

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

**WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI**



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Agnieszka Weychan

**Wyznaczanie elastyczności popytu na energię elektryczną odbiorców
korzystających z taryf strefowych poprzez analizę porównawczą ich profili
obciążeń**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Józef Lorenc

Promotor pomocniczy:

dr inż. Jerzy Andruszkiewicz

Poznań, 2021

Spis treści

1.	Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy	3
2.	Cel, teza i zakres pracy	4
3.	Struktura pracy	5
4.	Proponowana metoda wyznaczania cenowej elastyczności popytu.....	6
5.	Wyniki przeprowadzonych analiz	8
6.	Zastosowanie proponowanej metody	11
7.	Wnioski	14
8.	Dorobek naukowy Autorki	16

1. Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy

Sterowanie popytem na energię elektryczną (ang. Demand Side Response, DSR) staje się coraz bardziej istotnym zasobem do regulacji pracy systemu elektroenergetycznego na całym świecie. W związku z rosnącym udziałem odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym wielu państw, w tym Polski, który ma osiągnąć 23% do końca 2030 r., rosną również potrzeby na usługi elastyczności w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, które umożliwią niezawodne i bezpieczne dostawy energii elektrycznej do odbiorców. Ponadto, ze względu na rosnące wymagania dotyczące ochrony środowiska oraz redukcji emisji szkodliwych związków spalin, inwestycje w nowe konwencjonalne jednostki wytwórcze czy też modernizacja starych jednostek, tradycyjnie wykorzystywanych dla celów regulacji systemu, staje się coraz mniej opłacalna. Jednocześnie zaobserwować można rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, zwłaszcza w okresach szczytowego obciążenia, co może prowadzić do problemów z wystarczalnością generacji w systemie oraz przeciążeń elementów sieci. Poza tradycyjnymi sposobami regulacji pracy systemu elektroenergetycznego, alternatywnym rozwiązaniem na zapobieganie problemom w pracy systemu elektroenergetycznego jest sterowanie popytem na energię elektryczną, które definiowane jest jako wpływanie przez dostawcę przy współpracy z odbiorcą, na poziom zużycia i sposób korzystania z energii elektrycznej. Programy sterowania popytem odpowiadają również na potrzeby odbiorców, którzy pragną zoptymalizować ponoszone koszty związane ze zużyciem energii elektrycznej. Ze względu na liczne wyzwania dotyczące energii elektrycznej, zaprojektowanie skutecznych programów sterowania popytem jest aktualnie jednym z najbardziej istotnych zadań sektora energetycznego, co podkreślają liczne prace badawcze prowadzone na ten temat na całym świecie.

Głównym celem sterowania popytem jest dopasowanie obciążenia odbiorców do aktualnych warunków pracy systemu elektroenergetycznego. Szczegółowe rozwiązania DSR, zaimplementowane także w Polsce, obejmują programy cenowe, takie jak taryfy strefowe oraz programy bodźcowe, wśród których wyróżnić można elementy rynku mocy czy interwencyjną ofertową redukcję poboru mocy na polecenie operatora sieci przesyłowej. Efekty stosowania sterowania popytem są zbliżone do efektów osiągniętych przy stosowaniu środków poprawy efektywności energetycznej, ponieważ na skutek wyrównania krzywej obciążenia prowadzą one do lepszego wykorzystania zasobów systemu elektroenergetycznego i pozwalają na odsunięcie w czasie niezbędnej rozbudowy urządzeń systemu elektroenergetycznego.

W przedstawionej pracy doktorskiej analizowane są możliwości sterowania popytem przy wykorzystaniu usług taryfowych oraz oceny ich skuteczności oddziaływania w oparciu o wskaźnik cenowej elastyczności popytu, który charakteryzuje skłonność odbiorców do odpowiedzi na zmianę kosztów korzystania z energii elektrycznej. Wskaźniki cenowej elastyczności popytu mogą być wykorzystywane przez organizatorów programów sterowania popytem na potrzeby projektowania, modyfikacji oraz oceny wykorzystywanych programów. Motywacja podjęcia się badań w tym zakresie wynika z potrzeby poszukiwania nowych rozwiązań i sposobów wyznaczania wartości wskaźnika cenowej elastyczności popytu, które pozwalają na wykorzystanie dostępnych godzinowych konsumpcji energii przez odbiorców i są oparte na bieżących reakcjach odbiorców na oferty dostarczania energii elektrycznej.

Celem przedstawionej pracy doktorskiej jest analiza możliwości sterowania popytem przy wykorzystaniu usług taryfowych oraz ocena skuteczności oddziaływania taryf strefowych w oparciu o wskaźnik cenowej elastyczności popytu, który charakteryzuje sposób wykorzystania energii elektrycznej przez odbiorcę. Aby umożliwić ocenę efektywności taryf strefowych zaproponowano alternatywną do dotychczas wykorzystywanych metodę wyznaczania wskaźnika cenowej elastyczności popytu.

2. Cel, teza i zakres pracy

Głównym problemem badawczym poruszonym w pracy jest efektywne sterowanie popytem na energię elektryczną przy pomocy taryf strefowych, które wymaga znajomości cenowej elastyczności popytu na energię elektryczną analizowanych odbiorców.

Głównym oryginalnym **celem** niniejszej rozprawy jest opracowanie metody wyznaczania cenowej elastyczności popytu, która będzie oparta na aktualnych profilach zużycia energii elektrycznej wynikających z bieżących warunków rynkowych a nie z warunków historycznych oraz umożliwi szybkie i skuteczne wyznaczenie zarówno średnich, jak i chwilowych wartości cenowej elastyczności popytu odbiorców w taryfach strefowych. Proponowana metoda jest metodą alternatywną do metody analizy szeregów czasowych szeroko wykorzystywanej w literaturze na potrzeby wyznaczania cenowej elastyczności popytu.

W części badawczej rozprawy starano się wykazać słuszność następującej **tezy**:

cenowa elastyczność popytu odbiorców korzystających z taryf strefowych będąca podstawą efektywnego projektowania takich taryf, może być określona poprzez analizę zmian popytu na energię w strefach taryfowych występujących w wyniku reakcji odbiorców na bieżące oferty cenowe energii w tych strefach z uwzględnieniem użyteczności czasowej (okresowej) wykorzystywanych odbiorników.

