

DEFINICJA STREF CZASOWYCH WIELOSTREFOWEJ TARYFY DYNAMICZNEJ DLA ODBIORCÓW GRUPY TARYFOWEJ G12

Kinga BOJDA¹, Piotr SAŁUGA²

1. Miejsce pracy PSE Innowacje Sp. z o.o., Biuro w Katowicach
tel.: 509 818 925 e-mail: kinga.bojda@pse.pl
2. Miejsce pracy Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
e-mail: psaluga@zarz.agh.edu.pl

Streszczenie: Rynek energii elektrycznej zmierza się z wyzwaniami wynikającymi z istotnych modyfikacji i przeobrażeń implikowanych zarówno przez Regulatora jak i Uczestników Rynku. Zmiany przypadają na obserwowany okres systematycznego wzrostu zapotrzebowania na energię, zmian cen energii na rynku hurtowym jak i postępującej cyfryzacji elementów sieci elektroenergetycznej. Wyzwania te stwarzają realną szansę na skuteczne wdrażanie mechanizmów strony popytowej umożliwiających stymulację zarządzania zużyciem energii elektrycznej lub świadome kształtowanie jej poboru przez odbiorców. Jednym z narzędzi umożliwiających realizację tego celu są taryfy dynamiczne. W celu zaproponowania taryfy dynamicznej dopasowanej do realiów polskiego rynku energii za pomocą analizy skupień dokonano badania definiującego potencjalne strefy czasowe dla dotychczasowych użytkowników grupy taryfowej G12.

Słowa kluczowe: taryfy dynamiczne, definicja stref czasowych, taryfa TOU, analiza skupień.

1. WSTĘP

Obserwowany trend zwiększania się zapotrzebowania na moc w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym KSE wpływa na wzrost dysproporcji między charakterystycznymi okresami szczytów oraz dolin zapotrzebowania. Wynika to z zachodzącego postępu technologicznego, intensyfikacji elektromobilności czy wzrostu liczby urządzeń klimatyzacyjnych. Wyzwania te stwarzają realną szansę na efektywne wdrażanie mechanizmów strony popytowej umożliwiających skoordynowane i elastyczne zarządzanie zużyciem energii elektrycznej lub czasem jej pobierania przez odbiorców. Do jednego z takich mechanizmów należą taryfy dynamiczne cechujące się zmiennymi stawkami opłat za energię elektryczną. Zmienność stawek może być realizowana ze względu na rzeczywiste lub sztucznie wykreowane sygnały cenowe np. pochodzące z hurtowego rynku energii. Dynamiczne systemy ustalania cen mają na celu zmotywowanie konsumentów do zmiany poboru energii lub zmniejszenia jej zużycia.

W celu zaprojektowania taryfy dynamicznej, odpowiadającej realiom rynku energii w Polsce niezbędnym jest wykonanie szeregu analiz w celu wypracowania jak najlepszej strategii zarówno dla wytwórców, dystrybutorów, sprzedawców oraz odbiorców końcowych. Pojawienie się taryfy dynamicznej może umożliwić wybór większej liczby

zmiennych determinujących poziom stawek opłat. Obecny mechanizm ustalania taryf koncentruje się głównie na pokryciu kosztów wytwarzania i usług systemowych bez uwzględnienia faktycznych poziomów cen na rynku hurtowym. Poziomy opłat dla odbiorców zależą od lokalizacji danego dystrybutora i wyboru sprzedawcy, a nie od praw fizyki i realnych kosztów wynikających z potrzeby zasilania danego obszaru. Subsydiowanie oraz brak informacji o poziomie zużycia energii nie powodują zwiększania się świadomości energetycznej konsumentów oraz nie generują sygnałów do racjonalizowania jej wykorzystywania. Modyfikacja kształtowania stawek opłat, która pozwoliłaby na odzwierciedlenie sytuacji rynkowej np. aktualnej ceny energii na rynku hurtowym mogłaby stwarzać zachętę dla odbiorców końcowych w celu wzrostu efektywności użytkowania energii. Realne sygnały cenowe mogłyby umożliwić przesuwanie poboru energii w celu wyrównywania dysproporcji między okresami szczytów oraz dolin zapotrzebowania KSE [2], [3]. W celu osiągnięcia takiego stanu istotnym jest zaprojektowanie taryfy dynamicznej, o zmiennych stawkach opłat, umożliwiającej przemodelowanie obecnego podejścia. Jednym z istotnych elementów kształtowania taryfy dynamicznej jest określenie definicji stref czasowych na podstawie analizy profili obciążenia odbiorców. W artykule na podstawie przeprowadzonej analizy skupień rozważono definicję stref czasowych ze względu na dane dotyczące standardowych profili zużycia energii dla grupy taryfowej G12 [4], [5], [6], [7], [8], kursu średniego ważonego z Rynku Dnia Następnego RDN [9] oraz temperatury otoczenia [10].

