



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI  
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: Bartosz Tarakan  
Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika

## **AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Analiza wpływu współdziałania grupy odnawialnych źródeł energii na system elektroenergetyczny**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **The impact analysis of the interaction of a group of renewable energy sources on the power system**

Promotor: **dr hab. inż. Stanisław Czapp, prof. nadzw. PG**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Krzysztof Dobrzyński**

Gdańsk, 2018

## Spis treści

1 WSTĘP.....	3
2 TEZA, CEL I ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY.....	4
3 ALGORYTMY OPTYMALIZACYJNE.....	5
3.1 ALGORYTM ROJU CZĄSTEK.....	5
3.2 TEORIA LOGIKI ROZMYTEJ.....	9
4 STRUKTURY SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH WYKORZYSTYWANYCH W BADANIACH NADRZĘDNEGO UKŁADU REGULACJI.....	10
5 NADRZĘDNY UKŁAD REGULACJI.....	14
5.1 WPROWADZENIE.....	14
5.2 STRUKTURA NADRZĘDNEGO UKŁADU REGULACJI.....	14
5.3 UKŁAD REGULACJI MOCY CZYNNEJ.....	15
5.4 UKŁAD REGULACJI MOCY BIERNEJ.....	18
6 WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ DOTYCZĄCYCH NADRZĘDNEGO UKŁADU REGULACJI.....	21
6.1 WPROWADZENIE.....	21
6.2 WYNIKI BADANIA UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ W SIECI PROMIENIOWEJ.....	21
6.3 WYNIKI BADANIA UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ – WARIANT A – PRZYŁĄCZENIE ŹRÓDEŁ W WĘZŁACH B11112 ORAZ B13112.....	25
6.4 WYNIKI BADANIA UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ W SIECI – WARIANT B – PRZYŁĄCZENIE ŹRÓDEŁ W WĘZŁACH B11112, B15112 ORAZ B12112.....	28
6.5 WYNIKI DOTYCZĄCE UKŁADU REGULACJI MOCY BIERNEJ.....	32
7 PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	37
8 BIBLIOGRAFIA.....	39

# 1 WSTĘP

Intensywny rozwój generacji rozproszonej spowodowany europejską polityką energetyczną daje większe możliwości regulacyjne, które bez wątpienia należy wykorzystać do poprawy bezpieczeństwa krajowego systemu elektroenergetycznego, jak również do optymalizacji kosztów jego funkcjonowania.

W celu poprawy świadczenia usług systemowych, z punktu widzenia operatora systemu konieczne jest, aby rozproszone źródła energii potrafiły współdziałać z systemem elektroenergetycznym i poprawiały jego możliwości regulacyjne. W tym celu źródła, te w zależności od ich rodzaju, powinny spełniać wymagania techniczne określone w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP), a także wymagania automatyzacji, dotyczące tzw. „Przemysłu 4.0” stanowiącego połączenie przemysłowego internetu rzeczy (IIoT - ang. *Industrial Internet of Things*) ze sztuczną inteligencją maszyn. Regulatory źródeł rozproszonych powinny odpowiednio reagować na stany awaryjne, analizując na bieżąco stan pracy sieci, jak również współpracować z nadrzędnym układem sterownia, analizując przy tym własne zasoby regulacyjne.

Wytwarzanie energii elektrycznej staje się coraz bardziej zdecentralizowane i można spodziewać się, że w następnych latach tendencja ta będzie się utrzymywać. Z tego powodu konieczne staje się opracowywanie nowych metod i układów sterowania rozproszonymi jednostkami wytwórczymi w celu efektywniejszego zarządzania ich zasobami. W dalszej perspektywie rozwoju układów rozproszonych przewiduje się stosowanie na skalę przemysłową następujących technologii energetycznych: koła zamachowe, ogniwa paliwowe, mikroturbiny, nadprzewodniki oraz superkondensatory.

