

PROGNOZOWANIE ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ. STUDIUM EMPIRYCZNE DLA REGIONU ŁÓDZKIEGO

Anna Szmit

Wydział Organizacji i Zarządzania, Politechnika Łódzka

1 WPROWADZENIE

Prognozowanie należy do narzędzi, bez których trudno sobie wyobrazić nowoczesne zarządzanie. Umiejętność trafnego przewidywania przyszłych zachowań rynku stanowi klucz do efektywnego zarządzania w wielu dziedzinach gospodarki. Prognozowanie jest jednym z czynników wspomagających podejmowanie decyzji, odgrywa ono zatem istotną rolę we wszystkich podstawowych funkcjach zarządzania³³: organizowaniu, kierowaniu, kontrolowaniu, w szczególności jednak sposób w planowaniu we wszystkich jego aspektach: w planowaniu inwestycji, produkcji, kosztów, wielkości zamówień, wielkości i struktury zatrudnienia, w tworzeniu misji i strategii firmy.

Umiejętność budowy prognoz ma duże znaczenie zarówno dla zarządzania strategicznego, jak i operacyjnego³⁴. Do celów strategicznych szczególnie przydatne są prognozy długookresowe, o dużym wyprzedzeniu (horyzoncie) czasowym, pozwalające określić przyszłe kierunki zmian w otoczeniu gospodarczym przedsiębiorstwa. W zarządzaniu operacyjnym większe znaczenie ma wiedza na temat najbliższej przyszłości, pozwalająca podejmować decyzje dotyczące bieżącej działalności organizacji gospodarczej.

³³ Porównaj np. [12], s. 330-334 i dalsze. W pracy [14], s. 22-23 wymienia się więcej podstawowych funkcji zarządzania.

³⁴ Potrzeba budowania prognoz dla celów zarządzania strategicznego i operacyjnego została podkreślona m.in. w pracy [2], s. 5365-68.

Prognozowanie jest również jednym z głównych elementów badań marketingowych³⁵. Bardzo istotną rolę w tego rodzaju działalności odgrywa zwłaszcza prognozowanie przyszłego popytu rynkowego. Wspomaga ono procesy planistyczne podmiotów gospodarczych. Pozwala dostosować się przedsiębiorstwu do potrzeb rynku i rozwinąć działalność w kierunku przynoszącym możliwie duże korzyści.

Proces transformacji ustrojowej i gospodarczej w Polsce, rozpoczęty w 1989 roku, umocnił rolę prognozowania gospodarczego i nadał mu nowy wymiar. „Znaczenie badań prognostycznych, zawsze docenianych, znacznie wzrosło w warunkach gospodarki rynkowej. Obecnie problematyka ta znajduje się w centrum uwagi polityków gospodarczych, ekonomistów, a także publicystów i dziennikarzy”³⁶. Przejście od gospodarki centralnie planowanej do wolnego rynku wymusiło działania dostosowawcze podmiotów gospodarczych do działania w warunkach konkurencji.

W szczególności potrzeba prognozowania uwidacznia się w przypadku sektora energetycznego³⁷, postrzeganego przez długi czas jako monopol naturalny, zarezerwowany dla centralnego zarządzania i pełnej kontroli państwa. Sektor ten w ostatnich dziesięcioleciach traktowany jest coraz częściej jako potencjalny obszar liberalizacji i gry konkurencyjnej. W wielu krajach, zwłaszcza wysoko rozwiniętych gospodarczo, zezwala się w coraz większym zakresie na samodzielność firm energetycznych. W krajach

³⁵ Porównaj [7], s. 224-240.

³⁶ Źródło: [18], s. 9.

³⁷ Potrzebę tę podkreślano m.in. w pracach [1], s. 101-111, [10], s. 77-78, [8] s. 3-5.

należących lub kandydujących do Unii Europejskiej wyznacznikiem kierunków zmian w energetyce jest Europejska Karta Energetyczna.

W Polsce proces przekształceń sektora energetycznego rozpoczął się od rozdzielania funkcji produkcji, przesyłu i dystrybucji pomiędzy różne podmioty gospodarcze na początku lat dziewięćdziesiątych, a obecnie podąża w kierunku wyznaczonym przez uchwaloną w 1997 roku ustawę *Prawo Energetyczne*. Przekształcenia mają docelowo doprowadzić do konkurencji na rynku produkcji i obrotu energią, zwłaszcza energią elektryczną. Firmy prowadzące tego rodzaju działalność będą zatem w najbliższej przyszłości musiały liczyć się z koniecznością walki o pozycję na rynku, o zdobycie i utrzymanie klientów.

W tej sytuacji problem prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną jest zagadnieniem niezwykle aktualnym i mającym doniosłe znaczenie praktyczne. Prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną są potrzebne zarówno w skali makro-, jak i mikroekonomicznej. Dla pojedynczych przedsiębiorstw trafność podejmowanych decyzji stanowi o terażniejszej i przyszłej pozycji na rynku. Trafne decyzje można natomiast podejmować między innymi dzięki dobrym prognozom, to znaczy odpowiednio dokładnym i dostarczonym z wystarczająco dużym wyprzedzeniem.

Problem prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną może być rozpatrywany także w ujęciu regionalnym. Specyfiką sektora elektroenergetycznego jest to, że prawie wszyscy odbiorcy energii elektrycznej, zamieszkujący pewien obszar, są obsługiwani w sferze dystrybucji przez tego samego operatora sieci rozdzielczej, który jest właścicielem linii energetycznych na danym terenie. Stwarza to możliwość uzyskania prawie pełnej informacji o wielkości popytu regionalnego na podstawie danych zbieranych w jednym miejscu. Zapewnia to m.in. porównywalność wszystkich danych pod względem sposobu i momentu mierzenia badanej wielkości, co jest bardzo istotne w rzetelnych badaniach empirycznych. W regionie łódzkim głównym operatorem sieci dystrybucyjnej jest Łódzki Zakład Energetyczny SA, który obejmuje swoim zasięgiem całą aglomerację łódzką.

