

Ekonometryczny model popytu gospodarstwa domowego na energię elektryczną

Jerzy W. Wiśniewski^a

Streszczenie. Współcześnie funkcjonowanie każdego gospodarstwa domowego jest uzależnione od energii elektrycznej. Odchodzenie od kopalnych źródeł energii na rzecz źródeł odnawialnych powoduje zwiększone zapotrzebowanie gospodarstw domowych na energię elektryczną, a jej rosnące ceny korygują z kolei popyt na nią. Celem badania omawianego w artykule jest określenie – za pomocą wielorównaniowego modelu ekonometrycznego – popytu na energię elektryczną w przykładowym polskim gospodarstwie domowym. Hipoteza modelowa wskazuje, że model powinien mieć charakter układu równań współzależnych. W badaniu opisane zostały: miesięczne zużycie energii elektrycznej, miesięczny koszt jej zużycia i cena 1 MWh w danym miesiącu. Analizowano miesięczne szeregi czasowe od września 2015 r. do czerwca 2023 r. (łącznie 94 obserwacje statystyczne) na podstawie faktur za energię elektryczną. Nie potwierdziła się hipoteza o sprzężeniu zwrotnym między miesięcznym zużyciem energii elektrycznej w badanym gospodarstwie domowym i ceną jednostkową energii. Stanowi to rezultat interwencjonizmu państwowego na rynku źródeł energii w Polsce. Natomiast zaobserwowano rekurencyjność wpływu wielkości zużycia energii elektrycznej na jej koszt. Poza walorami poznawczymi uzyskanych wyników modelowania ekonometrycznego skonstruowane narzędzie empiryczne umożliwia wyznaczenie prognoz zużycia energii, jej kosztów i ceny jednostkowej przynajmniej na kolejny rok.

Słowa kluczowe: energia elektryczna, gospodarstwo domowe, model ekonometryczny, układ równań współzależnych

JEL: C32, C51, C53, D12

An econometric model of household electricity demand

Abstract. The operations of every contemporary household depends on electricity. The process of abandoning fossil fuels and turning towards renewable energy sources causes households' increased demand for electricity, and the growing prices of the latter correct this demand. The aim of the study presented in the paper is to determine the electricity demand of a Polish household by means of a multi-equation econometric model. The model hypothesis indicates that the model should take the form of a system of interdependent equations. The study presents monthly electricity consumption, its cost and the price per one MWh in a given month. Monthly time series from September 2015 to June 2023 were analysed (94 statistical observations altogether) on the basis of electricity invoices. The hypothesis about the feedback between monthly electricity consumption and electricity unit price has not been confirmed. This is the

^a Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Nauk Ekonomicznych i Zarządzania, Polska / Nicolaus Copernicus University in Toruń, Faculty of Economic Sciences and Management, Poland.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7606-2748>. E-mail: jerzy.wisniewski@umk.pl.

consequence of state interventionism in the market of energy sources in Poland. What was observed, however, was the recursiveness of the effect the volume of electricity consumption has on the electricity cost. In addition to the cognitive value of the obtained results of the econometric modelling, our empirical tool makes it possible to project the volume of electricity consumption, its cost and unit price for at least a year ahead.

Keywords: electricity, household, econometric model, system of interdependent equations

1. Wprowadzenie

Funkcjonowanie współczesnych gospodarek i społeczeństw nie byłoby możliwe bez dostępu do energii. Najważniejszym rodzajem energii w gospodarstwach domowych – a w niektórych jedynym – jest elektryczność. Warta uwagi staje się w tym kontekście transformacja energetyczna – odchodzenie od źródeł kopalnych (ropy naftowej, gazu, węgla) na rzecz źródeł odnawialnych (słońca, wiatru, siły wody). Intensywna dekarbonizacja gospodarki Polski spowoduje zwiększone zapotrzebowanie gospodarstw domowych na energię elektryczną, a permanentnie rosnące ceny energii będą korygowały popyt. W warunkach rynkowych istnieje bowiem ujemne sprzężenie zwrotne między ceną energii i jej zużyciem.

Problematyka zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych była poruszana w wielu pracach naukowych. Ari i in. (2016) zbadali za pomocą uporządkowanych modeli logitowych zużycie energii elektrycznej w tureckich gospodarstwach domowych. W artykule Karısmı i in. (2016) przedstawiono studium przypadku gospodarstwa domowego z Jawy nieprowadzącego działalności gospodarczej. Singh i in. (2016) podjęli temat wpływu czynników geograficzno-demograficznych na zużycie energii elektrycznej i modele prognozowania.

Zajceva (2016) rozpatrywała kwestię ekonometrycznego modelowania zużycia energii elektrycznej przez gospodarstwa domowe jako narzędzia do obliczania społecznej normy zużycia. Ważne zagadnienie w tym kontekście stanowi oszczędzanie energii dzięki sterowaniu prędkościami klimakonwektorów (Hernández-Tabares, 2017).

Praca Seebauera i Wolf (2017) dotyczy indywidualnego zużycia energii elektrycznej. Hidalgo i in. (2018) podjęli temat czynników zapotrzebowania na energię elektryczną w Ekwadorze. Sharif Ali i in. (2020) analizowali związek krajowego zużycia energii elektrycznej i własności urządzeń w malezyjskim mieście średniej wielkości. Determinanty zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w Czarnogórze stanowiły przedmiot badania Đurišića i in. (2020), a Kostakis (2020) zbadął – z wykorzystaniem analizy regresji kwantylowej – społeczno-demograficzne uwarunkowania zużycia energii elektrycznej w greckich gospodarstwach domowych.

