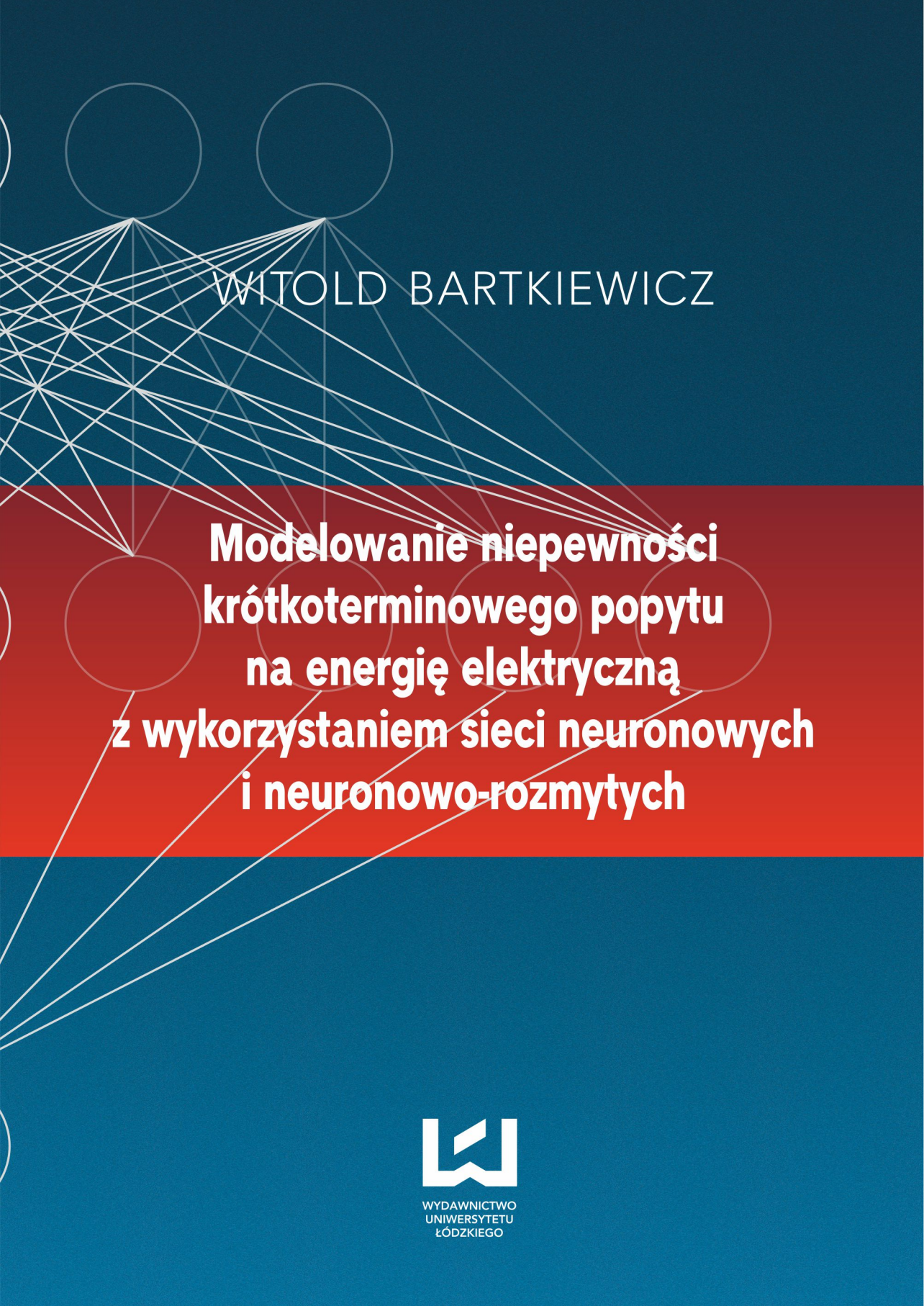




WITOLD BARTKIEWICZ

**Modelowanie niepewności  
krótkoterminowego popytu  
na energię elektryczną  
z wykorzystaniem sieci neuronowych  
i neuronowo-rozmytych**



WYDAWNICTWO  
UNIwersytetu  
ŁÓDZKIEGO

**Modelowanie niepewności  
krótkoterminowego popytu  
na energię elektryczną  
z wykorzystaniem sieci neuronowych  
i neuronowo-rozmytych**



[Kup książkę](#)

WITOLD BARTKIEWICZ

**Modelowanie niepewności  
krótkoterminowego popytu  
na energię elektryczną  
z wykorzystaniem sieci neuronowych  
i neuronowo-rozmytych**



WYDAWNICTWO  
UNIwersYTETU  
ŁÓDZKIEGO

ŁÓDŹ 2013

[Kup książkę](#)

Witold Bartkiewicz – Katedra Informatyki, Wydział Zarządzania  
Uniwersytet Łódzki, 90-237 Łódź, ul. Matejki nr 22/26  
e-mail: wbartkiewicz@wzmail.uni.lodz.pl

RECENZENT

*Gabriela Idzikowska*

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

*Urszula Dzieciatkowska*

SKŁAD I ŁAMANIE

*Leonora Wojciechowska*

PROJEKT OKŁADKI

*Barbara Grzejszczak*

© Copyright by Uniwersytet Łódzki, Łódź 2013

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego  
Wydanie I. W.06235.13.0.H

ISBN (wersja drukowana) 978-83-7525-926-1  
ISBN (ebook) 978-83-7969-154-8

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego  
90-131 Łódź, Lindleya 8  
www.wydawnictwo.uni.lodz.pl  
e-mail: ksiegarnia@uni.lodz.pl  
tel. (42) 665 58 63, faks (42) 665 58 62

[Kup książkę](#)

