

## Modelowanie rocznej zmienności obciążeń KSE z uwzględnieniem efektu eskalacji użytkowania urządzeń wentylacyjno-klimatyzacyjnych

**Streszczenie.** Referat przedstawia propozycję aktualizacji "klasycznego" modelu rocznej zmienności obciążeń wg szkoły Kopeckiego-Dobrzańskiej. Uzupełnienie dotyczy obserwowanego od kilku lat i cechującego się wysoką istotnością względnego zwiększenia obciążeń w miesiącach letnich.

**Abstract.** The paper presents a proposal updates "classical" model of the annual variation of loads for school Kopecki-Dobrzańska. Addendum applies to that observed for several years and characterized by the high significance of the relative increase in loads during the summer months. (Modelling of the annual load variation of the national electricity system including the effect of escalating use of ventilation and air conditioning equipment).

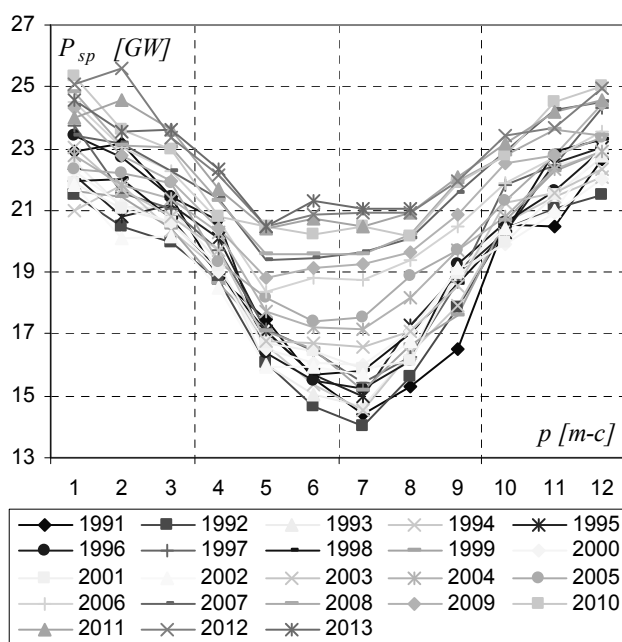
**Słowa kluczowe:** prognozowanie, elektroenergetyka.

**Keywords:** Forecasting, Electric Power Engineering.

doi:10.12915/pe.2014.06.51

### Wprowadzenie

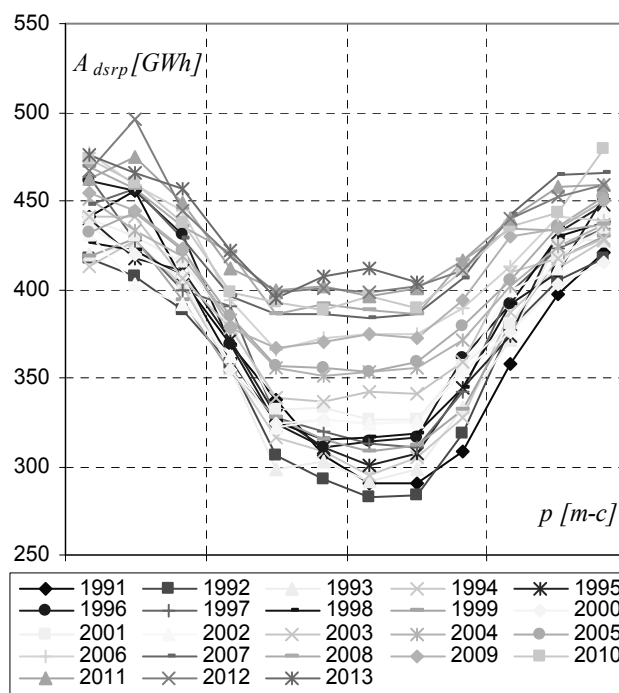
W pracy [1] przedstawiono założenia do budowy syntetycznego modelu zmienności obciążeń KSE, przeznaczanego do sporządzania długoterminowych prognoz szeregu wielkości dotyczących zapotrzebowania na moc i energię elektryczną dla narzuconych wariantów scenariuszy zapotrzebowania na roczną energię elektryczną i roczny szczyt. W efekcie zastosowania nieskomplikowanych i mało pracochłonnych procedur, model umożliwił względnie szybkie pozyskanie stosunkowo dobrej jakości spójnych wyników. Rozwiniętą i zaawansowaną postać modelu przedstawiono w pracach [2] i [3]. W aktualnych warunkach funkcjonowania KSE, model doczekał się weryfikacji i prób praktycznego zastosowania do różnych zadań prognostycznych [4, 5, 6]. W pracy [6] wskazano na brak odzwierciedlenia w modelu stosunkowo nowego zjawiska, jakim jest coraz wyraźniejsze wypiętrzanie w okresie letnim tzw. krzywych V.