Jednym z podstawowych czynników stanowiących o istotności badań popytu na energię elektryczną jest jej nietrwałość. Energia elektryczna jest dobrem zużywanym i produkowanym

praktycznie w tym samym czasie. W przypadku jej nadprodukcji jest ona bezpowrotnie tracona, w przypadku zbyt małej podaży, nawet przez krótki czas, występują niepożądane i często trudne do naprawienia szkody i zakłócenia. Magazynowanie energii elektrycznej jest trudne i prowadzi do jej dużych strat, dlatego jest niekorzystne na dużą skalę. Z tych powodów znajomość wielkości popytu na energię z wyprzedzeniem czasowym ma bardzo istotne znaczenie dla możliwości bilansowania go odpowiednią podażą.

Specyficzną cechą zapotrzebowania na energię elektryczną jest duża zmienność jego poziomu w czasie. Zmienność ta jest w znacznej mierze charakteryzowana przez rytmy: roczny, tygodniowy oraz dobowy, w których wahania poziomu popytu zmieniają się w krótkim czasie o nawet kilkadziesiąt procent. Te cechy wymuszają częsty pomiar wielkości zużycia energii, a także jej dokładną analizę. Zatem rynek energii elektrycznej jest dziedziną, w której rola badania i prognozowania popytu jest szczególnie duża, a jakość otrzymywanych wyników ma bezpośrednie przełożenie na realną sytuację przedsiębiorstw zaangażowanych w produkcję, przesył lub obrót energią elektryczną.

W tym kontekście nabierają znaczenia poszukiwania odpowiednich narzędzi, w tym prognostycznych, mających wspomagać prognozowanie. Dla prognoz krótkoterminowych, które mają podstawowe znaczenie dla pojedynczych przedsiębiorstw oraz regionów, przydatne są zwłaszcza metody ilościowe, umożliwiające opis skomplikowanej charakterystyki badanego zjawiska, a także precyzyjne uwzględnienie wpływu wielu czynników, mających wpływ na modelowaną i prognozowaną wielkość. Takie metody są wykorzystywane w wielu pracach poświęconych prognozowaniu zapotrzebowania na energię elektryczną. Duże zainteresowanie tematem modelowania popytu na energię jest także dowodem istotności tego problemu.

2 CEL PRACY

Celem rozprawy jest analiza zapotrzebowania na energię elektryczną w regionie łódzkim przy użyciu wybranych metod ilościowych oraz porównanie jakości prognoz otrzymanych za ich pomocą.

W ramach tak sformułowanego celu ogólnego można wymienić szereg celów szczegółowych:

- ocena, czy wybrane metody modelowania mogą być wykorzystane do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną,
- określenie możliwego do uzyskania stopnia dokładności w prognozach krótkookresowych energii elektrycznej,
- zbadanie, która z metod daje najlepsze rezultaty w prognozowaniu zapotrzebowania na energię elektryczną.

3 PROBLEMY BADAWCZE

Do głównych problemów podjętych w pracy należy zaliczyć:

- analizę sytuacji gospodarczej sektora elektroenergetycznego z uwzględnieniem jego ram prawnych oraz roli prognozowania w sektorze,
- przegląd metod prognozowania gospodarczego,
- przegląd zakresu i metod prognozowania stosowanych w elektroenergetyce,
- porównanie jakości prognoz otrzymanych za pomocą różnych metod i dla różnych horyzontów czasowych,
- ocenę, czy i kiedy należy stosować równocześnie różne metody.

4 METODY BADAWCZE

W pracy zastosowano następujące metody badawcze:

- 1 badania literaturowe,
- 2 modelowanie zjawisk gospodarczych przy użyciu metod ilościowych:
 - analizy szeregów czasowych: metod naiwnych, modeli wyrównywania wykładniczego, modeli ARIMA,
 - opisowych modeli ekonometrycznych,
 - metod z zakresu sztucznej inteligencji: sztucznych sieci neuronowych,
- 3 wywiad swobodny.

W pracy wykorzystano dane o dużej częstotliwości udostępnione przez Łódzki Zakład Energetyczny SA³⁸.

³⁸ Praca została poprzedzona badaniami pilotażowymi w zakresie prognozowania mocy szczytowych w Łódzkim Zakładzie Energetycznym SA. Wyniki badań pilotażowych w zakresie prognozowania były prezentowane w pracach [4, 5, 6, 15, 16, 17].

5 TEZA PRACY

Wybrane metody statystyczne oraz sztuczne sieci neuronowe mogą stanowić efektywny instrument analiz zapotrzebowania na energię elektryczną.

6 UKŁAD PRACY

Prezentowana praca składa się z dwóch części. Część pierwsza, składająca się z trzech rozdziałów, ma charakter teoretycznego wprowadzenia w tematykę omawianą w pracy. Część druga, także zawierająca trzy rozdziały, poświęcona jest zagadnieniom prognozowania zapotrzebowania na energię w regionie łódzkim.

Pierwszy rozdział zawiera omówienie miejsca sektora elektroenergetycznego w polskiej gospodarce. Przedstawiono w nim podstawowe zadania sektora elektroenergetycznego oraz sposób ich realizacji. Rozdział ten zawiera także opis struktury produkcji i konsumpcji energii elektrycznej w Polsce oraz analizę wielkości i dynamiki zużycia energii elektrycznej w różnych krajach świata. W tym rozdziale zamieszczono również zarys prawny przeprowadzanych reform w sektorze elektroenergetycznym w Polsce oraz w wybranych krajach, głównie europejskich. Przedstawiono perspektywy prywatyzacji polskiego sektora elektroenergetycznego. Zwrócono także uwagę na nowe zadania podmiotów gospodarczych funkcjonujących w sektorze elektroenergetycznym w związku z liberalizacją rynku energii w Polsce.