Mamudu i Ochei (2020) podjęli się empirycznej analizy zużycia energii elektrycznej w powiązaniu ze wzrostem gospodarczym Nigerii. Zhang i Wen (2021) przeprowadzili nieliniową analizę efektu ceny energii elektrycznej w zużyciu energii elektrycznej w gospodarstwie domowym. Debs i Metzinger (2022) porównali zużycie energii w gospodarstwach domowych według regionów klimatycznych w Stanach Zjednoczonych. Model zapotrzebowania gospodarstwa domowego na energię elektryczną w warunkach rynkowych (bez ingerencji państwa) został zaprezentowany w pracy Wiśniewskiego (2023).

Z przeglądu literatury wynika, że badacze interesują się różnymi aspektami zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie domowym. Konieczne jest jednak podejmowanie kolejnych badań dotyczących tego zagadnienia, istotnego dla funkcjonowania każdego gospodarstwa domowego niezależnie od jego lokalizacji. Celem badania omówionego w artykule jest określenie – za pomocą wielorównaniowego modelu ekonometrycznego – popytu na energię elektryczną w przykładowym polskim gospodarstwie domowym. W literaturze brakuje tego typu badań, głównie ze względu na niedostępność danych statystycznych o zużyciu energii elektrycznej w konkretnych gospodarstwach domowych.

2. Metoda badania

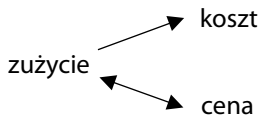
Badanie dotyczyło wybranego polskiego gospodarstwa domowego, posiadającego działkę o powierzchni ponad 6000 m², na której posadowiony jest dom o powierzchni 300 m², garaż wolnostojący o powierzchni 60 m² i budynek gospodarczy o powierzchni 450 m². Jedyńm wykorzystywanym źródłem zasilania jest energia elektryczna pobierana z publicznej sieci energetycznej. Do marca 2021 r. dom był ogrzewany olejem opałowym, z okresowym wspomaganie kominkiem. W kwietniu 2021 r. zainstalowano pompę ciepła i zrezygnowano z ogrzewania olejowego. Energia elektryczna jest zatem wykorzystywana do celów grzewczych i oświetleniowych domu mieszkalnego, garażu i budynku gospodarczego, chłodniczych oraz poboru wody gruntowej jako użytkowej, a ponadto do nawadniania terenu.

Mechanizm popytu na energię elektryczną w analizowanym gospodarstwie opisano za pomocą stochastycznego układu równań współzależnych. Scharakteryzowano:

- miesięczne zużycie energii elektrycznej w kWh (z);
- miesięczny koszt zużycia energii elektrycznej w zł (k);
- cenę 1 MWh energii elektrycznej w danym miesiącu w zł (c).

Analizowano miesięczne szeregi czasowe od września 2015 r. do czerwca 2023 r. – łącznie 94 obserwacje statystyczne.

Rozpatrywana była – ilościowo i wartościowo – zmienność popytu na energię oraz dyspersja ceny 1 MWh, czyli:



Wielkość zużycia energii elektrycznej wpływa bezpośrednio na jej koszt w określonym przedziale czasu, jak również na jej cenę jednostkową. Z kolei cena jednostkowa energii wywiera wpływ na wielkość jej zużycia, więc powstaje między nimi sprzężenie zwrotne i można oczekiwać, że jest ono ujemne – wzrost zużycia energii skutkuje obniżką ceny jednostkowej, a wyższa cena jednostkowej skłania do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej.

W kolejnych empirycznych równaniach modelu występują również zmienne endogeniczne opóźnione od miesiąca do 12 miesięcy, czyli:

- opóźnienia zmiennej *miesięczne zużycie energii elektrycznej* ($z_1, z_2, \dots, z_{12}$);
- opóźnienia zmiennej *miesięczny koszt zużycia energii elektrycznej* ($k_1, k_2, \dots, k_{12}$);
- opóźnienia zmiennej *cena 1 MWh energii elektrycznej w danym miesiącu* ($c_1, c_2, \dots, c_{12}$).

Zbiór zmiennych egzogenicznych tworzą:

- zmienna czasowa (t);
- zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość 1 w styczniu każdego roku i 0 w pozostałych miesiącach (dm_1);
- zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość 1 w lipcu każdego roku i 0 w pozostałych miesiącach (dm_7);
- zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość 1 w miesiącach po zainstalowaniu pompy ciepła i 0 w całym poprzedzającym okresie ($pomp$);
- zmienna zero-jedynkowa przyjmująca wartość 1 w miesiącach po przekroczeniu normy zużycia, przy niskiej cenie energii, oraz 0 w okresach obowiązywania niskiej ceny ($norm$).