Uzupełnieniem tak sformułowanej tezy mogą być kolejne następujące stwierdzenia:

- *na podstawie wartości cenowych elastyczności popytu możliwe jest zaprojektowanie nowej taryfy strefowej lub modyfikowanie bieżącej w celu osiągnięcia pożądanych efektów dotyczących profilu obciążenia grupy odbiorców,*
- *wartości cenowej elastyczności popytu umożliwiają określenie efektywności oddziaływania wybranych taryf strefowych na obciążenie w strefach, co przekłada się na profil obciążenia krajowego systemu elektroenergetycznego.*

Aby zrealizować cel rozprawy oraz zweryfikować postawioną tezę i uzupełniające twierdzenia, określono **zakres** rozprawy, który składa się z pięciu głównych zadań:

- 1) opracowanie metody wyznaczania średniej rocznej wartości cenowej elastyczności popytu odbiorców rozliczanych w taryfach strefowych opartej na bieżących ofertach taryfowych,
- 2) opracowanie metody wyznaczania zmienności sezonowych wartości elastyczności cenowej własnej i wzajemnej odbiorców rozliczanych w taryfach strefowych,

- 3) zastosowanie opracowanej metodyki wyznaczenia wartości elastyczności popytu dla oceny efektywności zmiany taryfy płaskiej G11 na taryfę dwustrefową G12 odbiorców typu gospodarstwo domowe dla wybranych operatorów sieci dystrybucyjnej (OSD) w Polsce wykorzystując standardowe profile obciążeń tych operatorów,
- 4) zastosowanie cenowej elastyczności popytu do modelowania profilu obciążenia nowo projektowanej zmodyfikowanej taryfy strefowej,
- 5) analiza efektywności oddziaływania wybranych taryf strefowych na obciążenie krajowego systemu elektroenergetycznego na podstawie wyznaczonych wartości cenowej elastyczności popytu.

3. Struktura pracy

Praca doktorska składa się łącznie z 8 rozdziałów i liczy łącznie 144 strony i została podzielona na dwie zasadnicze części.

W pierwszej części, obejmującej rozdziały 1 i 3 opisano zagadnienia teoretyczne istotne z punktu widzenia dalszych analiz praktycznych. Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do pracy oraz uzasadnienie wyboru poruszanej tematyki. W drugim rozdziale dokonano przeglądu dotychczasowej literatury przedmiotu, przedstawiono definicję cenowej elastyczności popytu, opisano zastosowanie tego wskaźnika w programach sterowania popytem oraz szczegółowo opisano dotychczas wykorzystywane metody wyznaczania cenowej elastyczności popytu wraz z wartościami elastyczności uzyskanymi dla poszczególnych badań. W kolejnym, trzecim rozdziale pracy, przedstawione zostały taryfy strefowe jako jedno z narzędzi sterowania popytem oraz scharakteryzowano taryfy stosowane w Polsce podkreślając opłacalność zmiany taryfy z jednostrefowej na wielostrefową dla indywidualnego odbiorcy. Część tą uzupełniono informacjami dotyczącymi standardowych profili obciążeń oraz zapotrzebowania na energię i moc w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym w godzinach szczytowego obciążenia.

W rozdziale czwartym określone zostały tezy oraz cele rozprawy doktorskiej, przedstawiono również zakres wykonanych analiz praktycznych.

W drugiej, zasadniczej części pracy doktorskiej, obejmującej rozdziały 5 – 7, Autorka zaprezentowała własne osiągnięcia badawcze i naukowe. W rozdziale piątym przedstawiono oryginalną metodę wyznaczania wskaźnika cenowej elastyczności popytu na energię elektryczną w usługach taryfowych, uwzględniając zarówno elastyczność cenową średnią, jak i szczegółowe wartości elastyczności własnej i wzajemnej. Wskaźniki te mogą stanowić podstawę oceny skuteczności obecnie stosowanych taryf lub być znaczącym elementem przy ich projektowaniu. W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki obliczeń cenowej elastyczności popytu dla odbiorców typu gospodarstwa domowe w latach 2016 i 2017 przeprowadzonych z wykorzystaniem oprogramowania Mathworks MATLAB R2018b, przedstawiono zmienność sezonową tych wskaźników, zdefiniowano również dokładność proponowanej metody oraz przedstawiono dyskusję uzyskanych wyników. W rozdziale siódmym natomiast przedstawiono możliwości zastosowania wskaźnika cenowej elastyczności popytu, obejmujące ocenę efektywności oddziaływania taryf strefowych dla poszczególnych lat oraz szczegółową ocenę efektywności oddziaływania taryf G12 w okresach szczytowego i pozaszczytowego obciążenia systemu elektroenergetycznego w poszczególnych sezonach. W rozdziale tym przedstawiono

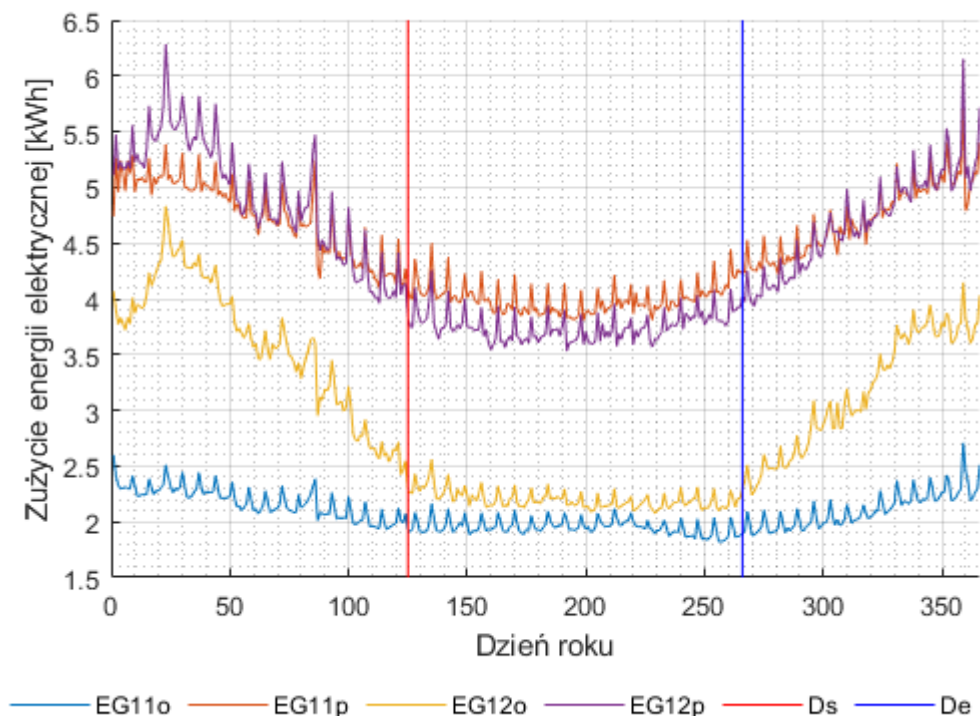
również analizę oddziaływania taryf strefowych na system elektroenergetyczny w wybranych godzinach doby.

W rozdziale ósmym dokonano podsumowania pracy formułując wnioski ogólne i szczegółowe, które są wynikiem przeprowadzonych badań, analiz oraz obliczeń i stanowią o nowych elementach i osiągnięciach naukowych Autorki.