Rozdział drugi obejmuje przegląd podstawowych metod stosowanych do prognozowania gospodarczego ze szczególnym uwzględnieniem metod, które znajdują zastosowanie w prognozowaniu wielkości charakteryzujących sektor elektroenergetyczny. Przedstawiono krótką charakterystykę metod prognozowania, które stosuje się w oparciu o wcześniej zbudowane modele. Bardziej szczegółowo opisano metody, które zastosowano w części badawczej pracy. W tym rozdziale zamieszczono również sposoby oceny modeli prognostycznych.

Rozdział trzeci poświęcony został problemowi prognozowania w elektroenergetyce. Scharakteryzowano prognozy z punktu widzenia ich celu, horyzontu, zakresu oraz użytych metod. Przedstawiono w tym rozdziale przegląd literatury na temat prognoz wykonywanych

współcześnie i w przeszłości. Omawiane metody i modele podzielono na dwie grupy, według kryterium długości horyzontów prognoz.

Czwarty rozdział zawiera uzasadnienie zakresu badań empirycznych zaprezentowanych w pracy. Wymieniono w nim przedsiębiorstwa sektora elektroenergetycznego funkcjonujące w regionie łódzkim. Szczególną uwagę poświęcono spółkom dystrybucyjnym, których działalność ma zasięg regionalny. Omówiono także rodzaje prognoz o zasięgu regionu i uzasadniono wybór horyzontu prognoz zastosowanego w badaniach empirycznych.

Rozdział piąty zawiera specyfikację modeli przeznaczonych do krótkookresowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną dla ogółu odbiorców aglomeracji łódzkiej. Modele te budowano przy użyciu wybranych metod ilościowych. Poza konstrukcją, poszczególne modele różniły się liczbą i rodzajem zmiennych zastosowanych do opisu modelowanego szeregu. W rozdziale tym zamieszczono także ocenę zbudowanych modeli oraz ich analizę porównawczą.

Rozdział szósty zawiera analizę prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną dla regionu łódzkiego przy użyciu niektórych z modeli zbudowanych w rozdziale piątym. Prognozy podzielono na trzy grupy w zależności od ich horyzontu: godziny, doby oraz kilku miesięcy. Przeprowadzono analizę błędów *ex post* każdej z prognoz i na tej podstawie dokonano oceny możliwości i zakresu stosowania poszczególnych modeli i metod.

7 ZAKRES BADAŃ EMPIRYCZNYCH

Przedmiotem badań empirycznych w rozprawie są prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną dla terenu, na którym dystrybucję energii elektrycznej prowadzi przedsiębiorstwo Łódzki Zakład Energetyczny, dla horyzontu czasowego od jednej godziny do jednego miesiąca.

Łódzki Zakład Energetyczny jest spółką dystrybucyjną, pełniącą rolę operatora systemu rozdzielczego. Przedsiębiorstwo to ma obowiązek prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną na swoim terenie³⁹, jest zatem zainteresowane badaniami dotyczącymi wyboru jak najlepszych metod modelowania i prognozowa-

nia popytu na energię elektryczną. Działalność tego przedsiębiorstwa ma charakter regionalny, w przeciwieństwie do innych firm energetycznych znajdujących się na terenie regionu łódzkiego, takich jak np. elektrownie. Struktura odbiorców ŁZE SA nie odbiega istotnie od struktury dla większości terenów kraju, można się zatem spodziewać, że wyniki uzyskane w prezentowanych badaniach mogą być wykorzystane w innych warunkach lub porównywane z wynikami uzyskiwanymi dla innych danych.

W badaniach skoncentrowano się na prognozach krótkookresowych, o horyzoncie nie dłuższym niż kilka miesięcy. Stosowany w badaniach horyzont czasowy jest potrzebny do zarządzania operacyjnego przedsiębiorstwem energetycznym, podczas gdy prognozy o długim horyzoncie czasowym są potrzebne raczej w zarządzaniu strategicznym firm energetycznych. Modele do prognozowania długookresowego wymagają szeroko zakrojonych badań, aby w odpowiedni sposób uwzględniać wpływ zmiennych egzogenicznych na wielkość zapotrzebowania na energię elektryczną i przewidywać wartości tych zmiennych w długim okresie. W literaturze przedmiotu⁴⁰ podkreśla się, że precyzyjne prognozy krótkookresowe o dużej wiarygodności będą odgrywać znacznie większą rolę dla firm sektora elektroenergetycznego niż niepewne prognozy długookresowe i właśnie takie prognozy powinny być przedmiotem zainteresowania badaczy.

Szczególną uwagę poświęcono prognozom o horyzoncie godziny, doby i kilku miesięcy. Prognozowaną wielkością było godzinowe zużycie energii elektrycznej. Prognozy o takim horyzoncie i częstotliwości są bowiem potrzebne do określania wielkości zamówień i zawierania umów na zakup energii elektrycznej na rynku giełdowym lub kontraktowym, a następnie ewentualnej korekty tych zamówień, kiedy czynniki warunkujące wielkość zapotrzebowania będą mogły być określone z większą dokładnością w miarę zbliżania się w czasie do prognozowanego momentu. Uwzględniony w pracy horyzont prognoz ma tę właściwość, że nie ujawniają się w tym czasie (w istotnym stopniu) zmiany jakościowe w przebiegu szeregu zapotrzebowania na energię elektryczną, zatem można stosować modele zakładające utrzymywanie się istniejących zależności w czasie.

³⁹ Zgodnie z dokumentem [11].

⁴⁰ Porównaj [9].