# Spis treści

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Wstęp .....                                                                                                                     | 9   |
| Rozdział 1. Rynek energii elektrycznej .....                                                                                    | 17  |
| 1.1. Ogólna charakterystyka procesu handlu energią elektryczną .....                                                            | 17  |
| 1.1.1. Energia – przeszłość, teraźniejszość i przyszłość .....                                                                  | 17  |
| 1.1.2. Cechy charakterystyczne energii elektrycznej jako towaru .....                                                           | 19  |
| 1.1.3. Uwarunkowania strukturalne elektroenergetyki .....                                                                       | 30  |
| 1.2. Mechanizmy ustalania równowagi popytowo-cenowej na chwilowym rynku energii elektrycznej .....                              | 40  |
| 1.2.1. Struktura konkurencyjnego rynku energii elektrycznej .....                                                               | 40  |
| 1.2.2. Kontrakty dwustronne .....                                                                                               | 51  |
| 1.2.3. Giełda energii .....                                                                                                     | 65  |
| 1.2.3.1. Ogólna charakterystyka .....                                                                                           | 65  |
| 1.2.3.2. Struktura rynku giełdowego – Towarowa Giełda Energii SA w Warszawie .....                                              | 66  |
| 1.2.3.3. Rynek dnia następnego (RDN) TGE SA .....                                                                               | 70  |
| 1.2.3.4. Rynek dnia bieżącego (RDB) TGE SA .....                                                                                | 82  |
| 1.2.3.5. Platforma POEE – rynek energii Giełdy Papierów Wartościowych .....                                                     | 84  |
| 1.2.4. Rynek bilansujący .....                                                                                                  | 87  |
| 1.2.4.1. Funkcje i struktura polskiego rynku bilansującego .....                                                                | 87  |
| 1.2.4.2. Określanie pozycji kontraktowych na rynku bilansującym .....                                                           | 97  |
| 1.2.4.3. Zgłoszenia ofert bilansujących .....                                                                                   | 102 |
| 1.2.4.4. Ustalanie równowagi rynku i rozliczenia .....                                                                          | 107 |
| 1.3. Podsumowanie .....                                                                                                         | 112 |
| Rozdział 2. Metody neuronowe i neuronowo-rozmyte w prognozowaniu krótkoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną ..... | 115 |
| 2.1. Modelowanie procesu zapotrzebowania na energię .....                                                                       | 116 |
| 2.1.1. Proces modelowania .....                                                                                                 | 116 |
| 2.1.2. Charakterystyka procesu zapotrzebowania na energię .....                                                                 | 118 |
| 2.2. Prognozowanie zapotrzebowania na energię z wykorzystaniem modeli neuronowych .....                                         | 122 |
| 2.2.1. Sztuczne sieci neuronowe .....                                                                                           | 122 |
| 2.2.2. Warstwowe sieci perceptronowe .....                                                                                      | 124 |
| 2.2.3. Prognozowanie dobowego zapotrzebowania na energię z wyprzedzeniem jednodniowym przy wykorzystaniu sieci MLP .....        | 127 |
| 2.2.4. Prognozowanie godzinnego zapotrzebowania na energię z dwudniowym wyprzedzeniem czasowym .....                            | 132 |
| 2.2.5. Modelowanie dni nietypowych z wykorzystaniem podejścia neuronowo-heurystycznego .....                                    | 135 |
| 2.2.6. Prognozy adaptacyjne z wykorzystaniem hybrydowego modelu opartego na sieci MLP i sieci Kohonena .....                    | 140 |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.7. Prognozy zapotrzebowania na energię z wykorzystaniem lokalnych modeli MLP .....                                          | 144 |
| 2.3. Prognozowanie zapotrzebowania na energię z wykorzystaniem modeli neuronowo-rozmytych .....                                 | 146 |
| 2.3.1. Lingwistyczne systemy z logiką rozmytą (MISO) .....                                                                      | 146 |
| 2.3.2. Prognozowanie zapotrzebowania na energię z wykorzystaniem sieci neuronowo-rozmytych typu FBF .....                       | 149 |
| 2.3.3. Systemy z logiką rozmytą typu Takagi–Sugeno .....                                                                        | 155 |
| 2.3.4. Prognozowanie zapotrzebowania na energię z wykorzystaniem systemów Takagi–Sugeno z liniowymi następnikami reguł .....    | 157 |
| 2.3.5. Prognozowanie zapotrzebowania na energię z wykorzystaniem systemów Takagi–Sugeno z nieliniowymi następnikami reguł ..... | 163 |
| 2.4. Podsumowanie .....                                                                                                         | 168 |
| Rozdział 3. Modelowanie niepewności neuronowych i neuronowo-rozmytych prognoz zapotrzebowania na energię .....                  | 171 |
| 3.1. Błąd kwadratowy i interpretacja modelu prognostycznego .....                                                               | 172 |
| 3.1.1. Wyjście nieliniowego modelu prognostycznego .....                                                                        | 172 |
| 3.1.2. Źródła niepewności modeli neuronowych i neuronowo-rozmytych .....                                                        | 177 |
| 3.1.3. Wymienność między obciążeniem i wariancją .....                                                                          | 182 |
| 3.2. Charakterystyka rozkładu prognozy .....                                                                                    | 186 |
| 3.2.1. Warunkowy rozkład prawdopodobieństwa prognozowanego zjawiska .....                                                       | 186 |
| 3.2.2. Przedziały prognozy .....                                                                                                | 188 |
