale)



Rys. 5. Rozmyte środki ciężkości zużycia energii (postać A,  $\beta = 3$ , skala liniowa)

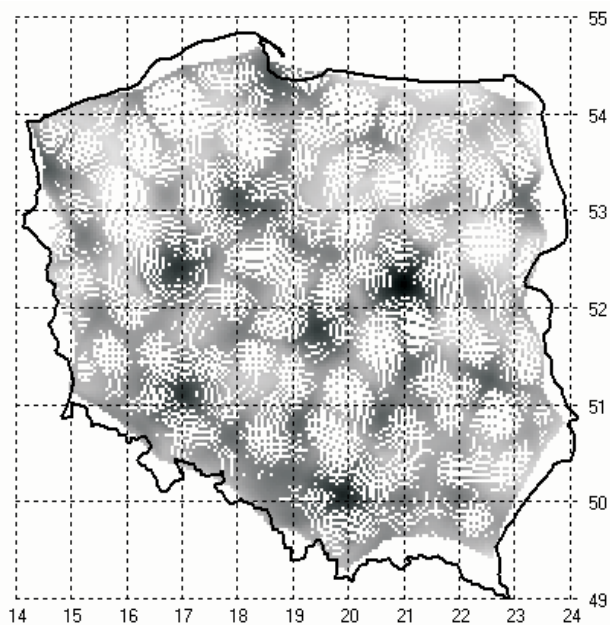
Fig. 5. Fuzzy centers of gravity concerning energy consumption (form A,  $\beta = 3$ , linear scale)



Rys. 6. Rozmyte środki ciężkości zużycia energii (postać B,  $\beta = 3$ , skala liniowa)

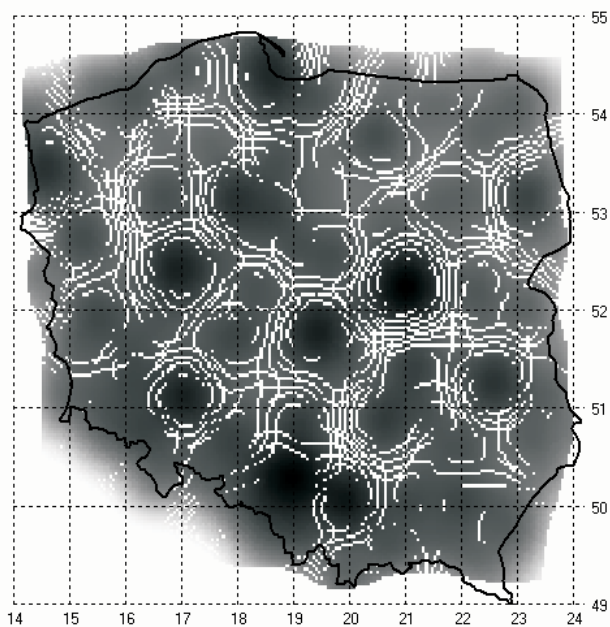
Fig. 6. Fuzzy centers of gravity concerning energy consumption (form B,  $\beta = 3$ , linear scale)





Rys. 7. Rozmyte środki ciężkości zużycia energii (postać A,  $\beta = 3$ , skala logarytmiczna)

Fig. 7. Fuzzy centers of gravity concerning energy consumption (form A,  $\beta = 3$ , logarithmic scale)



Rys. 8. Rozmyte środki ciężkości zużycia energii (postać B,  $\beta = 3$ , skala logarytmiczna)

Fig. 8. Fuzzy centers of gravity concerning energy consumption (form B,  $\beta = 3$ , logarithmic scale)

są do tego celu modele prognozy rodem z teorii chaosu zdeterminowanego: odwzorowanie logistyczne [3], odwzorowanie Julii [4] oraz odwzorowanie Poincarégo [4].

Niezależnie od powyższego, możliwe jest zastosowanie map rozkładu zużycia w zadaniach prognozowania dla zbioru podmiotów umiejscowionych na mapie. W szczególności może to być zbiór węzłów zasilających sieć rozdzielczą.

W zadaniu zakłada się dostępność prognoz zapotrzebowania na energię roczną i moc szczytową dla kraju, Terenowych Spółek Eksploatacyjnych oraz dla Oddziałów Spółek Dystrybucyjnych oraz historię procesu zużycia energii w węzłach sieci.

Z charakteru narzuconych zmiennych sterujących oraz dodatkowych założeń (prostota i przejrzystość metodyki), narzuca się dwuetapowy ciąg czynności w przedstawionej niżej postaci.

- ✧ Uzyskanie prognozy rocznego szczytu i energii dla węzłów z dostępnej lub wykonanej odrębnie prognozy rocznego szczytu i energii dla większego podmiotu (powiat, miasto, województwo, Oddział Spółki Dystrybucyjnej).
- ✧ Uzyskanie z węzłowej prognozy rocznego szczytu i energii, dobowego przebiegu dla zadanego typu doby.