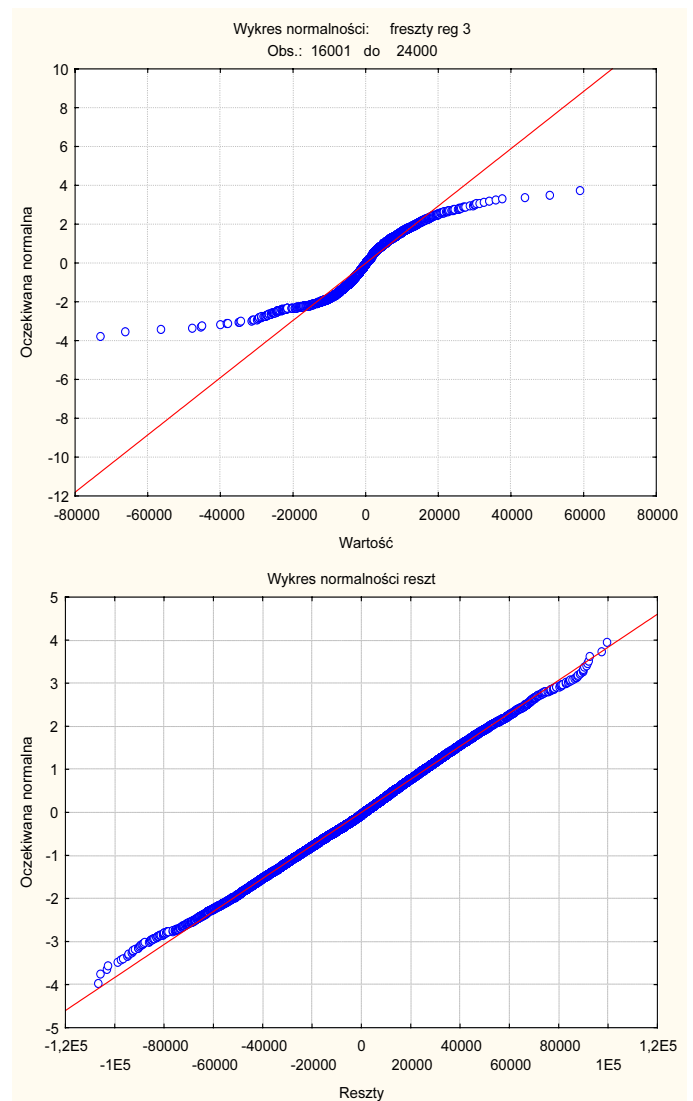
W badaniach wykorzystano szereg 27048 obserwacji z ponad trzech lat, mierzonych z częstotliwością co godzinę i odwzorowujących wielkość zużycia energii elektrycznej przez ogół odbiorców w aglomeracji łódzkiej. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że szereg zapotrzebowania na energię elektryczną charakteryzuje wielokrotna sezonowość o trzech długościach cyklu: rocznym, tygodniowym i dobowym. Oprócz tego zaobserwowano istotny związek pomiędzy wielkością popytu na energię, a takimi zjawiskami jak: dni świąteczne, temperatura powietrza oraz wielkość zapotrzebowania na energię w przeszłości (autoregresyjny charakter szeregu danych). Zauważono także, że obserwowane zależności mają często charakter nieliniowy.

W pracy wykorzystano modele następujących typów:

- modele szeregów czasowych, do których zaliczyć można zaprezentowane w pracy trzy modele naiwne, dwa modele wyrównywania wykładniczego i trzy modele ARIMA,
- modele regresji liniowej ze zmiennymi opisującymi moment pomiaru zmiennej (miesiąc, dzień tygodnia, informacje o wschodzie i zachodzie słońca itp.), temperaturę powietrza lub opóźnione wartości modelowanego szeregu; zbudowano sześć modeli tego rodzaju z różnymi zestawami zmiennych objaśniających,
- model typowych przebiegów, generujący 960 wartości prognoz zapotrzebowania na energię reprezentujących typowe zużycie energii dla danego momentu w czasie, osobno dla każdej godziny w poszczególnych miesiącach i dla doby roboczej, sobotniej oraz niedzielnej,
- dwu- lub trzystopniowe modele, w których model (lub dwa modele) regresji liniowej (lub model typowych przebiegów) stanowił rodzaj filtra uwzględniającego wpływ zjawisk zewnętrznych, a następnie reszty modelu regresji były poddawane modelowaniu za pomocą procesu ARMA (skonstruowano czternaście modeli kilkustopniowych),
- jednokierunkowe sztuczne sieci neuronowe, w których informacje wejściowe stanowiły te same zmienne, co w modelach regresji liniowej; w pracy zaprezentowano cztery różne sieci.

Zbudowano łącznie trzydzieści trzy modele. W modelach opisowych, poza modelem typowym

wych przebiegów, użyto w sumie dwieście trzydzieści różnych zmiennych. Wszystkie modele, z wyjątkiem naiwnych, podzielono na trzy grupy pod względem wyprzedzenia czasowego, z jakim mogą być znane wartości zmiennych objaśniających, ponieważ to wyprzedzenie determinuje efektywny horyzont czasowy uzyskanej prognozy. Modele wykonane metodą naiwną, jako najprostsze, stanowiły punkt odniesienia dla pozostałych modeli w celu oceny ich jakości pod względem stopnia dopasowania do danych empirycznych.