| 3.2.3. Nieparametryczne i parametryczne podejście do oszacowania rozkładu prognozy .....                                        | 190 |
| 3.2.4. Określanie rozkładu warunkowego prognozy dla modeli regresji liniowej .....                                              | 197 |
| 3.3. Wyznaczanie wariancji prognozy wynikającej z niepewności parametrów modelu neuronowego (neuronowo-rozmytego) .....         | 211 |
| 3.3.1. Podejścia do szacowania wariancji wyjściowej modelu z parametrów w przypadku nieliniowym .....                           | 211 |
| 3.3.2. Metoda delta .....                                                                                                       | 213 |
| 3.3.3. Oszacowanie kanapkowe .....                                                                                              | 232 |
| 3.3.4. Oszacowanie wariancji prognozy z wykorzystaniem bootstrapu .....                                                         | 236 |
| 3.4. Modelowanie wariancji prognozy wynikającej z błędu losowego .....                                                          | 247 |
| 3.4.1. Błąd losowy i błąd prognozy .....                                                                                        | 247 |
| 3.4.2. Czynniki losowe o stałym odchyleniu standardowym .....                                                                   | 249 |
| 3.4.3. Czynniki losowe o zmiennym odchyleniu standardowym .....                                                                 | 257 |
| 3.5. Modelowanie niepewności wejść .....                                                                                        | 261 |
| 3.5.1. Prognozowanie w warunkach szumu wejściowego .....                                                                        | 261 |
| 3.5.2. Oszacowania oparte na lokalnej linearyzacji modelu .....                                                                 | 268 |
| 3.5.3. Wyznaczanie prognozy w warunkach niepewności wejść przy użyciu metod opartych na próbkowaniu Monte Carlo .....           | 274 |
| 3.5.4. Aproksymacja gęstości prawdopodobieństwa niepewności wejść modelu .....                                                  | 285 |
| 3.5.5. Uprozczone rozwiązania dla przypadków szczególnych .....                                                                 | 291 |
| 3.6. Podsumowanie .....                                                                                                         | 294 |
| Rozdział 4. Prognozy zapotrzebowania na energię i ryzyko decyzji .....                                                          | 297 |
| 4.1. Ogólna charakterystyka procesu podejmowania decyzji .....                                                                  | 298 |
| 4.2. Prognozy i decyzje .....                                                                                                   | 302 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.1. Prognozy zapotrzebowania na energię jako dyskretne zmienne losowe .....                                                              | 303 |
| 4.2.2. Prognozy zapotrzebowania na energię jako ciągle zmienne losowe .....                                                                 | 325 |
| 4.3. Planowanie optymalnej wielkości zakupu w warunkach nierównowagi kosztów nadmiaru i niedoboru energii .....                             | 337 |
| 4.3.1. Optymalizacja wielkości zakupu przy ograniczonej trwałości towaru w warunkach ryzyka popytowego – klasyczny problem gazeciarza ..... | 337 |
| 4.3.2. Optymalna wielkość zakupu energii elektrycznej na rynku w warunkach ryzyka popytowego .....                                          | 350 |
| 4.3.3. Optymalna alokacja zakupionej energii na większą liczbę niepewnych popytów .....                                                     | 364 |
| 4.4. Podsumowanie.....                                                                                                                      | 389 |
| Zakończenie .....                                                                                                                           | 391 |
| Załącznik 1. Ważniejsze gradienty i hesjany związane z warstwową siecią perceptronową MLP.....                                              | 395 |
| Z1.1. Wyznaczanie gradientu błędu sieci MLP względem wag dla danego wzorca treningowego.....                                                | 395 |
| Z1.2. Wyznaczanie hesjanu błędu sieci MLP względem wag .....                                                                                | 399 |
| Z1.3. Wyznaczanie pochodnych wyjścia sieci MLP względem wag, dla danego wejścia ...                                                         | 409 |
| Z1.4. Wyznaczanie pochodnych wyjścia sieci MLP względem zmiennych wejściowych...                                                            | 411 |
| Załącznik 2. Ważniejsze gradienty i hesjany związane z siecią neuronowo-rozmytą FBF .....                                                   | 414 |
| Z2.1. Wyznaczanie gradientu błędu sieci FBF względem wag, dla danego wzorca treningowego.....                                               | 414 |
| Z2.2. Wyznaczanie hesjanu błędu kwadratowego sieci FBF względem wag .....                                                                   | 419 |
| Z2.3. Wyznaczanie gradientu wyjścia sieci FBF względem wag, dla danego wejścia .....                                                        | 431 |
| Z2.4. Wyznaczanie pochodnych wyjścia sieci FBF względem zmiennych wejściowych....                                                           | 433 |
| Załącznik 3. Ważniejsze gradienty i hesjany związane z siecią neuronowo-rozmytą typu Takagi–Sugeno z liniowymi następnikami reguł .....     | 436 |
| Z3.1. Wyznaczanie gradientu w przestrzeni wag dla błędu sieci neuronowo-rozmytej typu Takagi–Sugeno, przy danym wzorcu treningowym .....    | 436 |
| Z3.2. Wyznaczanie hesjanu błędu kwadratowego sieci neuronowo-rozmytej typu Takagi–Sugeno względem wag .....                                 | 440 |
| Z3.3. Wyznaczanie gradientu wyjścia sieci neuronowo-rozmytej typu Takagi–Sugeno, dla danego wejścia .....                                   | 450 |
| Z3.4. Wyznaczanie pochodnych wyjścia sieci neuronowo-rozmytej typu Takagi–Sugeno względem zmiennych wejściowych.....                        | 451 |
| Literatura.....                                                                                                                             | 455 |
| Spis rysunków i tabel .....                                                                                                                 | 463 |
| Od Redakcji .....                                                                                                                           | 467 |