Zarządzanie generacją rozproszoną kontrolowaną przez nadrzędny układ regulacji stanowi koncepcję tzw. wirtualnej elektrowni, która może w przyszłości przyczynić się do zmian na rynku energii, dając korzyści biznesowe zarówno operatorowi systemu elektroenergetycznego, jak i właścicielom źródeł. Obecnie dużym wyzwaniem jest opracowanie jednolitej technologii powiązania generacji rozproszonej z klasycznymi źródłami wytwórczymi oraz opracowanie standardów oprogramowywania systemów sterujących.

Generacja rozproszona oraz grupowanie różnych typów odnawialnych źródeł energii i przyłączanie ich do wspólnych węzłów może powodować niestabilność pracy sieci. Aby zapobiec tej sytuacji, niezbędne jest przeprowadzenie analizy rozbudowanego systemu pod kątem właściwej lokalizacji odnawialnych źródeł energii tak, aby funkcjonowanie pracy systemu było efektywne oraz opłacalne dla operatora systemu elektroenergetycznego.

W związku z powyższym niniejsza praca jest kontynuacją krajowych i światowych badań, których celem jest zwiększenie efektywności regulacyjnych systemu elektroenergetycznego przez odpowiednie sterowanie źródłami odnawialnymi i maksymalne wykorzystanie ich zdolności do regulacji napięcia.

## **2 TEZA, CEL I ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY**

### **Teza**

Istnieje możliwość nadrzędnego sterowania mocą generowaną grupy odnawialnych źródeł energii przyłączonych do systemu elektroenergetycznego, przy uwzględnieniu ich ograniczeń co do mocy wytwarzanej, minimalizacji kosztów wytwarzania energii elektrycznej oraz utrzymywania wymaganych poziomów napięć w systemie elektroenergetycznym. Takie nadrzędne sterowanie grupą odnawialnych źródeł energii elektrycznej:

- koordynuje działania regulacyjne poszczególnych elektrowni, przez co poprawia możliwości regulacyjne systemu elektroenergetycznego, zwiększając jego bezpieczeństwo,
- skutkuje wzrostem elastyczności oraz odporności systemu elektroenergetycznego na zakłócenia.

### **Cel pracy**

Celem pracy jest:

- opracowanie metody obliczeniowej korzystającej z teorii algorytmów rojowych, pozwalającej na wskazanie optymalnej mocy generowanej odnawialnych źródeł energii w sytuacjach wymagających jej ograniczenia, przy uwzględnieniu kosztów wytwarzania energii elektrycznej przez te źródła,
- opracowanie metody korzystającej z teorii zbiorów rozmytych, pozwalającej na utrzymywanie wymaganych poziomów napięć w sieci elektroenergetycznej, do której są przyłączone odnawialne źródła energii; opracowana metoda powinna uwzględniać typ oraz moc źródła, a także charakter jego pracy,
- budowa nadrzędnego układu regulacji generacją rozproszoną i opracowanie algorytmów jego działania oraz weryfikacji na podstawie wykonanych badań symulacyjnych.

### **Zawartość pracy**

Rozdział 1 stanowi wstęp do badanej tematyki rozprawy oraz stanowi próbę wyjaśnienia potrzeby prowadzenia badań objętych tematem rozprawy.

W rozdziale 2 zaprezentowano tezę oraz cel i zawartość rozprawy.

W rozdziale 3 przedstawiono teorię dotyczącą algorytmów rojowych oraz teorię dotyczącą zbiorów rozmytych, które w dalszym etapie pracy zostały wykorzystane do budowy układów regulacji.

Rozdział 4 przedstawia strukturę modelowanych sieci, na których wykonano badania weryfikujące działanie nadrzędnego układu regulacji. Analizy, badania i optymalizacje przeprowadzono z wykorzystaniem algorytmu rojowego, na zmodyfikowanym 37-węzłowym modelu systemu elektroenergetycznego CIGRE, do którego przyłączano grupę czterech źródeł energii. Model

sieci oraz algorytm roju cząstek zaimplementowano do programu DigSILENT PowerFactory, który ma możliwość programowania skryptów oraz przeprowadzenia analiz rozplywowych.