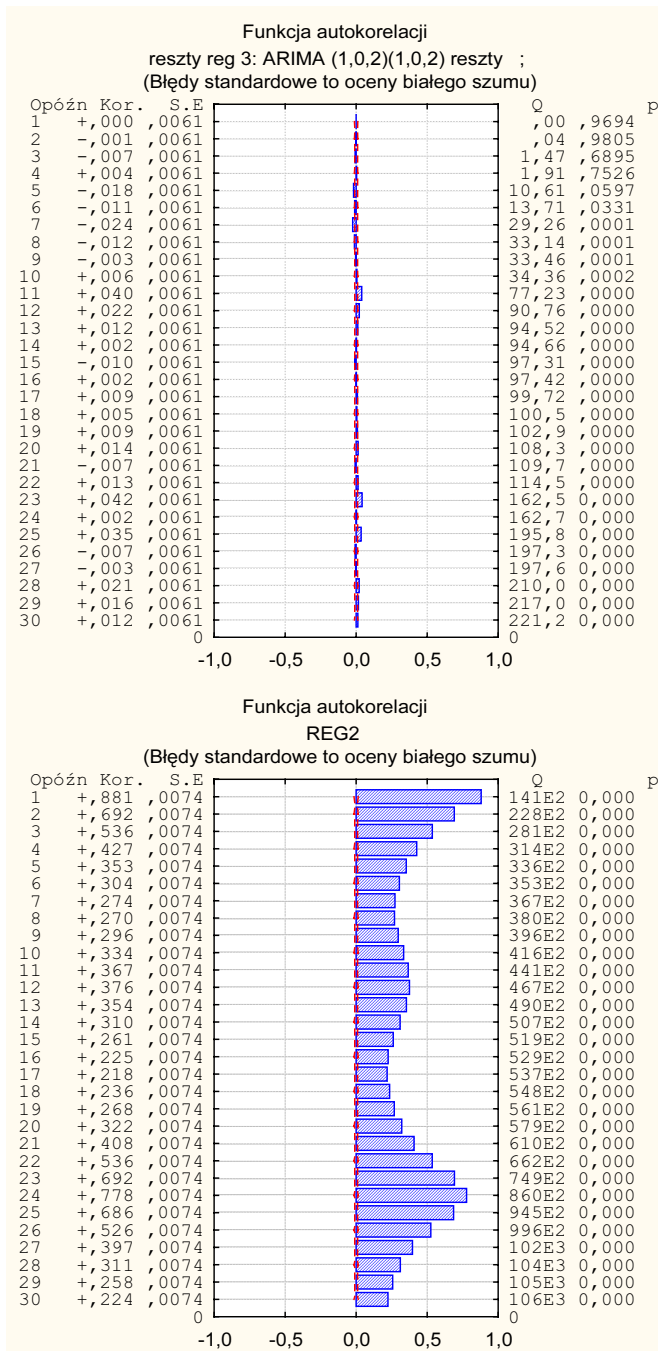


Rys. 1. Przykłady wykresów normalności dla reszt modeli oznaczonych w rozprawie przez M3A (wykres wyżej) oraz M2T. W przypadku, gdy rozkład reszt jest dokładnie normalny, punkty (odwzorowujące reszty empiryczne) powinny się dokładnie pokrywać z prostą.

Śśród skonstruowanych modeli wiele charakteryzowało się bardzo dobrym stopniem dopasowania do danych empirycznych. Średni absolutny błąd procentowy (MAPE) dla modeli

użytych do prognozowania wynosił, w zależności od grupy:

- 5,7%-7,2% w grupie modeli o zmiennych objaśniających znanych z dowolnie dużym wyprzedzeniem,
- 3,7%-5,4% w grupie modeli o zmiennych objaśniających znanych z wyprzedzeniem doby,
- 1,5%-2,3% w grupie modeli o zmiennych objaśniających znanych z wyprzedzeniem godziny.



Rys. 2. Przykłady wykresów autokorelacji reszt modeli oznaczonych w rozprawie przez M3A (wykres wyżej) oraz M2T. W przypadku, gdy reszty są pozbawione autokorelacji (na rysunku wykreślono opóźnienia do 30), słupki powinny mieć długość równą zero.

Dla zbudowanych modeli stosowano także inne kryteria oceny. Oprócz błędu *MAPE* wyznaczono wartości błędów: błędu średniego *ME*, średniego błędu bezwzględnego *MAE* oraz średniego błędu procentowego *MPE*. Obliczono także wartości współczynnika determinacji R^2 , współczynnika wyrazistości w oraz sprawdziany testów: *F* dla łącznej istotności parametrów, serii dla losowości, χ^2 dla zgodności z rozkładem normalnym. Zamieszczono także w pracy wykresy normalności oraz funkcji autokorelacji i autokorelacji cząstkowych (przykładowe wykresy przedstawiono na rys. 1 i 2).

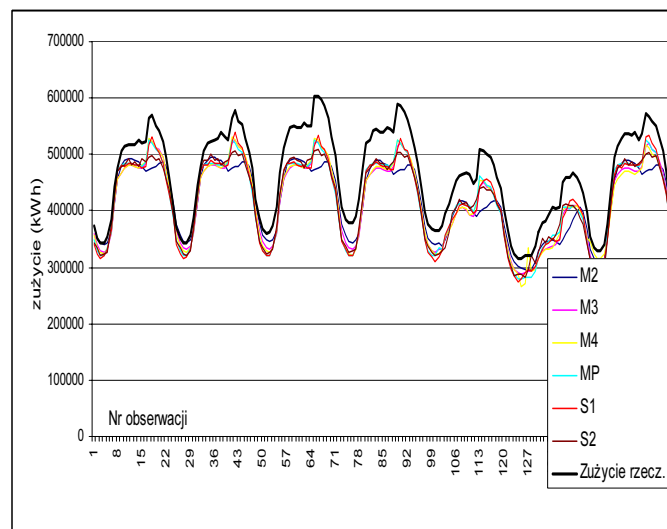
Nie wszystkie własności skonstruowanych modeli można uznać za zadowalające. W szczególności rozkład reszt wszystkich modeli różnił się istotnie od rozkładu normalnego. Wiele modeli, zwłaszcza w grupie modeli przeznaczonych do prognoz o najdłuższym horyzoncie, charakteryzowało się istotną autokorelacją reszt. Mimo to dla każdej grupy modeli wybrano kilka, dla których wykonano prognozy o horyzoncie (w zależności od grupy) jedenastu miesięcy, jednej doby oraz jednej godziny. W każdym przypadku były one wykonywane na kilka tysięcy godzin. Łącznie wykonano prognozy dla dziewiętnastu modeli i poddano je analizie pod względem ich dokładności *ex post*. Wyniki błędów średnich modeli użytych do prognoz zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Średnie błędy prognoz poszczególnych modeli. *ME* – błąd średni (przeciętna wartość modelowanego szeregu to 7 939 tys. kWh), *MAPE* – średni bezwzględny błąd procentowy.