# Wstęp

Rozwój mechanizmów konkurencyjnego rynku energii elektrycznej w Polsce stawia przed przedsiębiorstwami elektroenergetycznymi poważne wyzwania biznesowe. Skuteczne funkcjonowanie w tej dziedzinie gospodarki wymaga uwzględnienia wielu czynników ryzyka, wynikających w dużej mierze z niepewności rynkowej, szczególnie dotkliwej w przypadku obrotu takimi towarami jak energia elektryczna. W związku z tym w działalności rynkowej przedsiębiorstw tego sektora właściwe zarządzanie ryzykiem nabiera kluczowego znaczenia, decydującego wręcz o wyniku finansowym.

Podstawowym elementem każdego systemu zarządzania ryzykiem musi być identyfikacja oraz właściwa ocena generujących je czynników niepewności. Z ryzykiem mamy bowiem do czynienia wyłącznie w sytuacji, w której podejmowane decyzje mogą dać różne skutki, w tym również niepożądane, wiążące się ze stratami lub gorszymi efektami realizowanych działań. Istotne jest przy tym, że zazwyczaj skutki te potrafimy określić jedynie nieprecyzyjnie, np. z dokładnością do prawdopodobieństwa ich występowania. Ryzyko jest więc nieodłącznie związane z niepewnością. Jeżeli efekty decyzji są pewne, ryzyko nie występuje. Możliwość modelowania niepewności, określania prawdopodobieństw niepewnych zjawisk, które wpływają na skutki podejmowanych działań, pozwalają zatem włączać ryzyko w proces podejmowania decyzji czy też zabezpieczać się przed jego efektami.

Cechy charakterystyczne energii elektrycznej jako towaru, takie jak brak praktycznych możliwości jej magazynowania na poważniejszą skalę, konieczność nieustannego równoważenia wytwarzania i odbioru energii, powodują występowanie na rynkach energii szybkich zmian cen oraz zapotrzebowania. Niepewność popytowa stanowi więc jeden z podstawowych czynników wpływających na powstawanie ryzyka działania przedsiębiorstwa energetycznego. Rynek energii zdominowany jest w znacznej mierze przez kontrakty terminowe o średnich i dłuższych okresach realizacji, które zastąpiły w dużej części dawne kontrakty dwustronne. Rozwój takich segmentów, jak rynek giełdowy czy też rynek bilansujący oraz wzrost konkurencji w obrębie sektora wywołują jednak pewne przesunięcie działań handlowych w kierunku transakcji o horyzontach krótkoterminowych. Wyraźnie widoczny jest zwłaszcza rozwój rynków dnia następnego. Oferują one przedsiębiorstwu większą elastyczność działania,

skutkują jednak m.in. znaczniejszą ekspozycją na ryzyko wynikające z niepewności popytowej.

Dążenie do redukcji tej niepewności jest jednym z głównych powodów usilnego poszukiwania jak najdokładniejszych metod krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Zmniejszenie błędu w oszacowaniu popytu nawet o ułamek procenta przekłada się bowiem na wymierną kwotę w wynikach finansowych przedsiębiorstwa energetycznego. Zaawansowane metody modelowania danych stanowią obecnie standardowy element systemów prognozowania zapotrzebowania odbiorców na rynku energii. Wśród nich do powszechnie wykorzystywanych należą metody oparte na sieciach neuronowych i neuronowo-rozmytych.

Nieustanna pogoń za poprawianiem dokładności prognozy powoduje koncentrację wysiłków badawczych na prognozach punktowych, na uzyskiwaniu coraz lepszego oszacowania wartości oczekiwanej procesu zapotrzebowania na energię. Jest to, oczywiście, w znacznej mierze postępowanie uzasadnione. Pomija się jednak przy tym często fakt, że z punktu widzenia procesu decyzyjnego, znajomość wyłącznie wartości oczekiwanej zapotrzebowania na energię w wielu przypadkach może być niewystarczająca. Najlepsza bowiem nawet prognoza stanowi jedynie oszacowanie, obarczone niepewnością. Kwestia modelowania tej niepewności, określenia rozkładu prawdopodobieństwa prognozy dla danego wzorca wejściowego, jest często zaniedbywana, a przecież stanowi ona podstawowy element oszacowania ryzyka działań i decyzji opierających się na sporządzonej prognozie.

W niniejszej pracy próbujemy uzupełnić tę lukę, badając zaprezentowaną problematykę. Podstawowa teza, jaką stawiamy, brzmi:

**Współczesne realia funkcjonowania rynku energii elektrycznej spowodowały, że zaawansowane metody modelowania, takie jak sieci neuronowe i neuronowo-rozmyte, weszły do standardowego zestawu narzędzi stosowanych w procesie krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię. Obok prognoz wartości oczekiwanej popytu odbiorców, ocena ryzyka decyzji opierających się na tych prognozach i włączenie tego ryzyka w proces podejmowania decyzji wymagają zastosowania metod modelowania niepewności prognozowanego zapotrzebowania, w postaci oszacowania rozkładu warunkowego prognozy dla danego wzorca wejściowego.**

Pamiętajmy również, że sieci neuronowe i neuronowo-rozmyte należą do indukcyjnych modeli nieliniowych o bogatej strukturze aproksymacyjnej. Dla tego rodzaju narzędzi nie ma prostych metod szacowania warunkowej wariancji wyjściowej modelu, przy danym wejściu. Stosowane są tu podejścia empiryczne lub podejścia analityczne o przybliżonym charakterze, wymagającym również weryfikacji empirycznej w każdym konkretnym przypadku zastosowań. Istotnym problemem może być więc stosowalność określonych algorytmów

w zadaniu krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną.