4. Proponowana metoda wyznaczania cenowej elastyczności popytu

Proponowana metoda wyznaczania elastyczności cenowej popytu, alternatywna do metody analizy szeregów czasowych, oparta jest na analizie porównawczej profili obciążeń odbiorcy taryfy płaskiej zmieniającego rozliczenie na taryfę wielostrefową oraz bieżących ofertach cenowych w oferowanych taryfach i obejmuje następujące główne kroki:

- ustalenie zależności wiążącej roczne poziomy zużycia energii przez reprezentatywnego klienta taryfy wielostrefowej i taryfy płaskiej na podstawie analizy standardowych profili obciążeń tych grup taryfowych, opartej o dobowe wartości zużycia energii elektrycznej przez odbiorcę taryfy G11 i G12 z podziałem na zużycie w strefie szczytowej (p) oraz zużycie w strefie pozaszczytowej (o) z uwzględnieniem początku i końca sezonu pozagrzewczego, przedstawione na Rys. 1; przedstawione zużycie energii w taryfie G11 odzwierciedla naturalne zaspokojenie potrzeb odbiorców w zakresie energii elektrycznej w ciągu doby, podczas gdy w taryfie G12 konsument stara się przesunąć pobór z okresów szczytowych do pozaszczytowych w celu uzyskania niższych kosztów zużycia energii elektrycznej;



Rys. 1 Zmienność dobowych wartości zużycia energii elektrycznej przez odbiorcę taryfy G11 i G12 w ciągu roku z podziałem na zużycie w strefie szczytowej (p) oraz zużycie w strefie pozaszczytowej (o) z zaznaczeniem początku i końca sezonu pozagrzewczego będące podstawą do analizy profili obciążeń

- wyznaczenie rocznych zmian zapotrzebowania oraz średniej rocznej wartości cenowej elastyczności popytu,
- sformułowanie zależności pomiędzy zmianami zużycia energii elektrycznej w ramach rozpatrywanych taryf płaskich i strefowych, zmianami cen oferowanych w tych taryfach oraz cenową elastycznością własną i wzajemną na podstawie liniowego modelu konsumpcji energii przez odbiorcę opisanego poniżej,
- ustalenie dobowych zmian zużycia energii elektrycznej w strefie szczytowej i pozaszczytowej taryfy strefowej w porównaniu do zużycia zarejestrowanego dla taryfy płaskiej na podstawie cen taryfowych bieżących oraz standardowych profili obciążeń odzwierciedlających godzinowe zużycie energii w ciągu roku odbiorców reprezentatywnych,
- obliczenie dobowych wartości elastyczności własnych i wzajemnych dla analizowanych odbiorców.

Wymienione powyżej kroki oraz szczegóły proponowanej metody zostały dokładnie opisane w piątym rozdziale pracy. Obliczenia i analizy przedstawione w niniejszej pracy doktorskiej wykonano wykorzystując oprogramowanie Mathworks MATLAB R2018b oraz MS Excel.

Przedstawione analizy oparte zostały na danych statycznych dotyczących zużycia energii elektrycznej przez odbiorców poszczególnych grup taryfowych oraz na stawkach za energię czynną oraz opłaty dystrybucyjne zgodnych z taryfami dla dystrybucji i sprzedaży energii zatwierdzonymi przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki. Ponadto, proponowana analiza porównawcza została oparta o standardowe profile obciążeń odbiorców rozliczanych w analizowanych taryfach, które przedstawiają profile zastępcze charakteryzujące konsumpcję energii określonej grupy odbiorców rozliczanych zgodnie z jednorodnym planem taryfowym i poddanym oddziaływaniu cen strefowych poszczególnych operatorów sieci dystrybucyjnej. Standardowe profile obciążeń dla poszczególnych taryf publikowane są przez regionalnych operatorów systemów dystrybucyjnych na podstawie pomiarów zużycia energii przez grupy typowych klientów.

Dobowe analizy uwzględniające elastyczność własną i wzajemną odbiorców przeprowadzono z wykorzystaniem modelu zużycia energii elektrycznej przez odbiorcę dla różnych okresów rozliczeniowych i oraz j , opisanego następującą zależnością:

$$E_i = E_{1i} \left\{ 1 + \varepsilon_s \frac{[P_i - P_{1i}]}{P_{1i}} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{24} \varepsilon_c \frac{[P_j - P_{1j}]}{P_{1j}} \right\}$$

gdzie: E_i, E_{1i} – wypadkowe oraz początkowe zużycie energii elektrycznej w okresie i ; P_i, P_{1i}, P_j, P_{1j} – wypadkowa oraz początkowa cena rozliczeniowa energii elektrycznej w strefie i lub j , ε_s – własna cenowa elastyczność popytu, ε_c – wzajemna cenowa elastyczność popytu.

W pracy założono, że poziomy zapotrzebowania na energię elektryczną w okresach szczytu i poza szczytem taryfy strefowej są substytutami i określa się elastyczność wzajemną dla poszczególnych stref taryfowych.

Wykorzystując przedstawioną alternatywną metodę wyznaczania cenowej elastyczności popytu przeanalizowano zużycie energii odbiorców taryf G11 i G12 dla największych OSD w Polsce w latach 2016 i 2017. Wyznaczono zarówno średnie roczne wartości elastyczności, jak i zmienne w czasie wartości elastyczności własne i wzajemne dla odbiorców taryfy G11 zmieniających rozliczenie na taryfę G12.

Większość analiz przeprowadzonych w niniejszej pracy dotyczy lat 2016 oraz 2017, ze względu na dostęp do danych charakteryzujących poszczególne grupy taryfowe dla tego okresu [7]. Dane w postaci opracowania Agencji Rynku Energii pt. *Analiza rentowności grup taryfowych na wysokim, średnim i niskim napięciu w przedsiębiorstwach obrotu oraz przedsiębiorstwach zajmujących się dystrybucją energii elektrycznej w 2017 roku* przygotowanego na zlecenie Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej pozyskano w ramach pracy badawczej w konkursie Duety na zlecenie PSE Innowacje S.A. Ponadto, ze względu działania prosocjalne ustanawiające stałe ceny energii elektrycznej dla gospodarstw domowych w późniejszym okresie w latach 2018 - 2020, analiza wpływu cen na zużycie energii elektrycznej dla tego okresu obciążona byłaby dużym błędem.

5. Wyniki przeprowadzonych analiz

Wykorzystując proponowaną metodę wyznaczenia elastyczności, na podstawie taryf dla energii elektrycznej, danych statystycznych oraz standardowych profili zużycia energii elektrycznej wyznaczono średnie roczne wartości cenowej elastyczności popytu $\varepsilon_{a\ av}$ dla wybranych operatorów sieci dystrybucyjnych w Polsce, których zestawienie przedstawiono w Tabeli 1.