Sym-bol	Model	ME (kWh)	MAPE
<i>Prognozy o horyzoncie jedenastu miesięcy</i>			
M2	Model regresji liniowej z 93 zero-jedynkowymi zmiennymi objaśniającymi	11047,1	6,91%
M3	Model regresji liniowej z 99 zero-jedynkowymi zmiennymi objaśniającymi	11062,8	5,86%
M4	Model regresji liniowej ze 198 zero-jedynkowymi zmiennymi objaśniającymi	10874,7	6,15%
MP	Model średnich typowych przebiegów	9577,1	5,65%
S1	Sieć neuronowa o architekturze 50-25-1	-10382,3	5,88%
S2	Sieć neuronowa o architekturze 56-28-1	-10720,1	6,04%
<i>Prognozy o horyzoncie jednej doby</i>			
M3T	Model dwustopniowy regresji ze zmiennymi temperaturowymi na resztach modelu M3	13948,3	6,45%

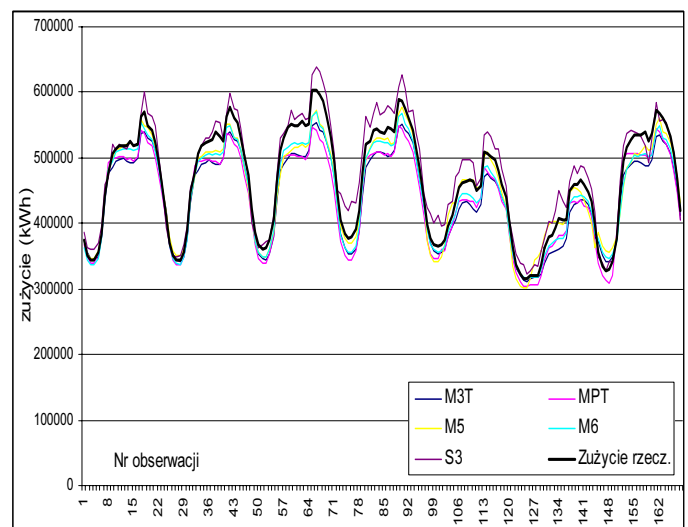
Symbol	Model	ME (kWh)	MAPE
MPT	Model 2-stopniowy regresji liniowej ze zmiennymi temperaturowymi na resztach modelu średnich typowych przebiegów	12658,6	5,82%
M5	Model regresji liniowej z 60 zmiennymi objaśniającymi	4687,1	5,52%
M6	Model regresji liniowej z 107 zm. objaśniającymi	7816,4	4,12%
S3	Sieć neuronowa o architekturze 72-36-1	6012,3	4,12%
<i>Prognozy o horyzoncie jednej godziny</i>			
A1	Model ARIMA(2,1,0)(2,1,1) ₂₄	0,4	1,74%
A3	Model ARIMA(1,1,3)(1,1,2) ₂₄	3,5	2,18%
M3A	Model 2-st. ARIMA(1,0,2)(1,0,2) ₂₄ na resztach modelu M3	196,8	1,39%
MPA	Model 2-st. ARIMA(1,0,1)(1,0,1) ₂₄ na resztach modelu średnich typowych przebiegów	217,5	1,40%
M3T A	Model 3-st. ARIMA(1,0,1)(1,0,1) ₂₄ na resztach modelu regresji ze zmiennymi temperaturowymi na resztach modelu M3	414,5	1,42%
MPT A	Model 3-st. ARIMA(1,0,0)(1,0,1) ₂₄ na resztach modelu regresji liniowej ze zmiennymi temperaturowymi na resztach modelu średnich typowych przebiegów	371,1	1,39%
M6A	Model 2-st. autoregresji liniowej drugiego rzędu na resztach modelu M6 regresji ze 107 zmiennymi objaśniającymi	1282,6	1,65%
S4	Sieć neuronowa o architekturze 54-27-1	-5440,5	2,27%

Na rys. 3-5 zaprezentowano przebieg wartości rzeczywistych i prognozowanych zużycia energii dla poszczególnych modeli w przykładowym okresie.

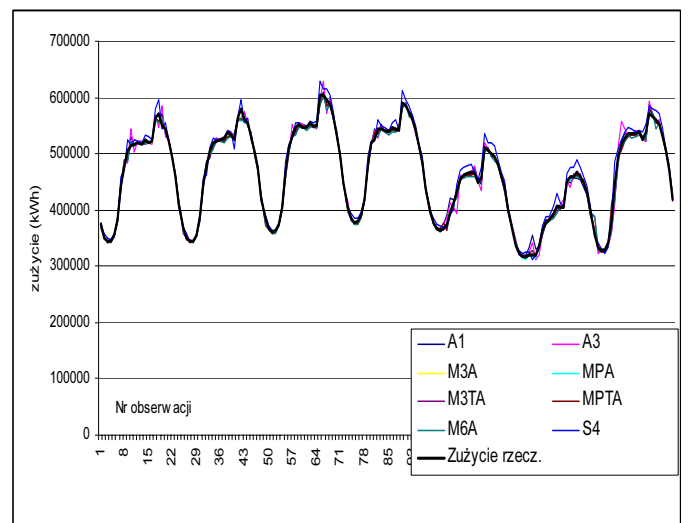


Rys. 3. Wykres wartości rzeczywistych i prognozowanych w tygodniu 11-17 grudnia 2001 r. dla wszystkich modeli, za pomocą których wykonano prognozy na 11 miesięcy.