W rozdziale 5 zaprezentowano strukturę układu regulacji mocy czynnej oraz mocy biernej, a także przedstawiono zasadę jego działania. W pracy przedstawiono badania i analizy przeprowadzone z wykorzystaniem algorytmu rojowego do określenia optymalnego ograniczenia wytwarzanej mocy czynnej każdej z analizowanych elektrowni, tzn. elektrowni fotowoltaicznej, biogazowej, wiatrowej oraz wodnej, w sytuacjach wymagających jej ograniczenia, przy uwzględnieniu kosztów wytwarzania energii elektrycznej przez te źródła. Pokazano, że algorytm poszukuje optymalnych wartości mocy czynnej źródeł wytwórczych, które operator systemu w przypadku konieczności musi ograniczyć.

Równolegle wykonano badania i analizy dotyczące układu regulacji mocy biernej wykorzystywanego do utrzymywania wymaganych poziomów napięć analizowanej sieci.

Rozdział 6 przedstawia wyniki wybranych badań dotyczące układów regulacji mocy czynnej oraz biernej w trzech badanych sieciach. Wyniki te wykazują, że algorytmy wykorzystane w pracy pozwalają na poszukiwanie optymalnych mocy przyłączanych źródeł, przy których koszty wytwarzania są najniższe.

W rozdziale 7 podsumowano wyniki pracy oraz przedstawiono wnioski z weryfikacji przydatności algorytmów rojowych i teorii zbiorów rozmytych do optymalizacji pracy sieci elektroenergetycznej, a także do wykonywania analiz związanych z przyłączaniem źródeł energii do systemu elektroenergetycznego.

### **3 ALGORYTMY OPTYMALIZACYJNE**

#### **3.1 ALGORYTM ROJU CZĄSTEK**

W ciągu ostatnich lat dużą popularność zyskały metody heurystyczne, służące do rozwiązywania wielu problemów technicznych w różnych dziedzinach nauki. Metody te ułatwiają rozwiązywanie problemów optymalizacyjnych, które wcześniej były niezwykle trudne lub wręcz niemożliwe do rozwiązania.

Optymalizacja roju cząstek (PSO – ang. *Particle Swarm Optimization*) jest obliczeniową metodologią wykorzystującą metody ewolucyjne (algorytmy genetyczne, strategie ewolucyjne, programowanie genetyczne) oraz metody obliczeniowe z dziedziny sztucznego życia.

Teoria algorytmu roju cząstek opiera się na zachowaniach społecznych zwierząt żyjących gromadnie. Algorytm PSO w swej budowie jest nieco podobny do algorytmu genetycznego, ponieważ system jest inicjowany przez populację przypadkowych rozwiązań. Jednak w przeciwieństwie do innych algorytmów, w algorytmie PSO każdemu potencjalnemu rozwiązaniu (zwanemu cząstką lub agentem) przypisuje się losową prędkość, a następnie pozwala się, aby cząstka ta przemieszczała się przez badany obszar problemu.

Naukowcy, podpatrując życie stada różnych zwierząt, w tym ptaków i ławicy ryb, zauważyli, że zwierzęta te powracają do miejsca, w którym wcześniej znalazły pożywienie. Zauważono również, że na to miejsce trafiają zwierzęta, które dostały sygnał, czyli informację o docelowym miejscu z pożywieniem.

Richerson i Boyd zbadali proces decyzyjny człowieka i opracowali koncepcję indywidualnego uczenia się oraz przekazywania informacji [1]. Zgodnie z ich badaniami ludzie wykorzystują dwa ważne rodzaje informacji w procesie decyzyjnym. Pierwszym jest ich własne doświadczenie, to znaczy, że próbowali wyborów i wiedzą, który z nich jest jak dotąd najlepszy. Drugim są doświadczenia innych osobników, to znaczy, ich wiedza, doświadczenie i znajomość najlepszego wyboru.

W algorytmie PSO każda cząstka porusza się w przestrzeni poszukiwań w celu znalezienia optymalnej, w sensie rozważanej funkcji celu, pozycji. Cząstka jest zatem punktem w przestrzeni, która nie ma rozmiaru ani wagi. Istotną cechą każdej cząstki jest pamięć, która pozwala określać własne położenie w przestrzeni, prędkość cząstki, wartość funkcji celu dla własnego położenia, najlepsze swoje położenie oraz najlepsze położenie sąsiadów.