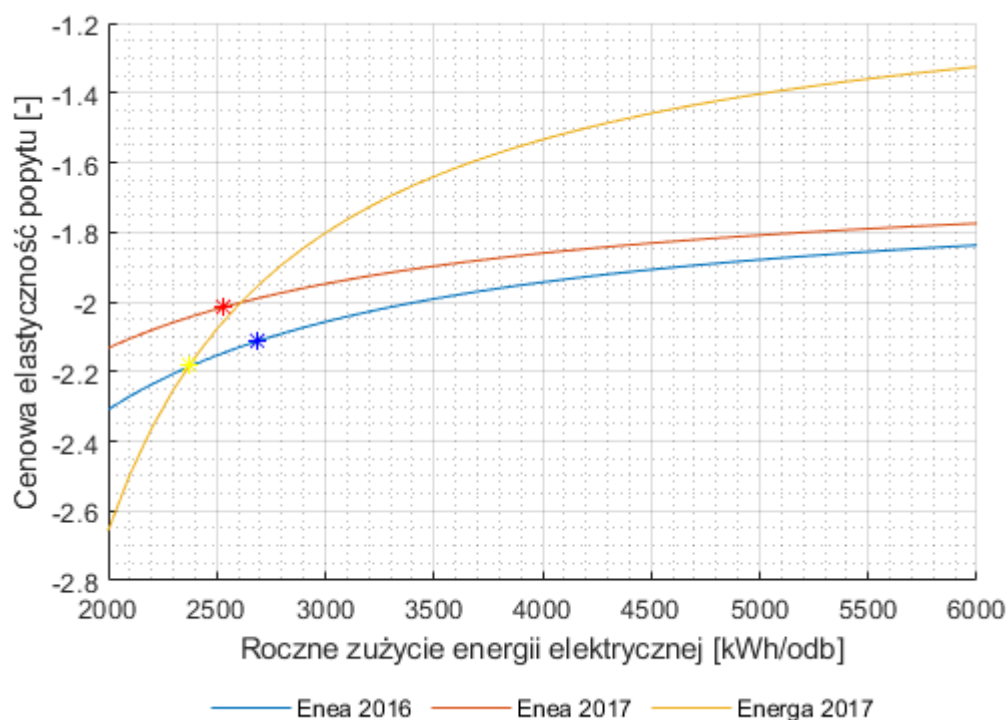
Tabela 1. Wyniki obliczeń średniej rocznej elastyczności popytu odbiorców taryf G dla poszczególnych OSD dla lat 2016 i 2017

Rok	2016	2017
OSD	$\varepsilon_{a\ av}$ [-]	
Enea Operator	-2,1126	-2,0160
Energa Operator	-2,3307	-2,1825
innogy Stoen Operator	-1,7300	-1,7255
PGE Dystrybucja	-1,9639	-1,8989
Tauron Dystrybucja	-1,8034	-1,7661
Wartość średnia	-1,9530	

Uzyskane podczas analizy wartości średniej rocznej cenowej elastyczności popytu wynoszące od -1,7255 do -2,3307 (średnio -1,9530) wskazują na bardzo dużą elastyczność

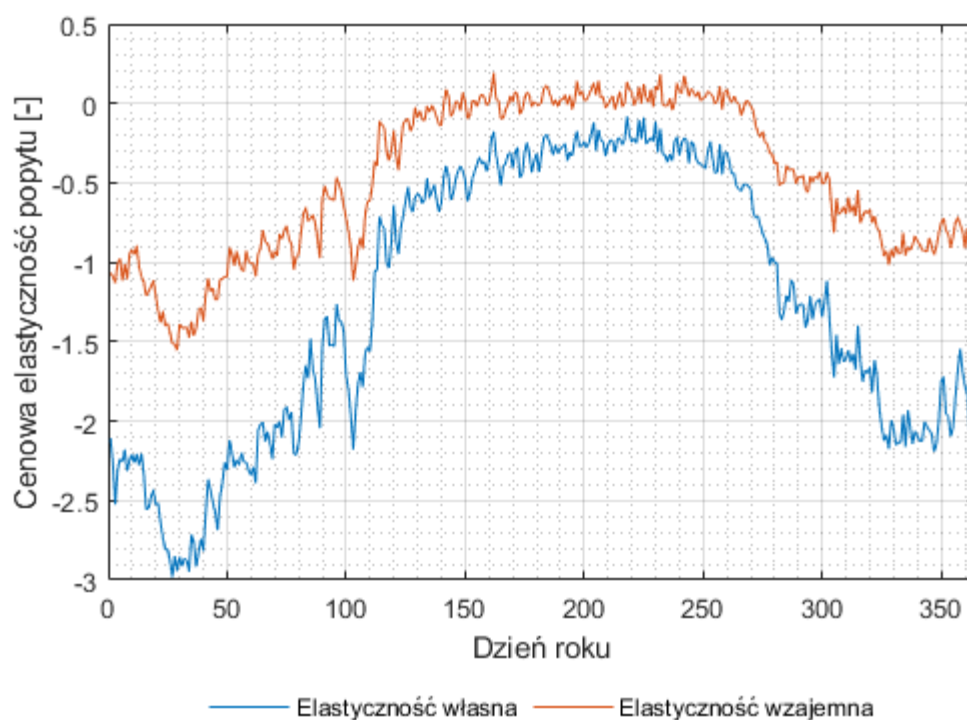
odbiorców indywidualnych w zakresie zmian cen. Tak wysokie wartości cenowej elastyczności popytu można jedynie w kilku innych badaniach, głównie w przypadku długookresowej cenowej elastyczności popytu. Większość różnorodnych badań, zestawionych w części teoretycznej pracy, przedstawia cenową elastyczność popytu na energię elektryczną na poziomie od 0 do -1, wskazując na dość niską elastyczność odbiorców w gospodarstwach domowych. Należy jednak zaznaczyć, że wartości elastyczności cenowej popytu w prezentowanej pracy są wyliczone dla grupy odbiorców korzystających z taryfy strefowej, którzy dobrowolnie decydują się na zmianę profilu wykorzystania energii elektrycznej w celu uzyskania pewnych oszczędności.

Analizując cenową elastyczność popytu w ujęciu średnim, należy zauważyć, że ceny energii elektrycznej nie są stałe dla wszystkich odbiorców, ponieważ zależą od wielkości rocznego zużycia energii przez konkretnego odbiorcę. Ze względu na to, że ceny jednostkowe energii elektrycznej maleją wraz z rosnącą energią konsumowaną ze względu na wpływ stawek stałych, zmienność cen jednostkowych przy ustalonych zmianach poboru energii wyznaczanych standardowymi profilami obciążeń powoduje zmienność średniej bezwzględnej wartości rocznej cenowej elastyczności popytu w kierunku zgodnym ze zmianą wartości cen, czyli większej bezwzględnej wartości elastyczności dla wyższych cen i niższych elastyczności dla niższych cen. Dla wybranych OSD przeanalizowano, więc wpływ zmiany zużycia na zmianę wartości cenowej elastyczności popytu, który przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Zmienność średniej elastyczności cenowej popytu odbiorców taryfy G12 w zależności od rocznego zużycia energii

Wyznaczona elastyczność średnia to elastyczność dla danego okresu uwzględniająca tylko średnie zmiany obciążenia w tym okresie, stąd najbardziej adekwatnie ocenia okresowe, bodźcowe oddziaływanie na odbiorcę, wprowadzane np. poprzez taryfy z krytyczną stawką cenową. W przypadku taryf strefowych podstawowe znaczenie analityczne powinny mieć natomiast elastyczności własne i wzajemne, które wyznaczono dla analizowanych OSD dla poszczególnych dób w analizowanych latach, a przykładowy przebieg sezonowej zmienności elastyczności własnych i wzajemnych przedstawiono na rys. 3.