W grupie prognoz na okres jedenastu miesięcy średni błąd prognozy nie przekraczał sześciu procent dla trzech modeli, wykonanych różnymi metodami. Najlepsze wyniki uzyskano dla modelu typowych przebiegów MP, charakteryzującego się dużą liczbą parametrów i liniową strukturą. Nieznacznie gorszą wartość średniego błędu (o 0,21 punktu procentowego) uzyskano przy pomocy znacznie prostszego w konstrukcji modelu regresji liniowej M3. Najprostszą reprezentację informacji wejściowych spośród trzech najlepszych modeli w tej grupie miała nieliniowa sztuczna sieć neuronowa S1. Wyniki uzyskane dla wymienionych modeli można uznać za porównywalne.



Rys. 4. Wykres wartości rzeczywistych i prognozowanych w tygodniu 11-17 grudnia 2001 r. dla wszystkich modeli, za pomocą których wykonano prognozy na jedną dobę.



Rys. 5. Wykres wartości rzeczywistych i prognozowanych w tygodniu 11-17 grudnia 2001 r. dla wszystkich modeli, za pomocą których wykonano prognozy na jedną godzinę.

W grupie modeli użytych do prognoz o horyzoncie doby najlepsze wyniki uzyskano dla modeli ze zmiennymi opóźnionymi o dobę i więcej. Dla modelu regresji liniowej M6 oraz sztucznej sieci neuronowej S3 średni błąd prognozy wynosił nieco ponad cztery procent. Modele te charakteryzowały się różnym rozkładem wielkości błędów prognoz w czasie. W praktycznych zastosowaniach warto wykorzystywać wyniki uzyskane za pomocą obu metod, gdyż zwiększa to zaufanie do prognoz.

Prognozy o horyzoncie jednej godziny charakteryzowały się w większości małą wartością błędów. Dla sześciu prognoz średni błąd nie przekraczał dwóch procent. Najlepsze wyniki uzyskano dla modeli kilkustopniowych (M3A, MPA, M3TA, MPTA), w których reszty opisowych modeli liniowych były poddawane modelowaniu w procesie ARMA. Średni błąd prognozy w tych przypadkach wynosił około 1,4%. W tej grupie dla sztucznej sieci neuronowej uzyskano nieco gorsze rezultaty niż dla modeli wielostopniowych.

Rys. 3-5 obrazują coraz lepsze dopasowanie prognoz do wartości rzeczywistych szeregu zapotrzebowania w miarę skracania horyzontu prognozy. Na rysunkach można zaobserwować charakterystyczny cykl dobowy zużycia energii, a także mniejsze zużycie w ciągu dwóch dni wolnych od pracy.

8 PODSUMOWANIE

W pracy zaprezentowano wyniki badań dotyczące modelowania i prognozowania popytu na energię elektryczną z punktu widzenia rynku regionalnego. Podjęto próbę wykazania, że wybrane metody ilościowe mogą stanowić efektywny instrument krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną.

W wyniku analizy sytuacji sektora elektroenergetycznego w Polsce i jego ram prawnych stwierdzono, że w nowej sytuacji gospodarczej prognozowanie zapotrzebowania na energię dla różnych horyzontów czasowych stanowi ważny problem. Jego rozwiązanie może w istotny sposób wpływać na sytuację ekonomiczną przedsiębiorstw działających w sektorze elektroenergetycznym.

Dokonując przeglądu literaturowego badań dotyczących prognozowania wielkości charakteryzujących sektor elektroenergetyczny, zauwa-

żono, że wiele ośrodków badawczych jest żywo zainteresowanych tą problematyką. Prowadzone są poszukiwania jak najlepszych metod prognozowania, zwłaszcza dla krótkich horyzontów czasowych.

W badaniach empirycznych zbudowano wiele modeli zapotrzebowania na energię elektryczną dla aglomeracji łódzkiej. Dla skonstruowanych modeli przeprowadzono ich ocenę na podstawie badania istotności ich parametrów oraz analizy reszt. Wyniki modelowania uznano za zadowalające, mimo że nie wszystkie parametry oceny reszt były poprawne. Dla wybranych modeli skonstruowano prognozy dla trzech horyzontów czasowych. Przeanalizowano średnie i maksymalne błędy prognoz, zbadano średnie wartości błędów dla poszczególnych miesięcy oraz dokonano oceny prognoz. Stwierdzono, że niektóre modele mogą być zastosowane do prognoz zapotrzebowania o horyzoncie od godziny do kilku miesięcy. Prognozy generowane przez te modele mają zadowalającą dokładność i mogą być stosowane dla odpowiedniego horyzontu czasowego.

W badaniach realizowanych w pracy udało się rozwinąć i rozwiązać pewne kwestie, spośród których warto wymienić:

- charakterystykę szeregu zapotrzebowania w czasie i analizę czynników (zmiennych), które wpływają najsilniej na badane zjawisko,
- analizę sposobu przedstawienia zmiennych objaśniających najbardziej adekwatnego do opisu modelowanego zjawiska,
- wyodrębnienie postaci modelu jak najlepiej odwzorowującej badany szereg i generującej najdokładniejsze prognozy dla danego horyzontu,
- przegląd i porównanie metod stosowanych dotychczas w omawianym zakresie,
- ustosunkowanie się do problemu, czy istnieje jedna uniwersalna postać modelu prognozującego popyt na energię elektryczną dla różnych horyzontów czasowych, czy też do każdego horyzontu trzeba stosować innego rodzaju modele,
- analizę problemu wykorzystania jednej metody prognozowania dla danego horyzontu czasowego lub też porównywania wyników uzyskanych różnymi metodami.