Rys.1. Zmienność roczna szczytów miesięcznych  $P_{sp}$

W historii procesów szczytów miesięcznych (rys.1) i energii średniodobowych poszczególnych miesięcy (rys.2) efekt jest zauważalny począwszy już od około 2003 roku. Rozpowszechnione i niekwestionowane jest przekonanie o przyczynie zjawiska związanej z rosnącą popularnością urządzeń wentylacyjno-klimatyzacyjnych.

W związku z powyższym, podjęto próbę zidentyfikowania i wprowadzenia do modelu składnika korekcyjnego, który poprawiłby jego jakość.



Rys.2. Zmienność średnich energii dobowych w kolejnych miesiącach roku  $A_{dsrp}$

### Model bazowy

Do modelowania wspomnianych procesów szczytów miesięcznych i miesięcznych energii średniodobowych, wykorzystuje się jedynie stosunkowo niewielki fragment metodyki [1], której niezbędne elementy zostaną tu pokrótce przedstawione.

Model buduje się przy założeniu dwóch czynników składających się na zmienność roczną. Są nimi: zmienność statyczna - spowodowana czynnikami astronomicznymi (czasy wschodów i zachodów słońca, pory roku), oraz nakładające się na zmienność statyczną dwa rodzaje przyrostów: ilościowy i jakościowy. Przez przyrost jakościowy rozumie się zmianę struktury ogółu odbiorców energii elektrycznej.

Ogólnym modelem zmienności wielkości miesięcznych  $Y_p$  (gdzie  $p$  jest numerem miesiąca) jest funkcja:

$$(1) \quad Y_p = \left(1 + \frac{p}{12} \alpha\right) (b + a \cdot \cos \psi_p)$$

gdzie:  $\alpha$  - względny roczny przyrost wielkości  $Y$ , który rozkłada się liniowo na miesiące;  $a, b$  - amplituda i wartość średnia funkcji trygonometrycznej;

$$(2) \quad \psi_p = (2p - 1)2\pi/24.$$

Drugi człon równania (1) stanowi funkcję modelującą zmienność statyczną. Innymi słowy jest to proces oczyszczony z przerostów rocznych, których wyróżnia się dwa rodzaje: względny roczny przyrost energii oraz względny roczny przyrost mocy:

$$(3) \quad \alpha_A = \frac{A_r - A_{r-1}}{A_{r-1}},$$

$$(4) \quad \alpha_S = \frac{P_{Sr} - P_{S,r-1}}{P_{S,r-1}},$$

gdzie:  $A_r, A_{r-1}$  - energia roczna odpowiednio w roku  $r$  i  $r-1$ ;  $P_{Sr}, P_{S,r-1}$  - szczytowe obciążenie w roku  $r$  i  $r-1$ .

Parametry  $a$  i  $b$  w praktyce estymuje się przy użyciu równań:

$$(5) \quad a = \frac{Y_{12}^{stat} - Y_7^{stat}}{\cos \Psi_{12} - \cos \Psi_7},$$

$$(6) \quad b = 0,5 \cdot (Y_{12}^{stat} + Y_7^{stat}).$$

Wg [1], wskaźnikiem określającym strukturę odbiorców o składzie pośrednim między początkiem i końcem rozpatrywanego roku, z którego wyeliminowano przyrost ilościowy jest tzw. średni roczny statyczny stopień obciążenia:

$$(7) \quad m_r^{stat} = \frac{A_r}{T_r \cdot P_{Sr}} \cdot \frac{1 + \frac{\alpha_A + \alpha_S}{2}}{1 + 0,54 \cdot \alpha_A}$$

gdzie:  $T_r = 8760$  h.