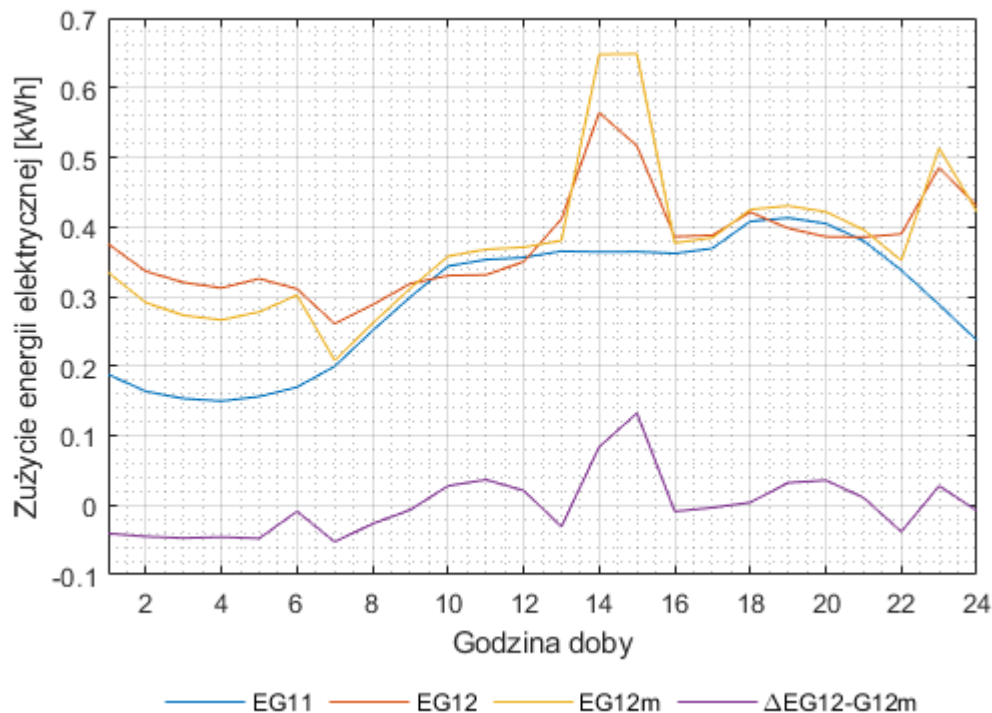


Rys. 3. Przebieg zmienności dobowych wartości cenowej elastyczności popytu własnej i wzajemnej dla odbiorców grupy taryfowej G12 dla standardowych profili obciążeń G11 i G12 spółki Enea Operator z roku 2017

Wartości dobowe elastyczności własnej ε_s i wzajemnej ε_c przy stałych cenach taryfowych zmieniają się dobowo w zależności od zmian w wykorzystywaniu sezonowym energii elektrycznej. W sezonie grzewczym potrzeby odbiorców wymuszają większą elastyczność, stąd większe bezwzględne wartości zarówno elastyczności własnej, jak i wzajemnej, natomiast w sezonie pozagrzewczym elastyczność ulega stabilizacji i obserwuje się niższe bezwzględne wartości elastyczności.

Aby sprawdzić dokładność proponowanej metody wyznaczono również średni błąd odwzorowania profili obciążeń z wykorzystaniem proponowanych analiz, który zależy od dokładności odwzorowania profili obciążeń i wynosi od 0% dla najbardziej dokładnych standardowych profili do maksymalnie ok. 7%. Pozwala to wnioskować, że metoda ta pozwoli prawidłowo wyznaczyć średnią cenową elastyczność popytu w oparciu o rzeczywiste profile obciążeń pozyskane z inteligentnych systemów pomiarowych.

Wyznaczone wartości elastyczności własnej i wzajemnej pozwalają na odtworzenie profilu standardowego profilu obciążenia na podstawie godzinowych konsumpcji w taryfie jednostrefowej. Aby potwierdzić to założenie, odwzorowano znany profil taryfy dwustrefowej G12 i porównano go z profilem oryginalnym. Profile te wraz z profilem oryginalnej taryfy płaskiej G11 dla wybranego OSD przedstawiono na Rys. 4, wraz z przebiegiem godzinowych wartości błędu odwzorowania.



Rys. 4. Profil zużycia energii elektrycznej zgodnie z rzeczywistymi profilami G11 i G12 oraz odtworzonym profilem G12m uzyskanym z wyznaczonych wartości elastyczności ε_s i ε_c wraz z godzinowym błędem odwzorowania $\Delta EG12-G12m$ dla dnia z największym godzinowym błędem odwzorowania (sobota, 11.02.2017 r.)

Suma błędów odwzorowania profili G12m w stosunku do G12 dla okresu dobowego wynosi zero. Maksymalny godzinowy błąd dla analizowanego przypadku sięga 25,6% rzeczywistej wartości profilu G12. Średnia wartość procentowa godzinowego błędu odwzorowania profilu G12m dla wszystkich godzin roku 2017 wynosi 5,52%.

Zastosowanie proponowanej metody może zostać rozszerzone w przyszłości, kiedy dostępne będą dokładniejsze profile obciążeń odbiorców na podstawie danych dostarczonych z inteligentnych systemów pomiarowych, które są coraz częściej wykorzystywane do rozliczania odbiorców energii elektrycznej.