W kolejnych iteracjach każda cząstka, na podstawie swoich wcześniejszych doświadczeń oraz doświadczeń całego roju, wylicza swoją prędkość, jak i położenie zgodnie ze wzorami (3.1), (3.2), (3.3):

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1 rand_1 (pbest_i - x_i^k) + c_2 rand_2 (gbest - x_i^k) \quad (3.1)$$

Algorytm PSO realizowany przy użyciu (3.1) nazywany jest modelem *gbest*.

Prawa strona wzoru (3.1) składa się z trzech części (wektorów), których szczegółowe wyjaśnienie znajduje się w [25]. Pierwsza część stanowi poprzednią prędkość agenta. Druga i trzecia część wzoru jest wykorzystywana do zmiany prędkości agenta. W przypadku braku drugiej i trzeciej części agent będzie kontynuował przemieszczanie się w tym samym kierunku, aż trafi poza granicę badanej przestrzeni. Pierwszy element stara się zatem odkrywać nowe obszary i dlatego mówi się, że odpowiada za dywersyfikację w procedurze poszukiwania najlepszego rozwiązania. Z drugiej strony, bez pierwszego elementu wzoru, prędkość przemieszczającego się agenta byłaby tylko określana przy użyciu aktualnej jego pozycji i najlepszych jego pozycji w dotychczasowej historii. Zatem wartość współczynnika  $w_i$  w literaturze często przyjmuje się jako:

$$w_i = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \cdot k \quad (3.2)$$

Aktualna pozycja (poszukiwany punkt w przestrzeni rozwiązania) może zostać ustalona według następującego równania:

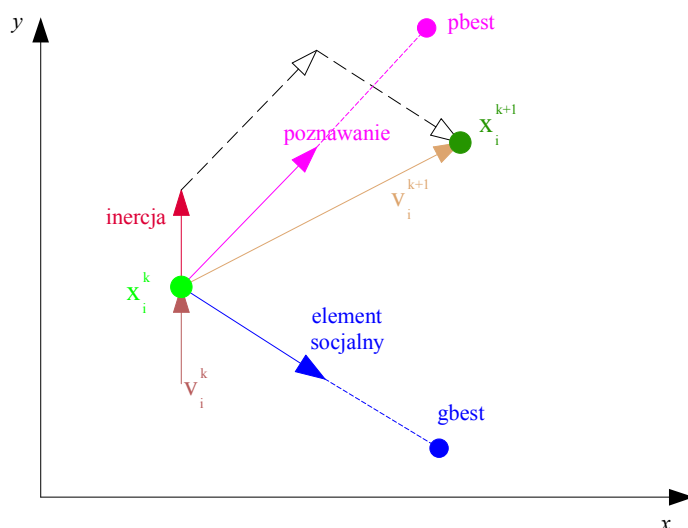
$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.3)$$

gdzie:

$v_i^k$  - wektor prędkość  $i$ -tej cząstki dla  $k$ -tej iteracji,

- $x_i^k$  - wektor położenia  $i$ -tej cząstki dla  $k$ -tej iteracji,
- $pbest_i$  - najlepsze położenie znalezione przez cząstkę,
- $gbest_i$  - najlepsze położenie znalezione dla całego roju,
- $c_1, c_2$  - współczynniki określające wpływ na podejmowanie decyzji (zaufanie do własnego doświadczenia, zaufanie do doświadczenia swoich sąsiadów),
- $rand_1, rand_2$  - wartości losowe z rozkładu jednostajnego  $U(0, 1)$ ,
- $pbest_i - x_i^k$  - wektor odległości między najlepszym znalezionym położeniem a dotychczasowym położeniem,
- $gbest - x_i^k$  - wektor odległości między najlepszym znalezionym dotychczas położeniem przez zbiór sąsiadów a obecnym położeniem.

Używając zmodyfikowanej prędkości i położenia cząstek na podstawie wzorów (3.1) i (3.3), na rys. 3.1 przedstawiono mechanizm wyszukiwania najlepszego rozwiązania.