Miesięczne wielkości statyczne szczytów miesięcznych i energii średniodobowych definiują wzory:

$$(8) \quad P_{Sp}^{stat} = \frac{P_{Sp}}{1 + \frac{p}{12} \cdot \frac{\alpha_A + \alpha_S}{2}},$$

$$(9) \quad A_{dsrp}^{stat} = \frac{A_{dsrp}}{1 + \frac{p}{12} \cdot \alpha_A}.$$

Dla praktycznego wykorzystania modelu w zakresie podmiotowych procesów kluczowe znaczenie ma

identyfikacja korelacji między rocznym statycznym stopniem obciążenia a rocznym statycznym stopniem zmienności szczytów miesięcznych:

$$(10) \quad \sigma_r^{stat} = \frac{P_{S7}^{stat}}{P_{Sr}^{stat}} = f(m_r^{stat}),$$

oraz między rocznym statycznym stopniem obciążenia a rocznym statycznym stopniem zmienności miesięcznych energii średniodobowych:

$$(11) \quad \sigma_{rA}^{stat} = \frac{A_{dsr7}^{stat}}{A_{dsr12}^{stat}} = f(m_r^{stat})$$

Wyznaczenie funkcji (10) i (11) realizuje się na różne sposoby [1, 4, 6].

Główne kroki algorytmu postępowania prognostycznego w rozpatrywanym przypadku obejmują:

- wyznaczenie rocznych przyrostów względnych mocy i energii ze scenariuszowych prognoz  $A_r$  i  $P_{Sr}$ ;
- wyznaczenie wartości  $m_r^{stat}$ ;
- wyznaczenie wartości  $\sigma_r^{stat}$  oraz  $\sigma_{rA}^{stat}$  jako  $f(m_r^{stat})$ ;
- obliczenie parametrów  $a, b$  funkcji (1) obu procesów w oparciu o zależności (5), (6), (10) i (11);
- obliczenie wartości statycznych procesów mocy szczytowych i energii średniodobowych;
- przeliczenie wartości statycznych na dynamiczne z użyciem przekształconych wzorów (4) i (5).

#### Analiza

Założono ograniczenie potrzeby oddziaływania składnika korygującego modelu do miesięcy letnich, za które przyjęto czerwiec, lipiec i sierpień. W celu wyodrębnienia danych statystycznych do opracowania korekty wykonano poniższe kroki.

- W oparciu o dane z lat 1991-2012 przekształcono przebieg szczytów miesięcznych  $P_{sp}$  oraz przebieg miesięcznych wartości energii średniodobowej  $A_{dsrp}$  w ich przebiegi statyczne.
- Dla każdego roku osobno dopasowano do obu przebiegów statycznych model (1), estymując amplitudę  $a$  i średnią  $b$  metodą najmniejszych kwadratów, jednak z pominięciem realizacji procesów w miesiącach letnich (przykładowe efekty wybiórczego dopasowania ilustrują rysunki 3 i 4):

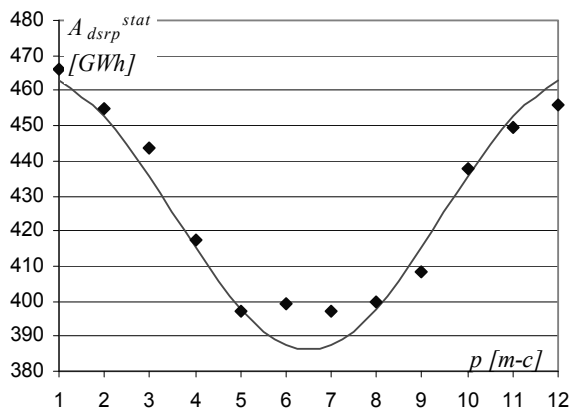
$$(12) \quad a = \frac{n \sum y_p^{stat} \cdot \cos \Psi_p - \sum y_p^{stat} \cdot \sum \cos \Psi_p}{n \sum \cos^2 \Psi_p - \left( \sum \cos \Psi_p \right)^2}$$

$$(13) \quad b = \frac{\sum y_p^{stat} \cdot \sum \cos^2 \Psi_p - \sum y_p^{stat} \cdot \cos \Psi_p \cdot \sum \cos \Psi_p}{n \sum \cos^2 \Psi_p - \left( \sum \cos \Psi_p \right)^2}$$