6. Zastosowanie proponowanej metody

Na podstawie analizy profili obciążeń poszczególnych taryf, danych na temat zużycia energii w poszczególnych taryfach i obowiązujących cen rozliczeniowych za energię

elektryczną zaproponowano wskaźniki umożliwiające ocenę efektywności oddziaływania wybranych taryf strefowych. Skuteczność cenowych programów sterowania popytem może być oceniana w dwóch głównych aspektach:

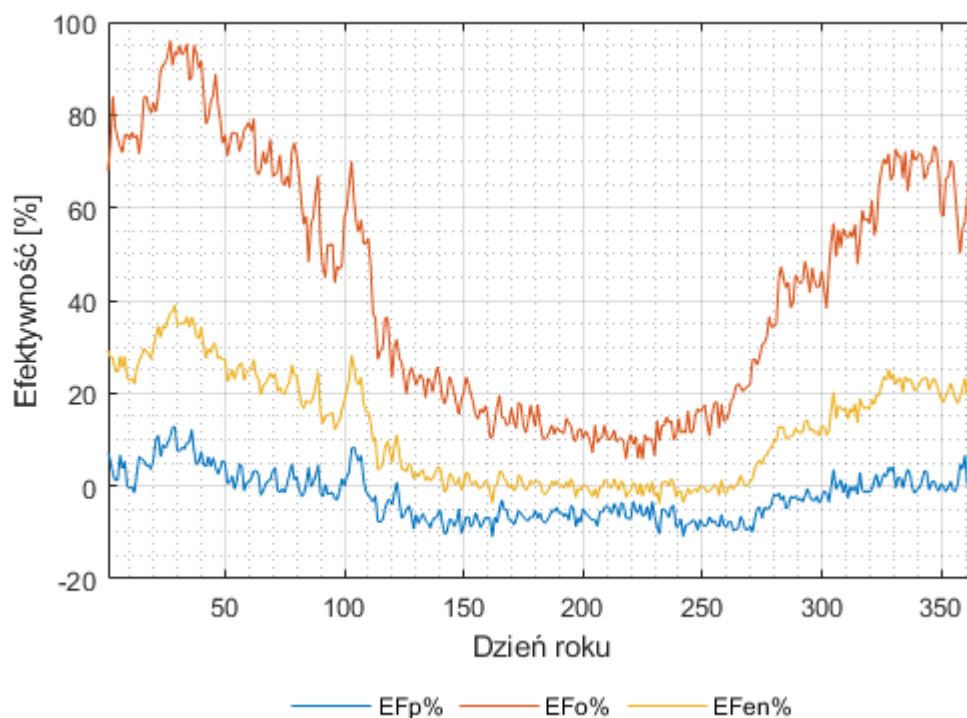
- zmiany zużycia w poszczególnych strefach czasowych, co jest celem organizatorów tych programów, tj. sprzedawców energii i operatorów systemów dystrybucyjnych,
- wpływu programów taryfowych na obciążenie sieci regionalnej i obciążenie szczytowe systemu elektroenergetycznego, co przyczynia się do poprawy lub pogorszenia bezpieczeństwa pracy tego systemu, co może stanowić istotną informację dla operatorów systemów przesyłowych,
- wskaźników ekonomicznych oraz energetycznych określających efektywność taryfy, wyznaczonych jako względne zmiany zużycia energii lub przepływy finansowe spowodowane zmianą rozliczenia za energię.

Na podstawie dostępnych danych statystycznych dotyczących zakupu energii elektrycznej wraz z usługą dystrybucyjną na rynku detalicznym w Polsce, w pracy doktorskiej przedstawiono efektywność oddziaływania grup taryfowych dla odbiorców komercyjnych A, B, C oraz G dla gospodarstw domowych w postaci przyrostów zużycia energii w wyniku zmiany rozliczenia na wielostrefowe, przy założonej wartości cenowej elastyczności popytu $\varepsilon = -1,0$ oraz przyrostów zużycia energii z podziałem na obciążenie szczytowe i pozaszczytowe dla taryf C i G w oparciu o standardowe profile obciążeń.

Ponadto, przedstawiono szczegółową analizę wpływu taryfy G12 na obciążenie szczytowe systemu elektroenergetycznego, obejmującą zmiany konsumpcji energii dla całego roku oraz zmiany sezonowe w okresie letnim i zimowym dla wybranych OSD w okresach obowiązywania stref szczytowej i pozaszczytowej taryfy G12. Przeanalizowano również zmiany konsumpcji w okresach letniego i zimowego obciążenia szczytowego Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, tj. w okresach gdy mogą wystąpić zagrożenia w bezpiecznej pracy systemu.

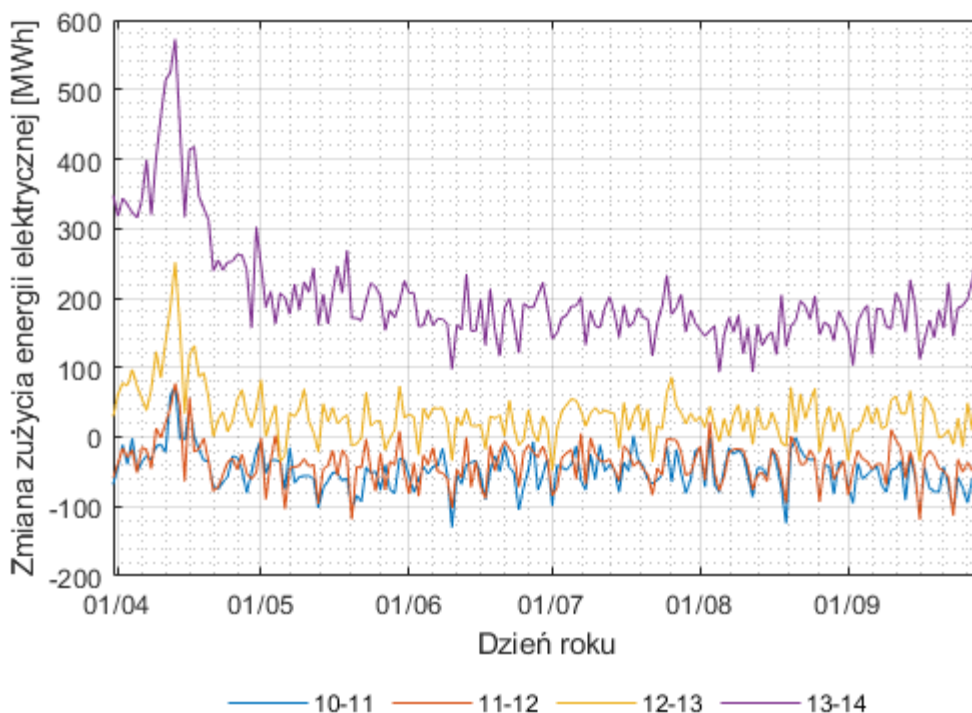
Zaproponowano również wskaźniki efektywności taryfy G12, obejmujące efektywność energetyczną szczytową, pozaszczytową i średnią, efektywność przepływów finansowych dla OSD oraz efektywność finansową dla odbiorcy, określającą względne obniżenie ceny energii dla odbiorcy. Obliczenia wykonano dla analizowanych OSD w oparciu o wartości elastyczności cenowej średniej. Wyniki przedstawione szczegółowo w pracy wskazują na znacznie wyższą efektywność działania taryfy strefowej w okresie pozaszczytowym w porównaniu z okresem szczytowym. Średnia roczna efektywność energetyczna, wynikająca ze średniej efektywności strefowej ważonej zużyciem energii w taryfie G11 w okresach szczytu i poza szczytem taryfy G12, wynosi około 14%, co oznacza, że zmiana rozliczenia na dwustrefowe powoduje nieznaczny wzrost konsumpcji energii przez odbiorców w stosunku do taryfy płaskiej. Efektywność finansowa wskazuje na wzrost przychodów dostawców energii i operatorów sieci wynikający z przejścia odbiorców z taryfy G11 na G12, a jej wartość nie przekracza 12%. Rozważana zmiana taryfy przez odbiorców pozwala im obniżyć cenę rozliczeniową energii elektrycznej o około 7,5%.