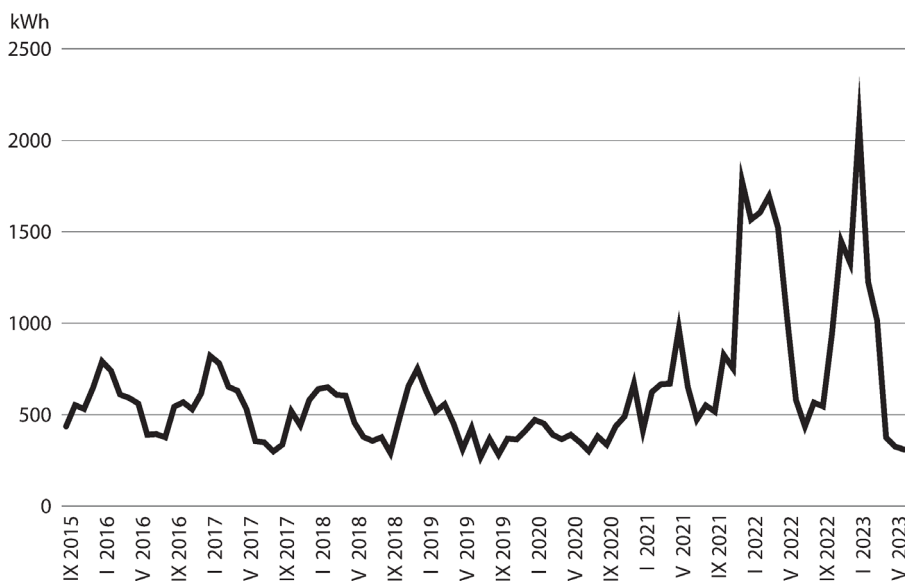
Popyt na energię elektryczną w gospodarstwie domowym opisano za pomocą trzech równań stochastycznych. Parametry każdego z nich oszacowano klasyczną metodą najmniejszych kwadratów. Powody takiego podejścia estymacyjnego przedstawiono w pracy Wiśniewskiego (2022). W równaniach modelu uwzględniono autoregresję, opóźnienia zmiennych endogenicznych, trend i miesięczne wahania okresowe. Taki model może być wykorzystany do prognozowania zmiennych endogenicznych metodą iteracyjną, opisaną w pracach Wiśniewskiego (2016, 2021).

Rozpatrywany przypadek nie stanowi odzwierciedlenia warunków konkurencji doskonałej, jednak konsument może wybrać dostawcę energii elektrycznej i taryfę, a więc ma pewien (choć niewielki) wpływ na cenę dostarczanej energii elektrycznej. Zamrożenie cen energii elektrycznej ogranicza mechanizm rynkowy.

3. Wyniki badania

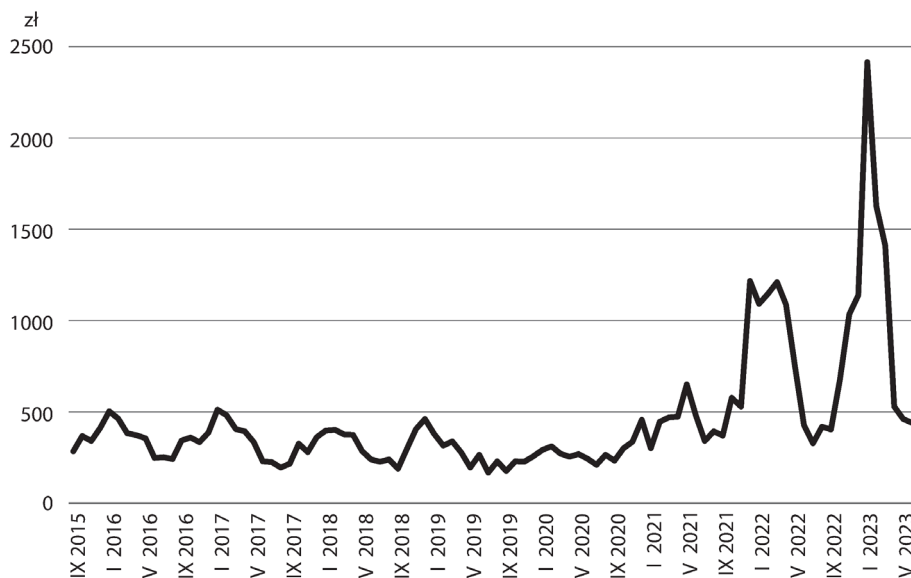
W okresie 2015–2023 w rozpatrywanym gospodarstwie domowym występowały sezonowe oscylacje wielkości zużycia energii elektrycznej i jej kosztów. Wartość tych zmiennych znacznie się zwiększyła po rezygnacji z olejowego ogrzewania domu i wody użytkowej na rzecz ogrzewania za pomocą pompy ciepła (wykr. 1 i 2). Zaobserwowano też stabilizację ceny jednostkowej energii. Skok ceny pojawił się na przełomie lat 2022 i 2023 i od tego momentu dają się zauważyć wahania ceny jednostkowej, z lekką skłonnością do systematycznego wzrostu (wykr. 3). Cena 1 MWh w analizowanym gospodarstwie kształtowała się w przedziale od 607,89 do 1432,07 zł.

Wykr. 1. Miesięczne zużycie energii elektrycznej w gospodarstwie domowym



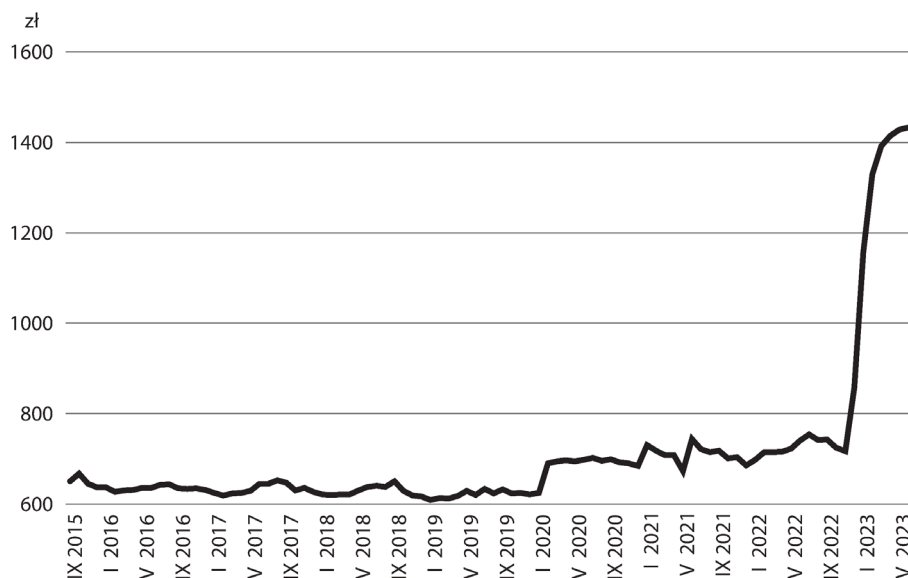
Źródło: opracowanie własne na podstawie faktur za energię elektryczną.