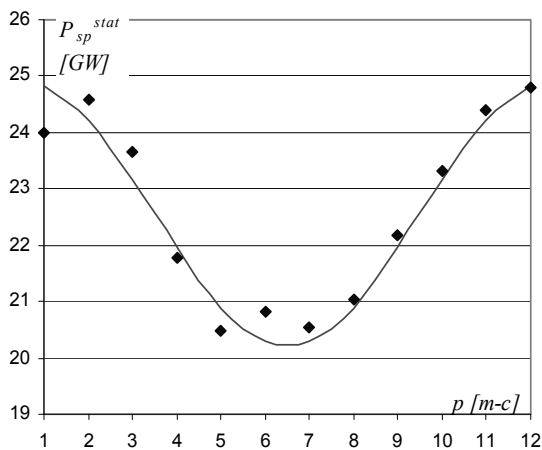
gdzie:  $n = 9$ ,  $p = 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12$  - numery użytych miesięcy.

- Dla obu procesów i każdego roku statystyki obliczono reszty z dopasowania modeli w miesiącach letnich. Reszty zostały przedstawione na wykresie (rys.5).

Przebieg reszt sugeruje możliwość przyjęcia założenia o liniowości ich trendu. Jednak pamiętając o przyczynach podmiotowego zjawiska, w przyszłości należy oczekiwać wygaszenia przyrostowego charakteru trendu w miarę nasycania systemu elektroenergetycznego urządzeniami wentylacyjno-klimatyzacyjnymi. Wydaje się, że podmioty niektórych sektorów gospodarki są już w znacznym stopniu wyposażone w rozpatrywaną kategorię urządzeń i wydaje się jednocześnie, że w innych sektorach, choćby wśród gospodarstw domowych, pozostaje znaczny potencjał. W przypadku odbiorców indywidualnych tempo nasycania będzie zależeć głównie od stopnia zamożności. Dalsze rozważania w tym kierunku wymagałyby zagłębienia się w analizy ekonomiczne. Dla tytułowego zadania istotna jest potrzeba uwzględnienia parametryzacji przewidywanego zachowania trendu.

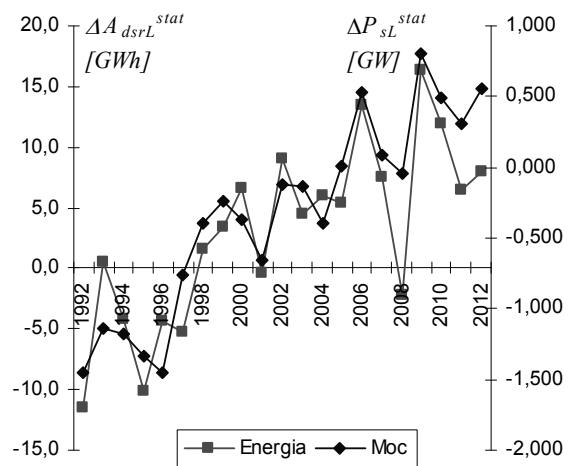


Rys.3. Dopasowanie wybiórcze  $A_{dsrp}^{stat}$  dla 2012 roku



Rys.4. Dopasowanie wybiórcze  $P_{sp}^{stat}$  dla 2011 roku

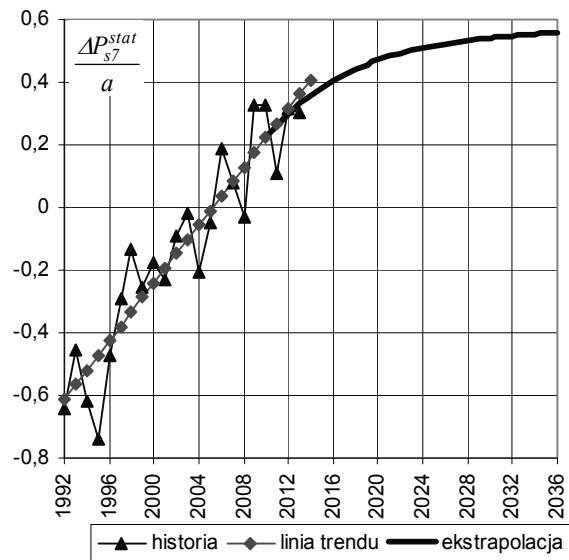
Na komentarz zasługują obserwowane na początku lat dziewięćdziesiątych ujemne wartości reszt dopasowania. Oznaczają one mniejsze zapotrzebowanie na moc i energię w okresie letnim niż wynikałoby to z oczekiwanej modelowej cosinusoidy. Zjawisko to można tłumaczyć specyfiką funkcjonowania gospodarki w tamtym okresie. Wiele przedsiębiorstw odnotowało wtedy przestoje lub funkcjonowało w ograniczonym zakresie. Regułą o podłożu ekonomicznym jest, że w przeciągu roku największe nasilenie takich zachowań występuje latem, co znalazło odbicie w relatywnie zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię i moc w systemie.