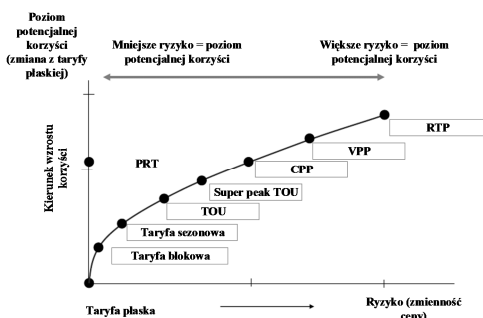
2. CHARAKTERYSTYKA TARYF

Globalny wybór taryf dla gospodarstw domowych w Polsce ograniczony jest do taryf jednostrefowych (G11) oraz dwustrefowych (G12 oraz jej odmiany np. G12w, G12r). Tylko jeden Operator Systemu Dystrybucyjnego OSD oferuje dodatkowo taryfę G13, w której istnieje podział na trzy okresy: szczytu przedpołudniowego, szczytu popołudniowego oraz pozostałych godzin doby definiowanych w zależności od pory roku (lata lub zimy). W chwili obecnej taryfy dynamiczne nie znajdują się w ofercie dużych graczy na rynku energii w Polsce. Odwrotna tendencja zachodzi jednak w innych krajach, które

to korzystają z nich na szeroką skalę. Do krajów tych należą: Wielka Brytania, USA, Australia czy Nowa Zelandia. Istnieje wiele rodzajów i odmian taryf dynamicznych, do których należą m.in. [11]:

- Taryfa wielostrefowa TOU (ang. *Time of Use*) o różnych poziomach stawek w zależności od pory dnia, przy założeniu wysokich stawek w godzinach szczytu i niskich poza szczytem obciążenia, wraz z odmianami TOD (ang. *Time of Day*) oraz *Superpeak* TOU.
- Taryfa z cenami krytycznymi CPP (ang. *Critical Peak Pricing*) – o cenach krytycznych ustalanych w czasie rzeczywistego maksymalnego szczytu obciążenia oraz o obniżonej stawce w pozostałych godzinach doby.
- Taryfa ze zmiennymi cenami krytycznymi VPP (ang. *Variable Peak Pricing*) – odmiana taryfy CPP różniącą się rozdzielczością ustalania cen szczytowych z dnia na dzień.
- Taryfa czasu rzeczywistego RTP (ang. *Real Time Pricing*) – o zmiennych stawkach opłat modyfikowanych w interwałach od godziny do kilku minut odzwierciedlających faktyczne koszty procesów związanych z energią elektryczną.
- Taryfa rabatowa w okresach szczytowych PRT (ang. *Peak Time Rabates*) – taryfa będąca przeciwieństwem do taryfy CPP, wprowadzająca rabaty cenowe (do wykorzystania w późniejszym terminie) w momencie ograniczenia zużycia energii w szczycie.
- Taryfa sezonowa – taryfa oferująca zróżnicowane stawki opłat w zależności od pór roku z wyższą stawką w okresach wysokiego zapotrzebowania.
- Taryfa blokowa – taryfa obciążająca użytkowników opłatami o wysokości w zależności od poziomu zużycia energii elektrycznej.