Wykr. 2. Wartość miesięcznego zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie domowym



Źródło: opracowanie własne na podstawie faktur za energię elektryczną.

Wykr. 3. Ceny 1 MWh energii elektrycznej w gospodarstwie domowym



Źródło: opracowanie własne na podstawie faktur za energię elektryczną.

Oszacowano parametry trzech równań stochastycznych opisujących popyt na energię elektryczną w gospodarstwie domowym. Pierwsze równanie opisuje mechanizm zużycia energii elektrycznej (tabl. 1). Dokładność opisu w tym równaniu jest niższa niż w pozostałych dwóch równaniach ($R^2 = 0,888$). Wynika to z pominięcia kilku drobnych czynników, których nie można było zarejestrować. Są to m.in.:

- częstość przygotowywania i spożywania posiłków poza domem;
- częstotliwość wyjazdów na okres dłuższy niż kilka dni (dom pozostaje bez użytkowników);
- częstość uruchamiania instalacji nawadniających.

Cena jednostkowa energii elektrycznej odgrywa w tym równaniu ważną rolę, jednak nie potwierdziła się hipoteza o sprzężeniu zwrotnym. Cena opóźniona o 1 miesiąc i 6 miesięcy wpływa dodatnio na zużycie energii elektrycznej. Reakcja negatywna pojawia się po 7 miesiącach – wówczas wzrost ceny 1 MWh wpływa na zmniejszenie zużycia energii. Działa tu więc klasyczny mechanizm spadku popytu pod wpływem przyrostu ceny jednostkowej.

Tabl. 1. Parametry równania empirycznego opisującego miesięczne zużycie energii elektrycznej
A. ZMIENNE

Wyszczególnienie	Współczynnik regresji	Błąd standardowy	Statystyka t-Studenta	Wartość p	Istotność ^a
const	-997,211	422,775	-2,359	0,0209	**
c_1	1,9510	0,5410	3,606	0,0006	***
c_6	3,3684	0,832772	4,045	0,0001	***
c_7	-3,2349	0,972600	-3,326	0,0014	***
$pomp$	471,663	63,3220	7,449	< 0,0001	***
$norm$	-1610,84	315,355	-5,108	< 0,0001	***
t	-2,7752	1,06526	-2,605	0,0110	**
dm_7	-129,853	54,8534	-2,367	0,0205	**
z_1	0,6050	0,0706	8,575	< 0,0001	***
z_4	0,1940	0,0866	2,239	0,0280	**
z_5	-0,2729	0,07766	-3,514	0,0007	***

B. POZOSTAŁE PARAMETRY

Wyszczególnienie	Wartości
Średnia arytmetyczna zmiennej zależnej	626,8276
Suma kwadratów reszt	1 355 514
Współczynnik determinacji R^2	0,887932
$F(10, 76)$	60,21612

a Poziom istotności zmiennych: *** – $p < 0,01$; ** – $0,01 \leq p < 0,05$.

Tabl. 1. Parametry równania empirycznego opisującego miesięczne zużycie energii elektrycznej (dok.)

B. POZOSTAŁE PARAMETRY (dok.)

Wyszczególnienie	Wartości
Logarytm wiarygodności	–543,3872
Bayesowskie kryterium informacyjne Schwarza	1135,899
Autokorelacja reszt ρ_1	–0,147176
Odchylenie standardowe zmiennej zależnej	375,0270
Błąd standardowy reszt	133,5504
Skorygowany R^2	0,873186
Wartość p dla testu F	5,35e-32
Kryterium informacyjne Akaikego	1108,774
Kryterium informacyjne Hannana-Quinna	1119,697
Statystyka Durбина h	–1,823183

Uwaga. Ze względu na opóźnienia, redukujące liczbę obserwacji, wykorzystano obserwacje od kwietnia 2016 r. do czerwca 2023 r. ($N = 87$).

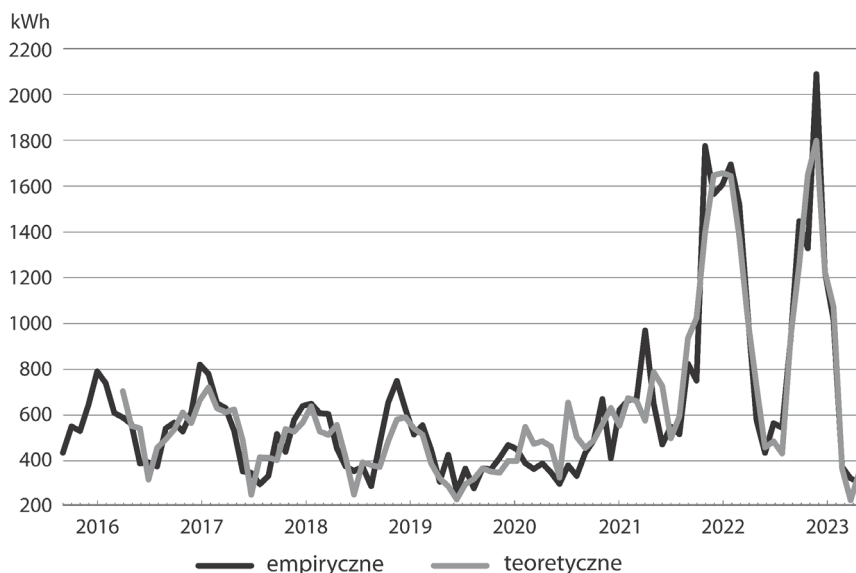
Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem pakietu GRET.