Rys.5. Wartości średnie z reszt dopasowania dla miesięcy letnich

### Opracowanie korekty

Narzucający się w naturalny sposób, wykładniczo zanikający trend wypiętrzania obciążeń letnich, bez użycia dodatkowych zmiennych o charakterze ekonomicznym, nie daje wystarczająco istotnych estymacji stałych czasowych takich aproksymacji. Do celów praktycznych proponuje się użycie ekstrapolacji liniowej przedłużonej np. krzywą Béziera o parametrach dobranych tak, aby spełniły arbitralne ograniczenia użytkownika modelu w postaci początkowego roku wygaszania (punktu sklejenia trendu liniowego z krzywą) oraz stałej czasowej. Dodatkowym zabiegiem jest wykonanie obliczeń na resztach odniesionych do amplitudy  $a$ . Przykład zilustrowano na rysunku 6.



Rys.6. Ekstrapolacja trendu wypiętrzania dla procesu szczytów lipcowych -  $P_{s7}$ , jako funkcja sklejana: liniowa i krzywa Béziera (początek wygaszania: 2010 rok, stała czasowa: 8 lat)

W celu oszacowania potencjalnych korzyści z rozbudowy modelu, zostały porównane błędy dopasowania modelu oryginalnego i modelu wzbogaconego o korekty. Ekstrapolacja liniowa korekt została sporządzona osobno dla każdego z miesięcy letnich, na szeregu czasowym wartości reszt odniesionych do amplitudy modelu trygonometrycznego. W efekcie, w porównaniu ze zwykłą procedurą, uzyskano średnią poprawę błędów MAPE rzędu

0,8 %, co zostało uznane za wystarczającą zachętę do kontynuacji pracy.

W toku dalszych czynności wykonano kontrolną quasi-prognozę wygasła energii średniodobowych i szczytów miesięcznych, analogicznie do procedur opisywanych w [6], które odpowiednio zmodyfikowano. W szczególności:

- zastąpiono statyczny stopień zmienności szczytów miesięcznych (10) wyrażeniem:

$$(14) \quad \sigma_5'^{stat} = \frac{P_{s5}^{stat}}{P_{sr}^{stat}},$$

gdzie:  $P_{s5}^{stat}$  - statyczny szczyt maja;

- zastąpiono statyczny stopień zmienności miesięcznych energii średniodobowych wyrażeniem:

$$(15) \quad \sigma_{5A}'^{stat} = \frac{A_{dsr5}^{stat}}{A_{dsr12}^{stat}};$$

- w konsekwencji amplitudę  $a$  i średnią  $b$  dla modeli statycznych wyznaczono wg wzorów :

$$(16) \quad a = \frac{Y_{12}^{stat} - Y_5^{stat}}{\cos \psi_{12} - \cos \psi_5}$$

$$b = \frac{Y_5^{stat} \cdot \cos \psi_{12} - Y_{12}^{stat} \cdot \cos \psi_5}{\cos \psi_{12} - \cos \psi_5}$$

Trendy wypiętrzania sparametryzowano jednorazowo na podstawie historii procesu z lat 2003-2008. Prognoza objęła lata 2009-2012. Uzyskane wartości średnie względnych przyrostów statycznych zostały dodane do poszczególnych miesięcy letnich po wymnożeniu przez wskaźniki skali:

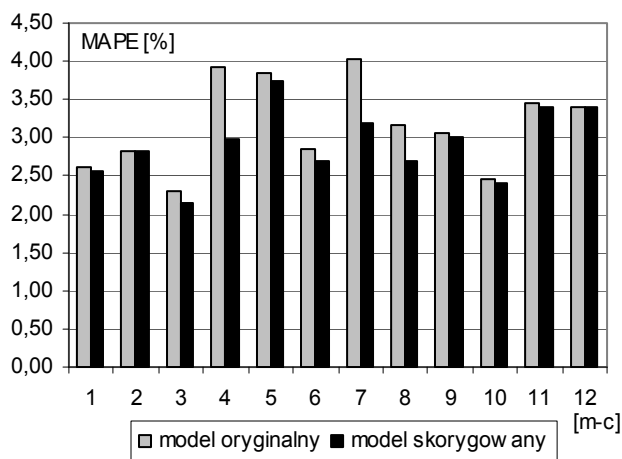
$$(17) \quad w_p = \frac{\cos \psi_p}{\sum_{p=6}^8 \cos \psi_k}$$

Wyniki w postaci wykresów błędów MAPE dla poszczególnych miesięcy zaprezentowano na rysunkach 7 i 8 zestawiając je dla porównania wynikami modelu oryginalnego.

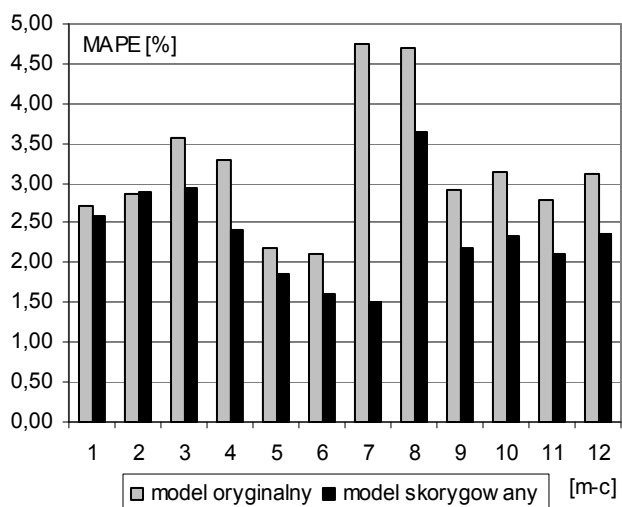
### Wnioski

W porównaniu ze zwykłą procedurą, uzyskano poprawę błędów MAPE rzędu 0,5% dla procesu energii średniodobowych i 0,4% dla szczytów miesięcznych, co może zostać uznane za uzasadnienie celowości stosowania przedstawionego rozszerzenia metodyki.

W przyszłości, oprócz identyfikacji i weryfikacji procesu wygaszania trendu wypiętrzania obciążeń, wartościowa może być kwestia pozyskania prostych metod wiążących wartości korekt ze średnimi temperaturami, w celu umożliwienia otrzymania różnych wariantów prognoz dla zakładanych różnych warunków klimatycznych w sezonie letnim.



Rys.7. Błędy MAPE modelu oryginalnego i skorygowanego dla procesu szczytów miesięcznych -  $P_{sp}$



Rys.8. Błędy MAPE modelu oryginalnego i skorygowanego dla procesu miesięcznych energii średniodobowych -  $A_{dsrp}$

### LITERATURA

- [1] Kopecki K.: Analiza zmienności obciążeń systemów energetycznych w Polsce. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej. Elektryka Nr 2 (1958).
- [2] Dobrzańska I., Gallus E.: Wykresy obciążeń doby grudniowej i lipcowej polskiego systemu energetycznego. Instytut Energetyki. Nr inw. 2871. Katowice 1962.
- [3] Praca zbiorowa: Analiza i prognoza obciążeń elektroenergetycznych. WNT. Warszawa 1971.
- [4] Dobrzańska I., Dąsal K., Łyp J., Popławski T., Sowiński J.: Prognozowanie w elektroenergetyce. Zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej (2002).
- [5] Popławski T., Łyp J., Starczynowska E., Hybrydowy model predykcji długoterminowej miesięcznych szczytów obciążenia w krajowym systemie elektroenergetycznym. Rynek Energii, nr 2 (87) (2010), 132-137.
- [6] Łyp J., Kurach M.: Problematyka prognozowania sezonowej zmienności obciążeń szczytowych krajowego systemu elektroenergetycznego, *Rynek Energii*, nr 1 (92) (2011), 97-100. (2011), 49-55

**Autor:** dr inż. Jacek Łyp, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [jackrat@el.pcz.czest.pl](mailto:jackrat@el.pcz.czest.pl)