Posługując się dostępnymi statystykami rocznych szczytów i energii należy sporządzić wyjściową mapę gęstości obciążenia, o rozdzielczości mniejszej niż wynikałoby z terytorialnego rozkładu liczności węzłów. Mapę można dodatkowo uszczegółowić za pośrednictwem statystyk węzłowych, jednak wymaga to rozważenia. Chodzi o możliwości korekcyjnego nakładania lub ujmowania z mapy informacji związanych ze źródłami energii w sieciach niższych rzędów, a ewentualne włączenie do modelu informacji węzłowych mogłoby wprowadzić zakłócenia. Wymienione prognozy roczne, użyte jako czynnik skalujący dla mapy, przekształcają ją w prognozę. Zakończeniem etapu jest wykonanie procedury odwrotnej do sporządzania mapy: należy skumulować energie rozmyte w punktach odpowiadających docelowym podmiotom prognozy. Będzie to defuzyfikacja mapy z użyciem współrzędnych geograficznych węzłów. Z uwagi na wspomnianą rozdzielczość, defuzyfikacja wymaga uwzględnienia zróżnicowania udziałów węzłów adekwatnie do danych z ich historii procesu i ograniczeń technologicznych.

W realizacji etapu drugiego należy uzyskać przebieg obciążenia dla zadanego typu doby w funkcji bardzo syntetycznych zmiennych sterujących, jakimi są energia i szczyt roczny dla danego węzła. Proponowana jest opisana m.in. w [3] adaptacja modelu zmienności obciążeń według szkoły Kopeckiego-Dobrzańskiej. Przed sporządzeniem właściwych dla tego modelu charakterystyk, a z uwagi na dużą wariancję procesu w populacji węzłów, celowe jest pogrupowanie węzłów w reprezentatywne grupy. Do grupowania należy użyć wektorów skonstruowanych ze składowych będących fragmentami przebiegów obciążenia i zastosować do nich jedną z metod aglomeracyjnych (np. metoda minimalnej wariancji Warda [5]) lub inne (metoda środka ciężkości, sieć Kohonena itp.). Ponieważ prognozy węzłowe uzyskiwane są w oderwaniu od siebie, mogą nie bilansować się wzajemnie, stąd konieczna jest kontrola i ewentualne opracowanie algorytmu korekcyjnego.

Wprowadzenie nowego węzła wymaga określenia jego sklasyfikowania i ewentualnego skorygowania prognozy na okoliczność stadium rozruchu.

Przedstawiona tu koncepcja jest zapewne jednym z wielu możliwych przypadków kiedy użyteczność map rozkładu zużycia energii może okazać się użyteczna.

## Podsumowanie

Opisane postępowanie jest pierwszą próbą aplikacji opracowanej na poziomie abstrakcyjnym i opisanej w [1] techniki modelowania map rozkładu zapotrzebowania na energię. Stanowi propozycję odpowiedzi na konkretne zapotrzebowanie zgłoszone przez Departament Sprzedaży i Rozwoju PSE-OPERATOR S.A. Używane tam obecnie narzędzie prognozowania zapotrzebowania na energię i moc w węzłach zasilających sieć rozdzielczą, będące składnikiem systemu informatycznego do długoterminowego planowania rozwoju sieci przesyłowej, bazuje na technice agregacji sporządzanych dla każdego węzła prognoz składowych. W uproszczeniu, uzyskiwane są one za pośrednictwem modelu wykorzystującego mocno rozbudowaną bibliotekę reprezentatywnych profili obciążenia różnych typów odbiorców oraz szeregu danych wejściowych w postaci parametrów ilościowych, wskaźników udziału i przyrostu specyfikowanych dla dużej liczby podmiotów. Spowodowane uwarunkowaniami prawnymi i organizacyjnymi trudności w pozyskaniu kompletnych danych, w praktyce uniemożliwiają efektywne wykorzystanie narzędzia.

Opisane tu rozwiązanie, bazujące na mapach rozkładu zużycia energii, ze względu na syntetyczny charakter i dostępność danych oraz elastyczność w możliwej skali ich stosowania, stanowi atrakcyjną alternatywę i będzie rozwijane w zespole autora w kierunku uzyskania gotowego do aplikacji rozwiązania.

## Literatura

- [1] DOBRZAŃSKA I., ŁYP J., 2004 – Mapy energetyczne w konwencji logiki rozmytej. Materiały konferencyjne VII Konferencji Naukowej: Prognozowanie w Elektroenergetyce PE 2004. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa – Poraj.
- [2] LIN Y., CUNNINGHAM G., 1995 – New Approach to Fuzzy-Neural System Modeling. IEEE Transaction on Fuzzy Systems vol.3 no. 2, p. 190–198, May 1995.
- [3] DOBRZAŃSKA I. (red.), 2002 – Prognozowanie w elektroenergetyce. Zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa.
- [4] DOBRZAŃSKA I., 2004 – Odwzorowanie Julii i Poincarégo w prognozowaniu krokowym rocznego zużycia energii elektrycznej. JUEE.
- [5] LANCE G.N., WILLIAMS W.T., 1967 – A general theory of classificatory starting strategies. 1: Hierarchical systems. Computer Journal 9, 373–380.

Jacek ŁYP

## Forecasting of spatial demand for electric power and energy

### Abstract

The issue of modelling the spatial distribution of electric power and energy demands in large regions of the country is the subject of the present paper. The conception is presented as suitable for perform long term or step-by-step load forecasts for supply nodes. The modelling relies on fuzzy logic. The proposed methodology is described and illustrated.

KEY WORDS: forecasting, electric power engineering, fuzzy logic