Z równania empirycznego wynika, że zastosowanie pompy ciepła (od kwietnia 2021 r.) zwiększyło zużycie energii elektrycznej w badanym gospodarstwie domowym średnio o 471,7 kWh miesięcznie, czyli blisko 5660 kWh rocznie, ale przyniosło znaczne obniżenie kosztów w porównaniu z okresem, kiedy do ogrzewania domu i podgrzewania wody używano pieca olejowego. W równaniu pojawiają się też zależności autoregresyjne: dodatnie 1- i 4-miesięczne oraz korygujące ujemne o okresie 5 miesięcy.

Poważny kryzys energetyczny, który wystąpił w 2022 r., skłonił rząd do interwencji na rynku energii (elektryczność, gaz, węgiel). Uwzględniona w równaniu zmienna *norm* przyjmuje wartość 1 w miesiącach, w których gospodarstwo domowe przekroczyło normę zużycia gwarantującą obniżoną cenę energii elektrycznej. Empiryczny rezultat świadczy o tym, że interwencja państwa wpłynęła na zmniejszenie zużycia energii o 1,61 MWh miesięcznie. Wystąpił też ujemny trend zużycia energii – jej konsumpcja zmniejszyła się średnio o 2,78 kWh miesięcznie.

Ujemne odchylenie sezonowe pojawiało się w lipcu, gdy zużycie energii było średnio o 129,85 kWh mniejsze w porównaniu ze składowymi systematycznymi.

Graficzną ilustrację rzeczywistych wielkości zużycia energii elektrycznej i wartości teoretycznych uzyskanych z modelu empirycznego przedstawiono na wyk. 4.

Wykr. 4. Empiryczne i teoretyczne wartości zmiennej *miesięczne zużycie energii elektrycznej*

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem pakietu GRETL i danych z tabl. 1.

W tabl. 2 pokazano oszacowania parametrów równania empirycznego opisującego zmienność miesięcznego kosztu zużycia energii elektrycznej. Pojawia się tu rekurencyjność oddziaływania wielkości zużycia energii na jej koszt. Dokładność opisu jest bardzo wysoka. Współczynnik $R^2 = 0,985$ wskazuje, że 98,5% zmienności kosztu zużytej energii zostaje wyjaśnione przez zmienne objaśniające równania.

Równoczesny jednostkowy wzrost zużycia energii powoduje przyrost ceny 1 MWh o 723,1 zł. Pojawiają się ujemne korekty z opóźnieniami o miesiąc oraz 3, 4, 5, 7 i 10 miesięcy. Ważne jest zwłaszcza nawiązanie sekwencyjne z okresu miesiąca. Oznacza to, że ponad 1,7% kosztu zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie z miesiąca poprzedniego ujawnia się w bieżącym koszcie. Pojawia się też nieznaczna ujemna korekta autoregresyjna zmiennej z opóźnieniem o 6 miesięcy.

Występuje dodatnia sezonowość w styczniu – miesięczny koszt zużycia energii zwiększa się o 70,15 zł. Ponadto zmienna reprezentująca interwencję państwa (*norm*) wskazuje na zmniejszenie kosztu zużytej energii o 1035,21 zł. W skali roku oszczędność ta jest niewielka. Zmienne objaśniające równania wyjaśniają zmienność blisko 98,5% mechanizmu kształtowania miesięcznego kosztu zużycia energii elektrycznej.

W ostatnim analizowanym roku (2023) koszt zużycia energii elektrycznej gospodarstwa domowego wyniósł 10 889,09 zł. Gdyby gospodarstwo korzystało z ogrzewania olejem opałowym, wówczas koszt mógłby wynieść ok. 17 000 zł. Do tego należy doliczyć koszt zużycia energii elektrycznej na obsługę kotła olejowego (ok. 1000 zł). Oszczędności są zatem znaczne.

Tabl. 2. Parametry równania empirycznego opisującego miesięczny koszt zużycia energii elektrycznej

A. ZMIENNE

Wyszczególnienie	Współczynnik regresji	Błąd standardowy	Statystyka t -Studenta	Wartość p	Istotność ^a
const	6,7918	28,7154	0,2365	0,8137	.
Z	0,7231	0,0386	18,73	< 0,0001	***
Z_1	-1,3027	0,1399	-9,311	< 0,0001	***
Z_3	-0,0930	0,0397	-2,344	0,0220	**
Z_4	-0,2517	0,1051	-2,396	0,0194	**
Z_5	-0,6484	0,1260	-5,145	< 0,0001	***
Z_6	1,8432	0,2977	6,192	< 0,0001	***
Z_7	-0,1014	0,0456	-2,224	0,0295	**
Z_{10}	-1,1337	0,3479	-3,259	0,0018	***
$norm$	-1035,21	167,494	-6,181	< 0,0001	***
dm_1	70,1465	21,9273	3,199	0,0021	***
k_1	1,6958	0,2031	8,350	< 0,0001	***
k_2	0,1025	0,0435	2,355	0,0215	**
k_4	0,5171	0,1313	3,938	0,0002	***
k_5	1,0634	0,1573	6,760	< 0,0001	***
k_6	-2,9105	0,4442	-6,552	< 0,0001	***
k_{10}	1,9932	0,5334	3,737	0,0004	***