Przeprowadzone badania pozwalają na postawienie w prezentowanej pracy dodatkowej pomocniczej hipotezy badawczej dotyczącej tego zagadnienia:

**Badane metody szacowania warunkowej wariancji wyjściowej, dla danego wzorca wejściowego, stanowią odpowiednie narzędzia, które mogą być rozważane przy modelowaniu niepewności krótkoterminowych prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną, w przypadku zastosowania analizowanych w pracy neuronowych i neuronowo-rozmytych metod prognozowania.**

Presja na poprawę dokładności krótkoterminowych prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną spowodowała, że niemal od razu po wprowadzeniu, w drugiej połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku, algorytmu wstecznej propagacji błędu i opracowaniu modelu wielowarstwowej sieci perceptronowej (MLP), sieć ta znalazła swoje zastosowanie również i w tych zagadnieniach. Przełom lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX w. to prawdziwa eksplozja zastosowań sztucznych sieci neuronowych w prognozowaniu w elektroenergetyce. Wymienić można tutaj choćby takie prace, jak: Peng, Hubele, Karady 1990; Dillon, Sestito, Leung 1991; El-Sharkawi, Oh, Marks, Damborg, Brace 1991; Lee, Cha, Ku 1991; Srinivasan, Liew, Chen 1991; Park, El-Sharkawi, Marks, Atlas, Damborg 1991. Te pierwsze zastosowania związane były przede wszystkim z wykorzystaniem do krótkoterminowej predykcji zapotrzebowania na energię nieliniowych właściwości sieci MLP, pozwalających na lepsze modelowanie zależności procesu zapotrzebowania od czynników pogodowych. Stosunkowo proste modele neuronowe działały z co najmniej porównywalną, a zazwyczaj lepszą, dokładnością niż złożone i wyrafinowane komercyjne systemy prognostyczne.

Na połowę lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku datuje się również pierwsze zastosowania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na energię w polskich systemach elektroenergetycznych. Wymienić można tu dla przykładu takie prace, jak: Heine, Malko, Mikołajczak, Skorupski 1994; Malko, Mikołajczak, Skorupski 1995; Nazarko, Jurczuk 1996, w tym również prace prowadzone i współprowadzone przez autora niniejszej rozprawy: Bardzki, Bartkiewicz 1995; Bardzki, Bartkiewicz, Zieliński 1995.

Niemal od początku szukano jednak dalszej poprawy dokładności prognoz i efektywności działania modelu na drodze korekt w algorytmie uczenia sieci neuronowej (np. Ho, Hsu, Yang 1992) czy też drobnych modyfikacji architektury modelu, takich jak, dla przykładu, uproszczenie struktury połączeń między węzłami (Chen, Yu, Moghaddamjo 1992).

Istotnym kierunkiem poszukiwań lepszych prognoz krótkoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną jest hybrydyzacja modelu poprzez

połączenie metod prognozowania o różnych właściwościach, tak by wyeliminować słabe strony każdej z nich. Koronnym przykładem systemów hybrydowych są oczywiście sieci neuronowo-rozmyte; tym zagadnieniem zajmiemy się nieco dalej. Możliwości hybrydyzacji sieci neuronowych z innymi technikami prognostycznymi jest jednak wiele. Do najważniejszych kierunków zaliczyć tutaj możemy: podział modelu prognostycznego na grupę modeli o charakterze lokalnym, działających w obrębie bardziej jednorodnych segmentów danych; łączenie sieci neuronowych z dedukcyjnymi technikami analizy danych, co pozwala wykorzystać w pewnej części właściwości klasycznego wnioskowania statystycznego; łączenie sieci neuronowych z systemami ekspertowymi czy też ogólniej – systemami opartymi na wiedzy.

Pierwsze prace nad tworzeniem modeli lokalnych związane były z wykorzystaniem sieci Kohonena, czy też innych technik nienadzorowanego grupowania danych, do podziału całego zbioru obserwacji historycznych na bardziej jednorodne segmenty. Dla przykładu, Hsu, Yang (1991a, b) sieć Kohonena wykorzystują do wstępnej klasyfikacji dni o podobnych wzorcach dobowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Profil danej grupy stanowi dalej wzorzec wejściowy dla prognozy MLP. Podobne podejście prezentowane jest również w innych pracach: Erkmen, Ozsokmen 1993; Bardzki, Bartkiewicz 1995. W bardziej rozwiniętej postaci mamy w tym podejściu do czynienia z grupą lokalnych predyktorów, których działanie scalane jest w jedną wspólną prognozę (np. Drezga, Rahman 1999).

Hybrydyzacja sieci neuronowych z klasycznymi technikami analizy danych związana jest z podziałem modelu prognostycznego na część indukcyjną, w której wykorzystuje się sieć neuronową, oraz część dedukcyjną, co do której istniejąca wiedza umożliwia poczynienie pewnych założeń pozwalających na stosowanie klasycznych, bardziej efektywnych i prostszych w implementacji modeli wnioskowania statystycznego. Przykładem może być tu rozdział modelu na część autoregresyjną oraz zależną od danych meteorologicznych (Peng, Hubele, Karady 1992; Taylor 2012) czy też wykorzystanie metod analizy szeregów czasowych do badania reszt modelu (Wang, Xia, Kang 2011). Innym przykładem jest z kolei łączenie sieci neuronowych z metodami analizy częstotliwościowej i filtrowania, takimi jak np. analiza falkowa (np. Huang, Yang 2001; Pandey, Singh, Sinha 2010).

Hybrydy sieci neuronowych z klasycznymi systemami opartymi na wiedzy związane są przede wszystkim z próbą uwzględnienia ingerencji w model predykcji doświadczonego operatora dokonującego korekt prognozy zapotrzebowania na energię na podstawie jakościowych czynników pogodowych czy też informacji o niespodziewanych zdarzeniach wpływających na poziom zapotrzebowania. Za przykład posłużyć tu może połączenie sieci neuronowej z systemem ekspertowym (Rahman, Hazim 1993) albo drzewem decyzyjnym (Rahman, Drezga, Rajagopalan 1993). Innym rozwiązaniem, które można zaliczyć do tej

grupy, jest tworzenie modeli dla różnych typów dni, z wykorzystaniem reguł heurystycznych odpowiedniego doboru wejść (Bardzki, Bartkiewicz, Gontar, Zieliński 1998; Bartkiewicz, Gontar, Zieliński, Bardzki 2000a, b).