Wprowadzenie wybranego rodzaju taryf dynamicznych na rynek polski będzie generował potrzebę dostosowania systemów rozliczeniowych, oprogramowania oraz odpowiedniej kampanii edukacyjnej. Ze względu na zróżnicowany charakter taryf ich implementacja powinna wynikać z rozwoju rynku energii, nasycania sieci opomiarowaniem typu smart czy realizacji analiz i badań w tej tematyce. Wybór taryfy powinien być zależny od stopnia tych modyfikacji, oceny poziomu ryzyka oraz potencjalnej korzyści wynikającej ze zmiany. W zależności od rodzaju taryfy zróżnicowanie dwóch ostatnich czynników zilustrowano w na rysunku 1. Taryfą o potencjalnym wdrożeniu w pierwszej kolejności w Polsce ze względu na stosunkowo niski poziom ryzyka może być taryfa TOU, dla której niezbędne jest oszacowanie godzin stref czasowych obowiązywania różnych stawek opłat.



Rys. 1. Mapowanie ryzyka i korzyści dla taryf dynamicznych [11]

3. ANALIZA SKUPIEŃ

Analiza skupień czyli grupowanie obiektowe (ang. *Cluster Analysis*) zalicza się do metod wielowymiarowej analizy statystycznej wykorzystywanej do wyodrębniania jednorodnych grup obiektów. Jest to nienadzorowana metoda uczenia polegająca na organizowaniu danych w uzasadnione struktury. Jej głównym zadaniem jest eksploracja danych polegająca na dzieleniu zbioru na grupy w celu wykrycia w zbiorze danych interpretowalnych skupień [12], [13].

Ze względu na specyfikę zarówno kształtu przebiegu zapotrzebowania na energię elektryczną oraz podziału na strefy czasowe obecnych grup taryfowych w Polsce oraz na świecie do poniższej analizy skupień wybrano metodę *k*-średnich. Należy ona do niehierarchicznych metod grupowania, w której jako założenie *a priori* przyjmuje się liczbę skupień *k*. Założeniem podziału jest maksymalizacja podobieństwa danych wewnątrz grupy przy minimalizacji podobieństwa względem pozostałych grup. Działanie algorytmu oparte jest na wyznaczaniu macierzy odległości euklidesowych między badanymi obiektami.

Algorytm rozpoczyna tworzenie skupień od losowego grupowania danych w oparciu o centra startowe. Kolejnym krokiem jest iteracyjne wykonanie ponownego dopasowania danych do skupień. W przeprowadzonych badaniach analitycznych dobór skupień odbywał się przy założeniu maksymalnie 10 iteracji. Zatrzymanie algorytmu zachodziło w przypadku wykonania maksymalnej liczby iteracji lub braku zmienności położenia środków klastrów z poprzedniej iteracji z iteracją obecną [13].

Grupowanie na podstawie wyboru liczby skupień tworzy *k* skupień jak najbardziej różniących się od siebie. Początkowego wyboru *k* środków skupień oraz podziału obiektu dokonuje się w sposób arbitralny. Ze względu na specyfikę profilu zapotrzebowania na energię w analizie ograniczono się do analizy *k* = 2, 3, 4 skupień. Do oceny otrzymanych wyników posłużono się wskaźnikiem *Davies-Bouldina*, którego minimalizacja wartości determinuje poprawność modelu obliczeniowego [14]. Ze względu na definicję indeksu jak najniższa jego wartość oznacza najlepszy dobór liczby skupień w zależności od danych wejściowych. Wskaźnik *Davies-Bouldina* określony jest za pomocą zależności (1):

$$DB = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{k \neq i} \frac{S_i + S_k}{M_{ik}} \quad (1)$$

gdzie: *k* - liczba skupień, *M_{ik}* - miara odległości pomiędzy skupieniami, *S_i*, *S_k* - miara rozrzutu wewnątrz skupienia.