Na podstawie dobowo zmiennych wskaźników cenowej elastyczności własnej i wzajemnej ε_s i ε_c wyznaczono również efektywność energetyczną strefy szczytowej i pozaszczytowej oraz efektywność energetyczną średnią taryfy G12 dla poszczególnych dób roku. Przykładowy przebieg zmienności wskaźników efektywności przedstawiono na rys. 5 dla wybranego OSD dla roku 2017.



Rys. 5. Przebieg zmienności wskaźników efektywności energetycznej taryfy G12 dla strefy szczytowej $EF_p\%$ i pozaszczytowej $EF_o\%$ oraz efektywność średnią $EF_{en}\%$ dla spółki Enea Operator dla 2017 roku

Pozytywne wyniki średniej efektywności taryfowej strefowej nie gwarantują jednak, że godzinowy wpływ na szczytowe obciążenie systemu jest również pozytywny. W celu szacunkowego zobrazowania potencjalnych zagrożeń przeprowadzono ocenę wpływu odbiorców taryf strefowych na obciążenie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego na przykładzie odbiorców taryfy G12 wyznaczając godzinowe zmiany zużycia spowodowane obciążeniem rozpatrywanej grupy odbiorców. Analizy oddziaływania godzinowego wyznaczono z wykorzystaniem danych statystycznych dot. całkowitej konsumpcji energii czy liczby odbiorców taryfy G12 w Polsce. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla okresu letniego dla godzin o dużym prawdopodobieństwie występowania letniego szczytu obciążenia, tzn. dla godzin od 10 do 18 oraz dla okresu zimowego dla godzin o dużym prawdopodobieństwie występowania zimowego szczytu obciążenia, tj. dla godzin od 16 do 20. Przykładowa analiza zmian zużycia w godzinach 10-14 w okresie letnim przedstawiona została na rys. 6.



Rys. 6. Wzrost konsumpcji energii w godzinach szczytowych 10 – 14 sezonu letniego 2017 odbiorców rozliczanych wg taryfy G12 w stosunku do ekwiwalentnej konsumpcji przy rozliczeniach wg taryfy G11

7. Wnioski

Autorka zrealizowała założone cele i potwierdziła słuszność proponowanej tezy rozprawy doktorskiej. Wynikiem podjętych badań jest opracowana przez Autorkę metodyka wyznaczania elastyczności popytu wraz z oryginalną metodą oceny jej dokładności. Nowa metoda wyznaczania cenowej elastyczności popytu jest oparta na aktualnych profilach zużycia energii elektrycznej odbiorców taryf strefowych oraz aktualnych ofertach cenowych i będzie mogła być alternatywna do dotychczas wykorzystywanych metod analizy szeregów czasowych. Metoda ta umożliwia wyznaczenie wartości elastyczności cenowej średniej, jak również chwilowych wartości elastyczności własnej i wzajemnej. W celu określenia wpływu taryf strefowych na zmianę profilu obciążenia odbiorców przedstawiono sposób wyznaczania zmiennej w czasie elastyczności własnej i wzajemnej dla odbiorców w gospodarstwach domowych, która jest szczególnie istotna w celu oceny oddziaływania taryf strefowych.

Ponadto, dokonano, niewykonanej dotychczas w literaturze krajowej, oceny doczasowego wykorzystania taryf strefowych w Polsce i stwierdzono wysoki niewykorzystany potencjał w tym zakresie w przypadku taryf dla gospodarstw domowych. Odbiorcy energii elektrycznej w gospodarstwach domowych generują aż średnio 20% obciążenia systemu elektroenergetycznego, a stopień wykorzystania taryf strefowych jest najniższy spośród wszystkich grup taryfowych.

Wykorzystując przedstawioną metodę wyznaczone zostały wartości cenowej elastyczności popytu dla wybranych operatorów sieci dystrybucyjnej w Polsce w oparciu o dane statyczne oraz standardowe profile obciążeń odbiorców typu gospodarstwa domowe należących do taryf G, które nie były jak dotąd znane. Na podstawie przedstawionych analiz można stwierdzić, że sterowanie popytem przy zastosowaniu taryf strefowych jest istotnym narzędziem dla kształtowania krzywej obciążenia systemu elektroenergetycznego. Wyznaczone wartości elastyczności średniej na poziomie $-1,953$ świadczą o dużej podatności odbiorców na reagowanie na zmiany ceny odbiorców korzystających z taryf strefowych i pozwalają na prognozowanie zachowania odbiorców przy modyfikacji taryf strefowych istniejących lub przy projektowaniu nowych. Uzyskane wartości elastyczności własnej i wzajemnej można wykorzystać do praktycznego modelowania zmian profili obciążeń odbiorców w przypadku niewielkich zmian taryf strefowych w zakresie cen strefowych i okresów ich stosowania, co może być interesujące dla organizatorów programów taryfowych. Praktyka taka może być efektywnie rozwinięta w oparciu o prezentowaną metodykę w miarę rozwoju systemów inteligentnego opomiarowania, pozwalających na pozyskiwanie rzeczywistych profili obciążenia odbiorców. Wzrosną wówczas perspektywy praktycznego zastosowania przedstawianej metodyki dla kształtowania i modyfikacji taryf strefowych, taryf z krytyczną stawką cenową oraz taryf z okresowym limitem mocy w celu osiągnięcia wyższej efektywności programów taryfowych DSR.

W pracy przedstawiono również możliwe zastosowania analizy profili i opracowanej metodyki pozwalającej na wyznaczanie elastyczności popytu dla oceny efektywności obecnie wykorzystywanych taryf oraz zaproponowano wskaźniki oceny efektywności taryf strefowych dla oceny korzyści energetycznych dotyczących zmiany profilu obciążenia odbiorców i ekonomicznych pozwalających na ocenę korzyści finansowych dla organizatorów programów strefowych oraz ich użytkowników. Przeprowadzono również analizy efektywności oddziaływania taryfy G12, które wskazują, że zmiana rozliczenia taryfowego z G11 na G12 ma korzystny wpływ na obciążenie systemu elektroenergetycznego, z wyjątkiem okresu od 13:00 do 15:00, kiedy obowiązuje strefa pozaszczytowa taryfy G12. Trudna sytuacja w zakresie bilansowania energii w okresach letnich powinna doprowadzić do wprowadzenia zmian w taryfie G12 w tym sezonie. Zaproponowana ocena efektywności programów taryfowych również nie została wcześniej przeprowadzona.