W początkowym okresie zastosowań sieci neuronowych w zadaniach krótkoterminowego prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną stosowano głównie wielowarstwowe sieci perceptronowe (MLP). Inne architektury wykorzystywane były epizodycznie bądź miały charakter pomocniczy w systemach hybrydowych. Stopniowo jednak, obok modelu MLP, duże znaczenie w dyskutowanych zagadnieniach zaczęły zyskiwać sieci z funkcjami o bazie radialnej (RBF) (np. Ranaweera, Hubele, Papalexopoulos 1995; Gontar, Hatzigiorgiou 2001; Gontar, Sideratos, Hatzigiorgiou 2004; Zhang, Zhou, Sun, Lei, Liu, Song 2008). W niniejszej pracy nie omawiamy, co prawda, odrębnie sieci RBF, jednakże jeden z analizowanych modeli neuronowo-rozmytych (FBF) ma strukturę bardzo do nich zbliżoną i można wykazać funkcjonalną równoważność tych dwu podejść (Jang, Sun 1993).

Najbardziej produktywną chyba metodą hybrydyzacji sieci neuronowych jest ich łączenie z systemami z logiką rozmytą. Architektury neuronowo-rozmyte zaczęły pojawiać się w zadaniach krótkoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię niemal równocześnie z modelami neuronowymi. Początkowo miały one charakter luźnych powiązań, na ogół o charakterze sekwencyjnym. Podstawowa prognoza sporządzana była przez sieć neuronową, a następnie korygowana przez system z logiką rozmytą, zazwyczaj na bazie informacji pogodowej. Możliwa była odwrotna kolejność, tj. model rozmyty analizował dane pogodowe, tworząc wejścia dla sieci neuronowej. Przykładowe rozwiązania tego rodzaju prezentowane są w: Lambert-Torres, Traore, Mandole-si, Mukhedkar 1991; Kim, Park, Hwang, Kim 1995; Dash, Dash, Rahman 1993.

Dosyć szybko jednak w interesujących nas zagadnieniach krótkoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną zaczęto stosować modele hybrydowe o ścisłej integracji, nazywane sieciami neuronowo-rozmytymi. Pojęcie to ma dosyć szeroki zakres i obejmuje całą gamę rozwiązań hybrydowych. W praktyce największe znaczenie, przynajmniej w zadaniach prognozy zapotrzebowania na energię, mają sieci neuronowo-rozmyte w formie adaptacyjnych systemów z logiką rozmytą. Podejście to polega na takim ujęciu mechanizmu działania systemu rozmytego, aby parametry definiujące wykorzystywane w nim zbiory rozmyte mogły być uczone na podstawie danych.

Już w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku zaczęto stosować systemy prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną, w których wykorzystuje się sieci neuronowo-rozmyte realizujące tzw. uproszczone wnioskowanie rozmyte (Mori, Kobayashi 1995; Bakirtzis, Theoharis, Kiartzis, Satsios 1995; Bartkiewicz 1998b, c; Bartkiewicz, Zieliński 1998; Mastorocostas, Theoharis, Bakirtzis 1999; Bartkiewicz, Butkevych i inni

2001). Tego rodzaju modele nazywa się często sieciami z funkcjami o bazie rozmytej (FBF).

Wkrótce w zadaniach krótkoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię zaczęto również stosować sieci neuronowo-rozmyte realizujące wnioskowanie rozmyte typu Takagi–Sugeno. W modelach tego rodzaju w następni-  
kach reguł rozmytych występują funkcje zmiennych wejściowych (Wu, Lu 1999; Bartkiewicz 2000d; Bartkiewicz, Butkevych i inni 2001; Zhang, Zhou, Sun, Lei, Liu, Song 2008; Hanmandlu, Chauhan 2011). Sieci, w których wykorzystuje się to podejście, często określane są również jako ANFIS.

Jak widzimy, sieci neuronowe i neuronowo-rozmyte stanowią dobrze już ugruntowane metody prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Wysoka jakość ich działania i skuteczność spowodowały, że większość komercyjnych systemów prognostycznych w interesującej nas dziedzinie korzysta z któregoś z tych rozwiązań jako z podstawowej techniki modelowania danych. Dlatego tematem niniejszej pracy nie jest zastosowanie sieci neuronowych i neuronowo-rozmytych w prognozowaniu zapotrzebowania. Nasz cel polega na przebadaniu problemu modelowania niepewności tych popularnych metod prognostycznych w rozważanych zagadnieniach.

Dotychczasowe badania w dziedzinie modelowania niepewności prognoz krótkoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną koncentrują się głównie na konstrukcji przedziałów prognozy dla sieci neuronowych. Można tu wymienić (obok badań autora) takie prace, jak: Ding 1999; da Silva, Moulin 2000; Khosravi, Nahavandi, Creighton 2010; Petiau 2009. Mają one na ogół wycinkowy charakter, brak jest szerszych opracowań porównawczych. Metody modelowania niepewności wyjścia nieliniowych modeli prognostycznych, takich jak sieci neuronowe i neuronowo-rozmyte, mają przybliżony lub empiryczny charakter i wymagają badań na różnorodnych problemach i zbiorach danych z danej dziedziny. Stąd właśnie wynika znaczenie prezentowanej pracy dla zagadnień krótkoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną. Rozprawa ta wypełnia poważną lukę – przedstawiono w niej szeroki zakres badań porównawczych dla różnych modeli prognostycznych i problemów z tej dziedziny.

By dowieść postawionych w pracy tez, jej zawartość podzielona została na cztery rozdziały.