4. BADANIA

Założeniem analizy był wybór danych wejściowych obejmujących:

- uśrednione standardowe profile zużycia energii dla grupy taryfowej G12 (TAURON, PGE, INNOGY, ENERGA, ENEA) [4], [5], [6], [7], [8],
- kurs średni ważony z rynku RDN (TGE) [9],
- temperatura otoczenia (IMGW) [10].

Zmienne wejściowe zostały przyjęte w sposób ekspercki ze względu na brak potrzeby badania ich istotności statystycznej. Założenie to wynika eksploracyjnej natury

analizy skupień wykonywanej w momencie braku posiadania hipotez *a priori* odnośnie danego zjawiska [12]. Kolejnymi założeniami przeprowadzonej analizy była losowość oraz brak współliniowości danych [13]. Wybór dni poddanych analizie został wykonany w sposób losowy. W celu wykonania analizy wylosowano cztery szeregi czasowe, po dwa dla dni roboczych między poniedziałkiem a piątkiem oraz dwa dla sobót, niedziel lub świąt. Analiza wykonana została dla dwóch charakterystycznych okresów roku - lata oraz zimy. Brak współliniowości danych określony został na podstawie współczynnika współliniowości VIF (ang. *Variance Inflation Factor*) ze wzoru (2) [12]:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (2)$$

gdzie: R_i^2 – współczynnik determinacji.

Wszystkie zmienne spełniły warunek konieczny o braku współliniowości (wartości poniżej 10) co uzasadniło ich pozostawienie w modelu obliczeniowym. Następnym krokiem było przeprowadzenie analizy skupień metodą k -średnich w środowisku obliczeniowym RapidMiner Studio. Dla każdego z zestawu danych wejściowych (4 zestawy) wykonano analizę skupień przy iteracyjnym wyborze $k = 2, 3, 4$ skupień. Elementem oceny było wyznaczenie wskaźnika *Daviesa-Bouldina*, którego wartości dla każdego z przypadków zestawiono w tabelicy 1.

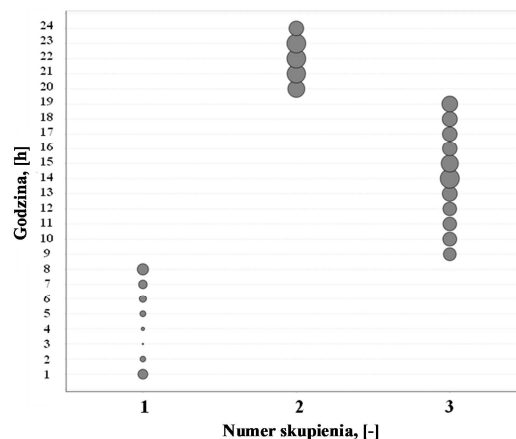
Tabela 1. Zestawienie wskaźników *Daviesa-Bouldina*

Typ dnia	Pora roku	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
Roboczy	lato	0,730	<u>0,603</u>	0,605
	zima	0,906	0,776	<u>0,743</u>
Świąteczny	lato	0,669	<u>0,524</u>	0,707
	zima	0,626	0,557	<u>0,552</u>

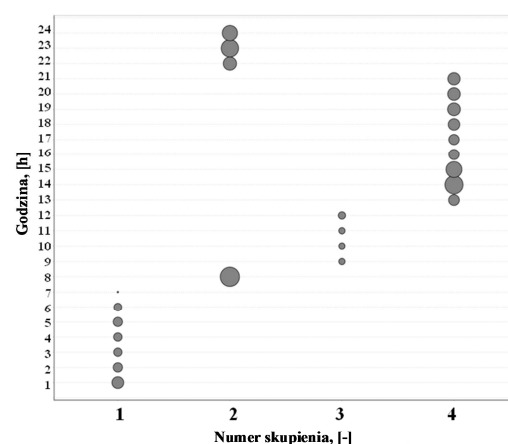
Zgodnie z definicją optymalny dobór liczby skupień został oszacowany na podstawie najmniejszego wskaźnika *Daviesa-Bouldina* (wartości podkreślone i pogrubione w tabelicy 1.). Wizualizacje tych przypadków zostały przedstawione na rysunkach 2 - 5. Wykresy bąbelkowe przedstawiają podział godzin doby w zależności od stworzonej liczby skupień. Średnica bąbelków wynika z poziomu zużycia energii w danej godzinie.