Uzyskane wyniki badań uzasadniają zdaniem Autorki słuszność podstawionej w pracy tezy i sformułowanych twierdzeń. Zaproponowana metoda może być skutecznie wykorzystania do wyznaczania cenowej elastyczności popytu, która dalej może służyć do projektowania lub modyfikacji programów taryfowych lub oceny efektywności i oddziaływania programów taryfowych na system elektroenergetyczny, co zostało potwierdzone analizami dla różnych serii danych.

Podsumowując Autorka uważa, że do nowatorskich i oryginalnych osiągnięć przedstawionej pracy doktorskiej należą takie elementy jak:

- opracowanie metody wyznaczania cenowej elastyczności popytu na profilach obciążeń odbiorców taryf strefowych,

- sposób wyznaczania zmienności wartości elastyczności własnych i wzajemnych odbiorców taryf strefowych,
- obliczenie wartości cenowej elastyczności popytu odbiorców typu gospodarstwo domowe,
- analiza efektywności oddziaływania taryf strefowych uwzględniając okresy szczytowego obciążenia systemu elektroenergetycznego.

Aktualność tematyki poruszonej w niniejszej pracy doktorskiej inspiruję Autorkę do kontynuacji badań w dalszych działaniach naukowych. W najbliższej przyszłości Autorka zamierza skupić się na analizie danych pozyskanych z inteligentnych liczników energii w celu wyznaczenia elastyczności popytu, zastosowaniu liczb rozmytych do proponowanej metodyki dla dużej liczby danych oraz analizie korelacji profili obciążeń poszczególnych grup odbiorców z profilem obciążenia Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, co umożliwi dokładniejszą ocenę efektywności oddziaływania taryf strefowych.

8. Dorobek naukowy Autorki

Publikacje związane z tematem rozprawy doktorskiej:

1. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Weychan A. Price-Based Demand Side Response Programs and Their Effectiveness on the Example of TOU Electricity Tariff for Residential Consumers, *Energies* - 2021, vol. 14, no. 2, s. 287-1-287-21
2. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Weychan A. Seasonal variability of price elasticity of demand of households using zonal tariffs and its impact on hourly load of the power system, *Energy* - 2020, vol. 196, s. 117175-1-117175-12 – 2 cytowania
3. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Weychan A. Demand Price Elasticity of Residential Electricity Consumers with Zonal Tariff Settlement Based on Their Load Profiles, *Energies* - 2019, vol. 12, no. 22, s. 4317-1-4317-22 – 4 cytowania
4. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Weychan A. Sterowanie popytem przy wykorzystaniu systemów taryfowych w Polsce, *Przegląd Elektrotechniczny* - 2019, R. 95, nr 10, s. 48-51 – 1 cytowanie
5. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Maćkowiak A. Electricity used as additional medium for household supplementary space heating, *E3S Web of Conferences* - 2019, vol. 108, s. 01026-1-01026-10
6. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Maćkowiak A. Household Price Elasticity of Demand as a Tool for Tariff System Design Leading to Increase of Electricity use for Space Heating Purposes, *15th International Conference on the European Energy Market (EEM): IEEE*, 2018 - s. 1-5 - 3 cytowania
7. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Maćkowiak A. Wykorzystanie inteligentnego opomiarowania dla oceny i kształtowania profili obciążeń odbiorców w gospodarstwach domowych, *Rynek energii elektrycznej : Aktualne problemy energetyki / red. P. Pijarski, Z. Połecki* - Lublin, Polska : Politechnika Lubelska, 2018 - s. 7-20

Pozostałe publikacje:

1. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., Weychan A., Zięba B. Overcurrent protection against multi-phase faults in MV networks based on negative and zero sequence criteria, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* – w trakcie recenzji
2. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Łowczowski K., Weychan A., Zawodniak J. Energy losses' reduction in metallic screens of MV cable power lines and busbar bridges composed of single-core cables, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* - 2020, vol. 22, no. 1, s. 15-25 – 2 cytowania
3. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Weychan A. Distributed generation as efficient measure to improve power generation adequacy, *Archives of Electrical Engineering* - 2019, vol. 68, no. 2, s. 373-385
4. Maćkowiak A. Wystarczalność generacji w lokalnych systemach dystrybucyjnych, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* - 2018, Issue 94, s. 17-28
5. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Maćkowiak A. Czynniki wpływające na bezpieczeństwo zasilania sieciowego odbiorców końcowych i efektywne działania dla jego poprawy, *Blackout a krajowy system elektroenergetyczny : Edycja 2018 / red. J. Lorenc, A. Demenko - Poznań, Polska : Ośrodek Wydawnictw Naukowych. Instytut Chemii Bioorganicznej PAN, 2018 - s. 77-91*
6. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Maćkowiak A. Factors influencing safety of power supply for final consumers and effective actions for its improvement, *Safety of the Polish Power System : Edition 2018 / red. J. Lorenc, A. Demenko - Poznań, Polska : Poznań Scientific Publishers OWN, 2018 - s. 157-171*
7. Złotecka D., Sroka K., Maćkowiak A. Impact of Escalating Emission Requirements on the Operation of Heating Systems in Poland, *15th International Conference on the European Energy Market (EEM): IEEE, 2018 - s. 1-5*

Zgłoszenia patentowe:

1. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., Weychan A. Układ i sposób identyfikacji zwarć międzyfazowych w liniach elektroenergetycznych średniego napięcia, *Politechnika Poznańska, zgłoszenie z dnia 8.03.2021 nr P.437229.*

Udział w badaniach prowadzonych w ramach projektów badawczych na PP:

1. PTPiREE „Wpływ przepływów energii biernej indukcyjnej i pojemnościowej na pracę sieci dystrybucyjnej o napięciu do 1 kV” 2020 r.
2. Enea Operator Sp. z o.o. „Możliwości nowoczesnych rozwiązań automatyki zabezpieczeniowej i sterowania w zakresie poprawy ciągłości zasilania i wskaźników SAIDI”, 2019 r.
3. Enea Operator Sp. z o.o. „Badanie rozptyłu prądu ziemnozwarciowego w liniach SN zbudowanych z kabli jednożyłowych”, 2019 r.
4. PSE Innowacje S.A. "Modelowanie elastyczności popytu kształtowanej przez systemy taryfowe energii elektrycznej oraz jej wpływu na krzywą obciążenia systemu elektroenergetycznego", 2018 r.

5. Enea Operator Sp. z o.o. "Ograniczanie strat energii w żyłach powrotnych oraz zwiększanie przepustowości kabli SN", 2017-2018 r.
6. Enea Operator Sp. z o.o. "Weryfikacja pomiarowa modeli obliczeniowych odcinków kabli SN pracujących w liniach SN i jako mosty szynowe SN", 2017-2018 r.

Współpraca międzynarodowa z University of Technology w Sydney, Australia w ramach programu NAWA, mająca na celu zwiększenie jakości badań wykonywanych przez doktorantów.