B. POZOSTAŁE PARAMETRY

Wyszczególnienie	Wartości
Średnia arytmetyczna zmiennej zależnej	466,0512
Suma kwadratów reszt	170 121,4
Współczynnik determinacji R^2	0,984892
$F(16, 67)$	272,9808
Logarytm wiarygodności	-438,9558
Bayesowskie kryterium informacyjne Schwarza	953,2354
Autokorelacja reszt ρ_1	0,044285
Odchylenie standardowe zmiennej zależnej	368,3280
Błąd standardowy reszt	50,38973
Skorygowany R^2	0,981284
Wartość p dla testu F	1,86e-54
Kryterium informacyjne Akaikego	911,9115
Kryterium informacyjne Hannana-Quinna	928,5234
Statystyka Durбина h	NA

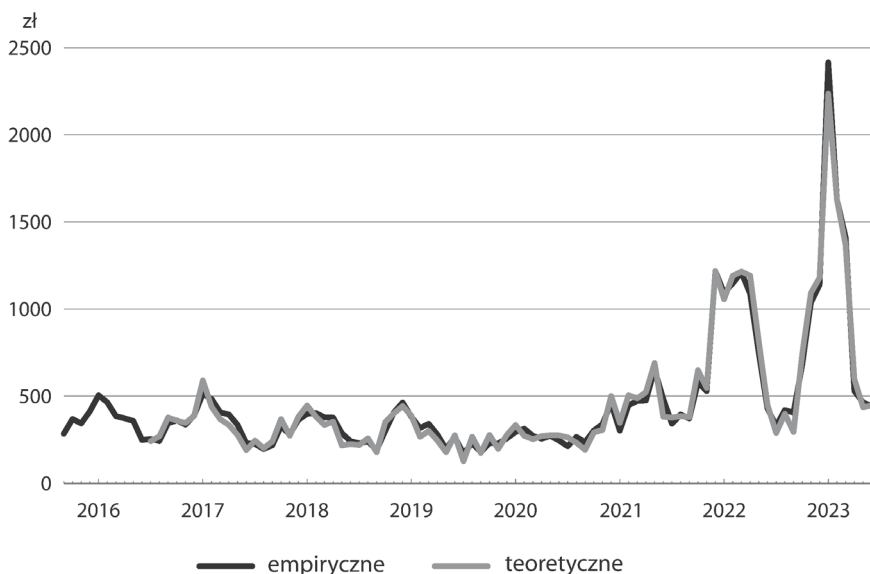
a Jak przy tabl. 1.

Uwaga. Jak przy tabl. 1. NA – nieskończoność.

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem pakietu GRETL.

Wykres 5 ilustruje rzeczywiste koszty zużycia energii elektrycznej i koszty teoretyczne uzyskane z modelu empirycznego.

Wykr. 5. Empiryczne i teoretyczne wartości zmiennej *miesięczny koszt zużycia energii elektrycznej*



Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem pakietu GRETl i danych z tabl. 2.

W tabl. 3 zamieszczono oszacowania parametrów empirycznego równania opisującego zmienną *cena 1 MWh energii elektrycznej w danym miesiącu* dla badanego gospodarstwa domowego. Potwierdziła się hipoteza o sprzężeniu zwrotnym między tą zmienną i zużyciem energii elektrycznej – wzrost zużycia energii skutkuje spadkiem jej ceny jednostkowej. Relatywnie wysokie stałe koszty w cenie jednostkowej rozkładają się na większą ilość jednostek zużytej energii, co skutkuje obniżką ceny 1 MWh. W równaniu dostrzega się też dodatnie korekty ceny jednostkowej co miesiąc i 6 miesięcy oraz ujemną korektę z opóźnieniem o 5 miesięcy. Reakcja wielkości zużycia energii elektrycznej na korektę cen następuje zatem z rozmaitymi opóźnieniami czasowymi.

W rozpatrywanym okresie daje się zaobserwować rosnący trend w przypadku ceny 1 MWh – średniomiesięczny wzrost o blisko 28 gr. Dodatkowo występuje dodatnia autokorelacja ceny jednostkowej – bieżąca cena jednostkowa stanowi ponad 84% ceny z poprzedniego miesiąca. Pojawiają się też korekty autokorelacyjne: dodatnia o ponad 35 gr co 11 miesięcy oraz ujemna o ponad 29 gr co 12 miesięcy. Równanie empiryczne zamieszczone w tabl. 3 z dużą dokładnością opisuje mechanizm zmienności jednostkowej ceny energii elektrycznej – wyjaśnione zostało 98,5% jej zmienności.