Na podstawie przeprowadzanego badania zauważa się, taką samą definicję stref czasowych dla profili letnich (dzień roboczy oraz świąteczny). Znacząca różnica obserwowana jest przy porównaniu profili zimowych. Zestawienie otrzymanych wyników w zależności od typów dnia wskazuje znaczną rozbieżność w definicji stref czasowych między dniami roboczymi a świątecznymi, co wynika ze zmiennej specyfiki poboru energii w tych szczególnych dniach.

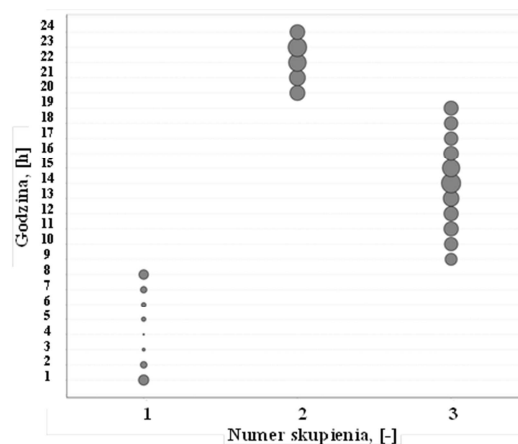
Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że optymalnym podziałem przebiegu zapotrzebowania w celu definicji stref czasowych dla taryfy wielostrefowej są 3 strefy czasowe w okresie letnim oraz 4 strefy czasowe w zimę. Zestawienie przyporządkowanych godzin doby w zależności od badanego scenariusza zostało zamieszczone w tabelicy 2. Pogrubione i podkreślone wartości godzin świadczą o wystąpieniu dobowego szczytu zapotrzebowania w trakcie ich trwania na podstawie historycznego zapotrzebowania KSE. Okresy te cechują się występowaniem najwyższych cen na rynku hurtowym.



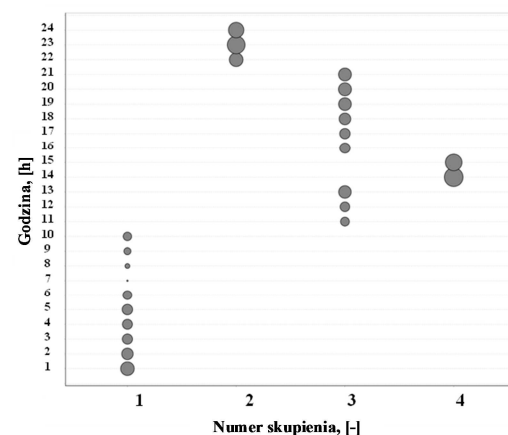
Rys. 2. Wizualizacja skupień dla profilu roboczego (lato)



Rys. 3. Wizualizacja skupień dla profilu roboczego (zima)



Rys. 4. Wizualizacja skupień dla profilu świątecznego (lato)



Rys. 5. Wizualizacja skupień dla profilu świątecznego (zima)

Tablica 2. Zestawienie przyporządkowanych godzin doby

Numer skupienia		1	2	3	4
Typ dnia	Pora roku	Godziny doby			
Roboczy	lato	1-8	20-24	<u>9-19</u>	-
	zima	1-7	8, 22-24	9-12	<u>13-21</u>
Świąteczny	lato	1-8	<u>20-24</u>	9-19	-
	zima	1-10	22-24	<u>11-13,</u> <u>16-21</u>	14-15

5. WNIOSKI

Wykonana analiza ograniczała się do definicji stref czasowych dla taryfy G12 dla charakterystycznych okresów poziomu zapotrzebowania na energię - lata i zimy. Pozwala ona na oszacowanie pewnych trendów – zmienności danych wejściowych w zimę i stabilności wartości zmiennych dla okresu letniego. Przeprowadzona faza badań powinna być pierwszym etapem tworzenia wielostrefowej taryfy dynamicznej (np. typu TOU). Istotnym jest jednak, by wdrożenie taryfy dynamicznej poprzedzone było przeprowadzeniem bardziej szczegółowych badań określających definicję stref czasowych przy większej granulacji badanych przypadków np. kwartalnie czy miesięcznie.