W rozdziale pierwszym scharakteryzujemy właściwości energii elektrycznej jako towaru – zbadamy jej znaczenie dla funkcjonowania społeczeństwa oraz wskażemy na elementy wpływające na ryzyko popytowe. W dalszej części rozdziału przeanalizujemy konstrukcję rynku energii, omawiając mechanizm działania jego poszczególnych segmentów oraz najważniejsze procedury decyzyjne związane z funkcjonowaniem na nim przedsiębiorstw elektroenergetycznych.

W rozdziale drugim zaprezentujemy szeroki zestaw modeli neuronowych i neuronowo-rozmytych w zastosowaniu do krótkoterminowych prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną. W rozdziale tym przedstawione zostaną wyniki badań wskazujących na wysoką dokładność analizowanych metod w porównaniu z innymi standardowymi technikami prognostycznymi.

Rozdział trzeci poświęcimy przedstawieniu najważniejszych metod określania warunkowego rozkładu prawdopodobieństwa prognozy, przy danym wzorcu wejściowym, dla analizowanych modeli neuronowych i neuronowo-rozmytych. Zaprezentujemy w nim również wyniki badań wykorzystania analizowanych metod w zagadnieniach krótkoterminowej prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną. Uzyskane rozkłady prawdopodobieństwa zweryfikowano empirycznie, by ocenić ich zgodność z obserwowanymi danymi. Jako problem porównawczy wykorzystamy zadanie szacowania przedziałów prognozy na określonych poziomach prawdopodobieństwa.

Ostatni rozdział, czwarty, zawiera przegląd najważniejszych typów problemów decyzyjnych oraz sposobu wykorzystania w nich modeli niepewności zapotrzebowania na energię elektryczną. W rozdziale tym wskażemy na niedostateczny charakter prognoz punktowych, wartości oczekiwanej zapotrzebowania oraz na znaczenie wykorzystania informacji o niepewności prognozy pochodzącej z całości jej rozkładu prawdopodobieństwa.

Na koniec poczynimy jeszcze dwie istotne uwagi dotyczące zakresu niniejszej pracy. Po pierwsze, rynek energii elektrycznej jest systemem, w którym silnie wiążą się ze sobą zagadnienia ekonomiczne oraz techniczne obrotu energią. W rozprawie tej ograniczamy się przede wszystkim do wykorzystania prognoz popytu w problemach ekonomicznych. Aspekty techniczne poruszane są jedynie w takim zakresie, aby pomóc zrozumieć Czytelnikowi pewne zagadnienia funkcjonowania rynku.

Po drugie, problemy prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną mają charakter uniwersalny, z punktu widzenia miejsca ich zastosowań. W rozważanych w prezentowanej pracy zagadnieniach decyzyjnych i wielu elementach charakterystyki rynku koncentrujemy się jednak raczej na punkcie widzenia przedsiębiorstw obrotu energią, czy też ogólnie – odbiorców kupujących energię na rynku hurtowym. Nie rozważamy specyficznych problemów związanych z wytwarzaniem energii, kosztami działania jednostek wytwórczych, ich charakterystykami działania itp.



## ROZDZIAŁ 1

# Rynek energii elektrycznej

Energia elektryczna, z powodu swych cech fizycznych oraz ze względu na znaczenie dla funkcjonowania współczesnego społeczeństwa, stanowi specyficzny towar, wymagający zastosowania specjalnych mechanizmów rynkowych, które zapewnią niezawodność fizycznej realizacji zawieranych umów handlowych. W bieżącym rozdziale analizujemy więc właściwości energii elektrycznej jako towaru, wykazując fundamentalny charakter niepewności popytowej jako źródła ryzyka operacji na rynku energii. Jak pokażemy dalej, nieodłączną cechą obrotu energią elektryczną jest, z jednej strony, konieczność jego ścisłego planowania i ustalania z góry wolumenów obrotu, w formie zawieranych kontraktów handlowych, z drugiej zaś, równie nieodłączna niemożność dokładnej realizacji zawartych umów spowodowana niepewnością zapotrzebowania. Znaczenie tego problemu jest na tyle poważne, że konieczność jego rozwiązania w zasadzie determinuje samą konstrukcję współczesnych rynków energii.

Przedstawiona w rozdziale analiza tych zagadnień pozwoli nam udowodnić elementy tezy pracy wskazujące na znaczenie prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na energię jako mechanizmu redukcji tak istotnego czynnika niepewności popytowej. Przyjrzymy się również strukturom i mechanizmom obrotu na rynkach energii, co pozwoli nam określić i wskazać elementy ryzyka działań handlowych, wynikającego z niepewności prognoz zapotrzebowania, a zarazem uświadomi, wskazywaną w tezie pracy, konieczność modelowania tejże niepewności dla osiągnięcia poprawy jakości procesów decyzyjnych w tej dziedzinie.

## 1.1. Ogólna charakterystyka procesu handlu energią elektryczną

### 1.1.1. Energia – przeszłość, teraźniejszość i przyszłość

Energia stanowi jedno z najważniejszych dóbr decydujących o poziomie rozwoju cywilizacyjnego społeczeństwa. Pozwala ona na odciążenie ludzi od nużących prac fizycznych i w ten sposób nie tylko poprawia ich warunki życia, ale zwiększa także ilość czasu, który mogą oni przeznaczyć na swój rozwój na różnych płaszczyznach życia. W tabeli 1.1.1 prezentujemy poglądowe oszaco-

wania ilości energii wykorzystywanej w różnych fazach rozwoju cywilizacyjnego w podstawowych dziedzinach życia. Jak widzimy, energia wykorzystywana była przez ludzkość od zarania jej dziejów. Początkowo oczywiście była to energia niezbędna do pozyskania i przygotowania żywności, stopniowo jej wykorzystanie rozszerzyło się na gospodarstwa domowe (ogrzewanie, oświetlenie) oraz handel, a następnie na przemysł, rolnictwo, transport i inne dziedziny życia. Zużycie energii przez ludzkość rośnie wyraźnie wraz z rozwojem cywilizacyjnym. Dobro to wykorzystywane jest coraz szerzej, co z jednej strony stwarza nowe perspektywy rozwojowe, z drugiej jednak strony, uzależnia społeczeństwo od stałej, pewnej i taniej jego dostępności.