Tabl. 3. Parametry równania empirycznego opisującego cenę 1 MWh energii elektrycznej w danym miesiącu

A. ZMIENNE

Wyszczególnienie	Współczynnik regresji	Błąd standardowy	Statystyka t -Studenta	Wartość p	Istotność ^a
const	-102,749	54,390	-1,889	0,063	*
z_1	0,0466	0,0157	2,960	0,004	***
z_2	-0,0470	0,0150	-3,144	0,002	***
z_7	-0,0204	0,0102	-2,012	0,048	**
z_{12}	0,0898	0,0146	6,155	< 0,0001	***
$norm$	-285,196	57,9209	-4,924	< 0,0001	***
dm_6	24,7786	10,8831	2,277	0,0260	**
c_1	1,9522	0,1444	13,52	< 0,0001	***
c_2	-0,6623	0,0999	-6,626	< 0,0001	***
c_5	0,3298	0,1140	2,892	0,005	***
c_6	-0,51980	0,1807	-2,876	0,005	***

B. POZOSTAŁE PARAMETRY

Wyszczególnienie	Wartości
Średnia arytmetyczna zmiennej zależnej	718,0197
Suma kwadratów reszt	44 666,70
Współczynnik determinacji R^2	0,984526
$F(10, 71)$	451,7342
Logarytm wiarygodności	-374,6638
Bayesowskie kryterium informacyjne Schwarza	797,8015
Autokorelacja reszt ρ_1	-0,136109
Odchylenie standardowe zmiennej zależnej	188,7766
Błąd standardowy reszt	25,08204
Skorygowany R^2	0,982347
Wartość p dla testu F	4,39e-60
Kryterium informacyjne Akaikego	771,3276
Kryterium informacyjne Hannana-Quinna	781,9565
Statystyka Durбина h	NA

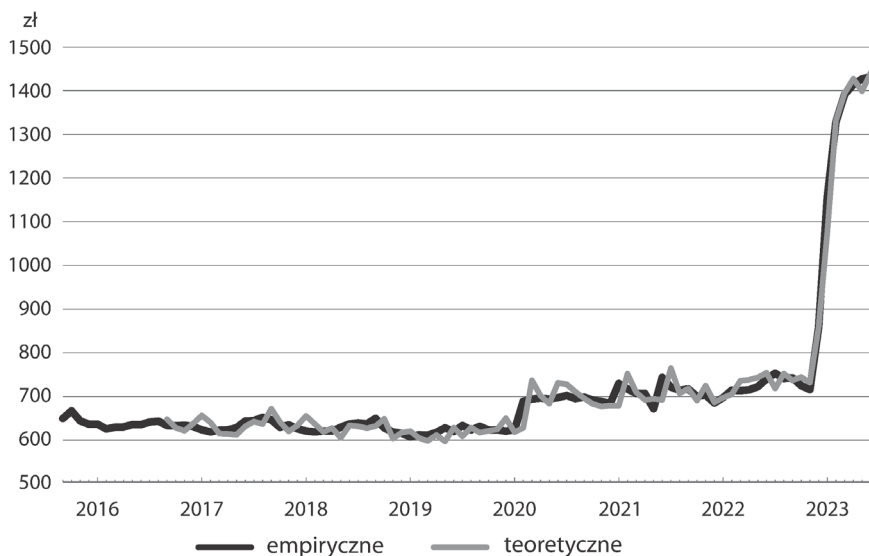
a Jak przy tabl. 1. * – $p \leq 0,1$.

Uwaga. Ze względu na opóźnienia, redukujące liczbę obserwacji, wykorzystano obserwacje od września 2016 r. do czerwca 2023 r. $N = 82$. NA – nieskończoność.

Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem pakietu GRET.

Na wyk. 6, ilustrującym zmienność ceny, przedstawiono rzeczywiste i teoretyczne wielkości zmiennej.

Wykr. 6. Empiryczne i teoretyczne wartości zmiennej *cena 1 MWh w danym miesiącu*



Źródło: obliczenia własne z wykorzystaniem pakietu GRETl i danych z tabl. 3.

4. Podsumowanie

W artykule omówiono wyniki badania, którego celem było określenie – za pomocą wielorównaniowego modelu ekonometrycznego – popytu na energię elektryczną w przykładowym gospodarstwie domowym w Polsce. Analizowano faktury za energię elektryczną za okres od września 2015 r. do czerwca 2023 r. W kwietniu 2021 r. w gospodarstwie została zainstalowana pompa ciepła i zrezygnowano z ogrzewania olejowego, co przyniosło znaczne oszczędności.

Zaprezentowany w niniejszej pracy ekonometryczny model popytu na energię elektryczną w gospodarstwie domowym nie potwierdza hipotezy o sprzężeniu zwrotnym między miesięcznym zużyciem energii elektrycznej i ceną 1 MWh energii. Potwierdzona została natomiast rekurencyjność wpływu wielkości zużycia energii elektrycznej na jej koszt. W latach 2022 i 2023 wystąpił poważny kryzys energetyczny. W Polsce jego konsekwencją była interwencja państwa w rynkowy mechanizm ekonomiczny. Aby ograniczyć wydatki gospodarstw domowych, rząd zamroził ceny energii elektrycznej, ograniczając w ten sposób mechanizm rynkowy. Ta ingerencja spowodowała eliminację sprzężenia zwrotnego między zużyciem energii i jej ceną jednostkową.

Zakończenie kryzysu powinno spowodować ponowne pojawienie się sprzężenia zwrotnego rozpatrywanej pary zmiennych.

Poza walorami poznawczymi uzyskanych wyników modelowania ekonometrycznego skonstruowane narzędzie empiryczne umożliwia wyznaczenie prognoz zużycia energii, jej kosztów i ceny jednostkowej w kolejnych miesiącach, przynajmniej na następny rok. Pojawia się jednak jedna istotna niewiadoma – z powodu kryzysu energetycznego trudno ustalić, nawet w krótkim okresie, jaka będzie cena 1 MWh. Mimo tego można stosunkowo dokładnie przewidzieć wielkości zużycia.