Zwiększenie liczby stref oraz zmienność stawek opłat przy udziale opomiarowania typu smart może w realny sposób wpłynąć na stymulację poboru energii przez gospodarstwa domowe [15]. Dlatego też istotnym jest szerokie podejście do omawianego zagadnienia poprzez przeanalizowanie innych metod grupowania, wykonanie większej liczby symulacji lub przebadanie innych grup taryfowych np. C12a czy C12b.

Z rezultatów przeprowadzonej analizy wynika, że uzyskany podział stref czasowych cechuje się większą szczegółowością niż w taryfie G12. Wnioskuje się, że podział godzin dla taryfy dynamicznej oferowanej gospodarstwom domowym powinien cechować się tym samym poziomem stawek dla danej strefy. Najwyższy poziom opłat powinien być skorelowany ze strefami o momentach występowania dobowego szczytowego zapotrzebowania, co wynika bezpośrednio z kształtowania się cen na rynku hurtowym. Warto zauważyć jednak, że pomimo tego samego przyporządkowania godzin dla wylosowanego profilu roboczego i świątecznego w lecie

stawki opłat mogą (a nawet powinny) różnić się między strefami.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.: Europejski rynek energii elektrycznej – diagnoza, Warszawa, 2018.
2. Majka K.: Systemy rozliczeń i taryfy w elektroenergetyce, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2005.
3. Korab R.: Ceny (i stawki) węglowe – harmonizacja rozwiązań rynkowych z nowymi trendami rozwojowymi. Acta Energetica, nr 2, 2016., s. 31-40.
4. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Energa Operator, 2018.
5. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Enea Operator, 2018.
6. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Tauron Dystrybucja S.A., 2018.
7. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Innogy Stoen Operator Sp. z o.o., 2018.
8. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. PGE Dystrybucja S.A., 2018.
9. Witryna internetowa: <https://tge.pl/pl/541/wyniki-rdn> (dostęp: 12.02.2019)
10. Witryna internetowa: https://dane.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obszerwacyjne/dane_meteorologiczne/terminowe/synop/ (dostęp: 12.02.2019)
11. Dutta G., Mitra K.: Dynamic Pricing of Electricity: A Survey of Related Research, Indian Institute of Management, Ahmedabad, India, 2015.
12. Witryna internetowa: www.statsoft.pl (dostęp: 2019.02.12)
13. Wierzchoń S., Kłopotek S.: Algorytmy analizy skupień, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015.
14. Davies D.L., Bouldin D.W.: A Cluster Separation Measure, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, USA, 1979.
15. Bojda K., Sołtysik M.: Wpływ elektromobilności na rozwój gmin i klastrów energii przy wykorzystaniu możliwości stymulacji cennikowej, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, nr 107, 2018, s. 119–134.

DEFINITION OF TIME OF USE TARIFF TIME ZONES FOR G12 TARIFF GROUP USERS

The electricity market faces challenges resulting from significant modifications and transformations implied by both Regulator and Market Participants. The changes fall on the observed period of increasing power demand, increase in energy prices on the wholesale market as well as the progressive digitization of the power grid. These challenges create a real chance for effective implementation of demand side mechanisms that enable stimulation of electricity consumption management or modification of its consumption by users. Dynamic tariffs are one of the tools to achieve this goal. To propose a dynamic tariff (e.g. multi-zone) shaped to the realities of the Polish energy market by means of cluster analysis, a study was made to define potential time zones for the previous users of tariff group G12.

Keywords: dynamic tariffs, time zones definition, TOU tariff, cluster analysis.