Za bezsporny fakt należy więc uznać, że energia była, jest i będzie jednym z najważniejszych dóbr niezbędnych do istnienia społeczeństwa. Trudno sobie wyobrazić funkcjonowanie niemal każdego aspektu dzisiejszej cywilizacji: nowoczesnej telekomunikacji i transportu, działalności biznesowej, produkcyjnej, usługowej lub handlowej, bez możliwości sprawnego i niezawodnego korzystania z zasobów energetycznych. Równie trudne do zaakceptowania byłoby życie codzienne ludzi, bez dostępu do bezpiecznej, czystej i taniej energii, energii do celów oświetleniowych, grzewczych, do zasilania różnorodnych urządzeń wykorzystywanych w gospodarstwach domowych. Jak uczą nas doświadczenia wynikające z wydarzeń nadzwyczajnych – które skutkują krótkotrwałym i ograniczonym terytorialnie brakiem zasilania w energię (zwłaszcza elektryczną) – wywołanych klęskami naturalnymi lub rozległymi awariami, brak dostępu do energii na większą skalę oznaczałby po prostu załamanie cywilizacyjne.

**Tabela 1.1.1.** Zapotrzebowanie na energię na różnych poziomach rozwoju cywilizacyjnego ludzkości

| Epoka                 | Dzienne zużycie (tys. kcal) |                              |                      |           |        |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|-----------|--------|
|                       | Żywność                     | Gospodarstwa domowe i handel | Przemysł i rolnictwo | Transport | Ogółem |
| Pierwotna             | 2                           |                              |                      |           | 2      |
| Łowiecka              | 3                           | 2                            |                      |           | 5      |
| Pierwotna rolnicza    | 4                           | 4                            | 4                    |           | 12     |
| Zaawansowana rolnicza | 6                           | 12                           | 7                    | 1         | 26     |
| Przemysłowa           | 7                           | 32                           | 24                   | 14        | 77     |
| Technologiczna        | 10                          | 66                           | 91                   | 63        | 230    |

**Źródło:** na podstawie T. Witkowski, *Energia – możliwości naukowe i bariery technologiczne oraz społeczne*, „Czysta Energia” 2011, nr 5, za: E. Cook, *The Flow of Energy in an Industrial Society*, „Scientific American” 1971, no. 225(3), s. 135–144.

Oczywiście energia elektryczna pojawia się na scenie dziejów dopiero w późniejszym okresie. Początkowo podstawowe formy energii wykorzystywane przez człowieka to przede wszystkim energia cieplna, powstająca ze spalania drewna i innych substancji naturalnych, energia mechaniczna czy też energia wytwarzana przez udomowione zwierzęta. Doniesienia o wykorzystywaniu energii cieplnej pary wodnej pojawiają się już w starożytności, ale jej rzeczywiste zastosowanie na szeroką skalę datuje się na koniec XVIII w. i wiąże się z wynalezieniem przez Jamesa Watta maszyny parowej oraz z rewolucją przemysłową w Anglii. O praktycznym wykorzystaniu energii elektrycznej tak naprawdę możemy mówić odnośnie do początku XIX w., kiedy to w 1800 r. Alessandro Volta buduje pierwsze ogniwo galwaniczne.

W ciągu stu kilkudziesięciu lat energia, w tym również energia elektryczna, stała się jednym z podstawowych dóbr, od których zależy funkcjonowanie społeczeństwa. W tym okresie wraz z rozwojem gospodarczym i cywilizacyjnym świata w szybkim tempie wzrastało także zapotrzebowanie na energię. W obliczu rosnącego uzależnienia świata od wykorzystania zasobów energetycznych pojawiają się oczywiście niepokojące pytania na temat perspektyw dalszego rozwoju sytuacji, zwłaszcza w kontekście takich zagadnień, jak dostępność zasobów surowców energetycznych, kwestie zanieczyszczenia środowiska naturalnego czy emisji gazów cieplarnianych i ocieplenia klimatu.

Paradoksalnie w chwili obecnej wymienione czynniki powodują, że pożądaną perspektywą dalszego rozwoju współczesnej cywilizacji staje się raczej dążenie do redukcji zapotrzebowania na energię i znalezienie innych, „czystych”, źródeł jej produkcji. Takie zagadnienia jak zwiększenie efektywności wykorzystania energii, nie tylko w gospodarce, ale również w życiu codziennym ludzi, czy energia ze źródeł odnawialnych, stanowią jedne z najważniejszych wyzwań stojących przed współczesną energetyką i ogólnie przed światową cywilizacją.

### 1.1.2. Cechy charakterystyczne energii elektrycznej jako towaru

Zasadniczy cel istnienia przedsiębiorstwa można określić jako osiągnięcie zysku poprzez zaopatrywanie klientów w określone produkty. Wśród podstawowych funkcji organizacji gospodarczych wymienić więc można funkcję produkcyjną, rozumianą jako użytkowanie różnego rodzaju materiałów, środków technicznych i usług w celu wytworzenia nowych produktów i usług wymaganych przez klienta (Durlik 1995). Ponieważ potrzeby konsumentów znajdują się w centrum procesu produkcji, zdolność ich trafnego przewidywania i zaspokajania warunkuje użyteczność istnienia organizacji.

Wyjątku od tej reguły nie stanowią przedsiębiorstwa elektroenergetyczne. I tak w ich przypadku podstawowe cele działania wiążą się z zapewnieniem