Kolejną inwestycją w gospodarstwie domowym może być instalacja fotowoltaiczna. Warunkiem jej realizacji jest gruntowna analiza ekonomiczna efektywności takiego przedsięwzięcia, które w dużym stopniu zależy od uwarunkowań legislacyjnych. Warto podkreślić, że badane gospodarstwo domowe, choć specyficzne pod względem wielkości i wykorzystania energii, może stanowić reprezentatywny przykład dla pewnej grupy polskich gospodarstw domowych – szczególnie tych, które korzystają wyłącznie z energii elektrycznej jako źródła zasilania. Uzyskane wyniki mogą zatem znaleźć zastosowanie w szerszym kontekście, a mianowicie w przypadku gospodarstw, które zainstalowały takie systemy ogrzewania jak pompy ciepła oraz tych, które mają podobne wzorce zużycia energii. Pomimo specyfiki analizowanego przykładu istotne wnioski dotyczące wpływu cen energii na zużycie i kosztów związanych z przejściem na efektywniejsze systemy energetycznie dają się odnieść do innych gospodarstw domowych o zbliżonych cechach. Sugeruje to, że zaprezentowane narzędzia analizy ekonometrycznej mogą być użyteczne w prognozowaniu zużycia energii i kosztów w szerszym zakresie. Ma to szczególne znaczenie w kontekście rosnącej roli energii elektrycznej w polskich gospodarstwach domowych.

Wskazane rozwiązania polegające na odchodzeniu od kopalnych źródeł energii mogą przynieść znaczące korzyści w postaci ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, a także obniżyć bieżące wydatki na energię elektryczną. Sformułowane hipotezy badawcze potwierdzone zostały empirycznie jedynie częściowo, zaobserwowano bowiem wzrost zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie domowym po zainstalowaniu pompy ciepła. Po zaniechaniu interwencji rządu w mechanizm rynkowy powinno ponownie pojawić się ujemne sprzężenie zwrotne między zużyciem energii elektrycznej w gospodarstwie domowym i jej ceną jednostkową.

Bibliografia

- Ari, E., Aydin, N., Karacan, S., Saracli, S. (2016). Analysis of Households' Electricity Consumption with Ordered Logit Models: Example of Turkey. *International Journal of Humanities and Social Science Invention*, 5(6), 73–84. [https://www.ijhssi.org/papers/v5\(6\)/I0506073084.pdf](https://www.ijhssi.org/papers/v5(6)/I0506073084.pdf).
- Debs, L., Metzinger, J. (2022). A Comparison of Energy Consumption in American Homes by Climate Region. *Buildings*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/buildings12010082>.

- Durišić, V., Rogić, S., Smolović, J. C., Radonjić, M. (2020). Determinants of household electrical energy consumption: Evidences and suggestions with application to Montenegro. *Energy Reports*, 6(Supplement 3), 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.10.039>.
- Hernández-Tabares, L. (2017). Energy savings from occupancy based control of the fan coil unit speeds: a case study. *Revista de Ingeniería Energética*, 38(3), 208–212. <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329152934006.pdf>.
- Hidalgo, J., Coello, S., González, Y. (2018). *The Determinants of Household Electricity Demand in Marginal Ecuador: “A Case Study at Monte Sinai”*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.312>.
- Karisma, K. A., Maski, G., Noor, I. (2016). Analysis of Electricity Consumption Behaviour: Case Study of Non-business and Business Household in Malang City. *International Journal of Social and Local Economic Governance*, 2(2), 168–176. <https://doi.org/10.21776/ub.ijleg.2016.002.02.8>.
- Kostakis, I. (2020). Socio-demographic determinants of household electricity consumption: evidence from Greece using quantile regression analysis. *Current Research in Environmental Sustainability*, 1, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.04.001>.
- Mamudu, Z. U., Ochei, M. C. (2020). Electricity Consumption and Economic Growth in Nigeria: An Empirical Analysis. *IOSR Journal of Economics and Finance*, 11(6), 1–17. <https://doi.org/10.9790/5933-1106030117>.
- Seebauer, S., Wolf, A. (2017). Disentangling household and individual actors in explaining private electricity consumption. *Energy Efficiency*, 10(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9435-x>.
- Sharif Ali, S. S., Razman, M. R., Awang, A. (2020). The Estimation and Relationship of Domestic Electricity Consumption and Appliances Ownership in Malaysia’s Intermediate City. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(6), 116–122. <https://doi.org/10.32479/ijee.8358>.
- Singh, J. P., Alam, O., Yassine, A. (2016). Influence of Geodemographic Factors on Electricity Consumption and Forecasting Models. *IEEE Access*, 10, 70456–70466. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188004>.
- Wiśniewski, J. W. (2016). *Microeconometrics in Business Management*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/978111915136>.
- Wiśniewski, J. W. (2021). Forecasting in Small Business Management. *Risks*, 9(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/risks9040069>.
- Wiśniewski, J. W. (2022). On the Two Stage Least Squares Method in Econometric Micromodeling. W: W. Szkutnik, A. Sączewska-Piotrowska, M. Hadaś-Dyduch, J. Acedański (red.), *16th International Scientific Conference Analysis of International Relations 2022. Methods and Models of Regional Development. Conference Proceedings* (s. 41–52). Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach.
- Wiśniewski, J. W. (2023). An Econometric Model of Household Electricity Consumption. A Case Study of Poland. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, (178), 705–716. <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2023.178.39>.
- Zajcewa, J. W. (2016). Ekonometričeskoje modelirovanije potreblenija elektroenergii domochoziajstwami kak instrument rasczeta socyalnoj normy potreblenija. *Ekonomika Riegiiona*, 12(2), 405–416. <https://doi.org/10.17059/2016-2-7>.
- Zhang, L., Wen, X. (2021). Nonlinear Effect Analysis of Electricity Price on Household Electricity Consumption. *Mathematical Problems in Engineering*, (1), 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/8503158>.