W wyniku przeprowadzonych badań nie znaleziono jednego modelu uniwersalnego, który mógłby być wykorzystywany do prognoz dla

różnych horyzontów czasowych. Można natomiast, na podstawie danych znanych z wyprzedzeniem doby lub godziny, prognozować wartości reszt modeli, których zmienne objaśniające (i wstępne prognozy) były znane znacznie wcześniej, tak jak to miało miejsce np. w przypadku modeli M3A i MPA. Wart podkreślenia jest także fakt, że średnie błędy prognoz były na poziomie porównywalnym do średnich błędów dopasowania dla okresu estymacji parametrów modeli. Uzyskane wyniki potwierdzają tezę o możliwości stosowania wybranych metod statystycznych oraz sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną w krótkim horyzoncie czasowym.

9 KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

W badaniach zaprezentowanych w rozprawie ujęto niektóre z problemów prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Potrzebne są dalsze prace w tym kierunku. Wśród zagadnień wartych podjęcia w przyszłych badaniach można wymienić:

- skonstruowanie modeli, w których pory roku nie będą reprezentowane przez zmienne skokowe; cechą wspólną modeli użytych w rozprawie (ze zmiennymi objaśniającymi) jest traktowanie każdego miesiąca jako jednorodnego, podczas gdy w ciągu miesiąca (zwłaszcza w porach przejściowych, tzn. wiosną i jesienią) także następują pewne zmiany w średnim dobowym poziomie zużycia energii elektrycznej,
- zbadanie możliwości wykorzystania do modelowania popytu na energię innych metod, np. algorytmów genetycznych do modelowania kształtów krzywych przebiegów dobowych,
- podjęcie problematyki oceny ryzyka finansowego w prognozowaniu zapotrzebowania na energię elektryczną i prognozowanie zgodne z zasadą minimalizacji straty,
- analizę zapotrzebowania na energię elektryczną w podziale na różne grupy odbiorców: indywidualnych, instytucje, zakłady przemysłowe itp.

Należy mieć nadzieję, że wnioski uzyskane w tej i innych pracach odnoszących się do metod prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną przyczynią się do lepszego funkcyj-

nowania przedsiębiorstw energetycznych. Nawet jeżeli szczegóły dotyczące reformy sektora elektroenergetycznego w Polsce ulegną zmianom, niewątpliwa jest potrzeba usprawnienia funkcjonowania firm działających w tym dziale gospodarki. Należy się spodziewać, że korzystanie z nowoczesnych narzędzi wspomagających podejmowanie decyzji, w tym narzędzi prognostycznych, jest dla tych przedsiębiorstw koniecznością, niezależnie od szczegółowego przebiegu reformy sektora elektroenergetycznego.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Bojarski W. (red.) 1998. *Rynek odbiorcy energii*. Warszawa: Badania systemowe „EnerSys” Sp. z o. o.
- 2) Coyle J. J., Bardi E. J., Langley C. J. Jr. 2002. *Zarządzanie logistyczne*. Warszawa: PWE.
- 3) *Dwie koncepcje – jedna energetyka*. 2002 (data publikacji 21 kwietnia). Komentarz zamieszczony w serwisie Centrum Informacji o Rynku Energii: www.cire.pl/TT.
- 4) Górecka (obecnie Szmit) A. 1999. Rynek polskiej energetyki w obliczu integracji z Unią Europejską. W: J. Lewandowski (red.), *Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Zarządzanie Organizacjami Gospodarczymi”*. Łódź, s. 133-143.
- 5) Górecka A., Kosyk A., Szmit M. 2000. *Forecasts of Demand for Electric Energy: Time Series Models*. Referat wygłoszony na International Atlantic Economic Conference. Monachium (maszynopis).
- 6) Górecka A., Szadkowska D., Witkowska D. 1999. Modelowanie i prognozowanie szeregów czasowych dużej częstotliwości na podstawie zapotrzebowania na energię elektryczną. W: J. Lewandowski (red.), *Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Zarządzanie Organizacjami Gospodarczymi”*. Łódź, s. 145-149.
- 7) Kotler P. 1994. *Marketing. Analiza, planowanie, wdrażanie i kontrola*. Warszawa: Wydawnictwo Gebethner i Spółka.
- 8) Malko J. 1995. *Wybrane zagadnienia prognozowania w elektroenergetyce*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej..
- 9) Malko J. 1998. Restrukturyzacja elektroenergetyki i zadania prognozowania – doświadczenia amerykańskie. *Materiały IV Konferencji Naukowej „Prognozowanie w elektroenergetyce”*. Częstochowa: Politechnika Częstochowska, s. 7-14.
- 10) Marzecki J. 2001. *Rozdzielcze sieci elektroenergetyczne*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- 11) *Model rynku energii elektrycznej w Polsce – synteza*. 1998 (14 października) dokument przyjęty przez Zespół KERM ds. Sektora Elektroenergetycznego w Polsce.
- 12) Nickels W. G. 1995. *Zrozumieć biznes*. Warszawa: Wydawnictwo Bellona.
- 13) *Prawo energetyczne – właściwe zmiany jesienią*. 2002 (data publikacji 17 kwietnia). Komentarz zamieszczony w serwisie Centrum Informacji o Rynku Energii: www.cire.pl/TT.
- 14) Steinmann H., Schreyögg. 2001. *Zarządzanie. Podstawy kierowania przedsiębiorstwem. Koncepcje, funkcje, przykłady*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

- 15) Szmit A. 2001. Prognozowanie mocy wykorzystanej prądu elektrycznego – badanie jakości wybranych modeli. *Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Prognozowanie w zarządzaniu firmą”*, Wrocław-Kudowa Zdrój.
- 16) Szmit A. 2002. *Comparison of Models for Forecasting of Demand for Electric Energy*. Referat wygłoszony na International Atlantic Economic Conference. Paryż (maszynopis).
- 17) Witkowska D., Górecka A. 2000. Metody wyznaczania prognoz w sektorze energetycznym. *Materiały VII Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Zarządzanie organizacjami gospodarczymi w warunkach globalizacji”*. Łódź, s. 556-566.
- 18) Zeliaś A. 1997. *Teoria prognozy*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.