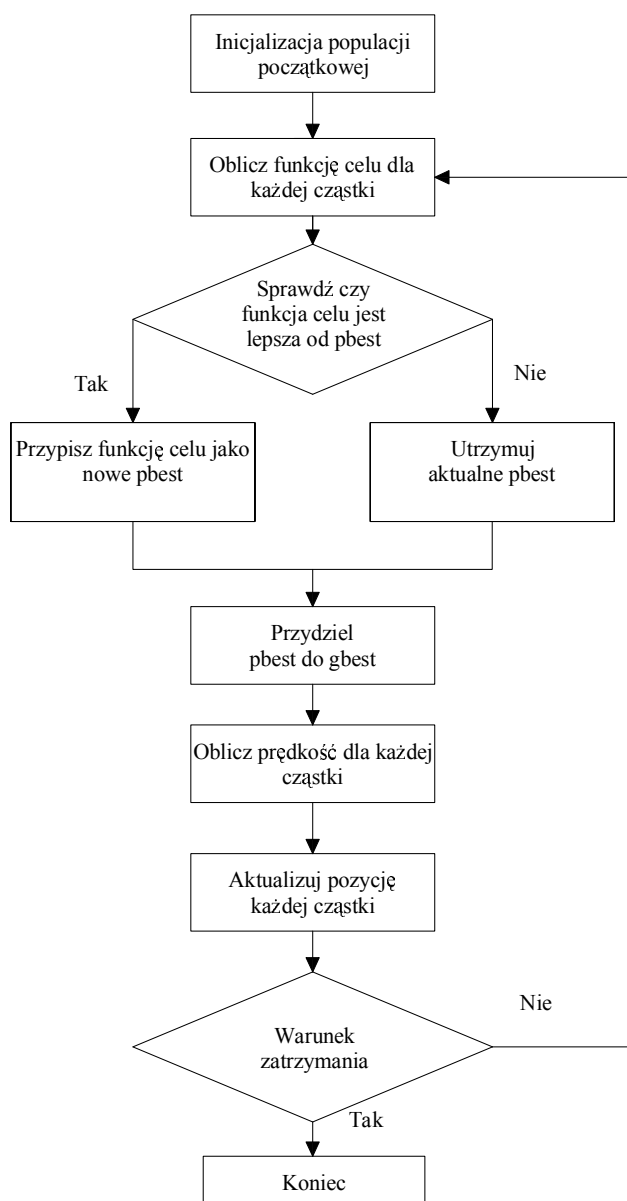
gdzie:  
 $x$  - oś odciętych pola poszukiwań  
 $y$  - oś rzędnych pola poszukiwań

Rys. 3.1. Mechanizm przemieszczania się cząstek

Wektor prędkości jest zależny od trzech „współczynników” (rys. 3.1):

- wektora dotychczasowej prędkości – współczynnik inercji,
- wektora ukierunkowanego na najlepsze dotychczas znalezione położenie – współczynnik własnego doświadczenia,
- wektora ukierunkowanego na najlepsze dotychczas znalezione przez sąsiadów położenie – współczynnik socjalny (poznawczy).

Optymalizacja algorytmem roju cząstek polega na znajdowaniu nowych i lepszych rozwiązań, czyli położeń cząstek w przestrzeni poszukiwań tak, aby znaleźć optymalne położenie, do którego cały rój ma dążyć. Strukturę algorytmu PSO przedstawia diagram na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Struktura algorytmu PSO

W ostatnim dziesięcioleciu ukazało się wiele prac naukowych wykorzystujących algorytmy rojowe. W pracach związanych z dziedziną elektroenergetyki dotyczyły one różnej tematyki:

- dobór parametrów stabilizatorów systemowych opisano w pracach: [19], [3], [18], [10], [27], [23],
- problematykę regulacji napięcia i mocy biernej przedstawiono w pracach: [9], [21], [26],[6], [30], [30], [15], [22],



- wybór lokalizacji urządzeń elektroenergetycznych w systemie uwzględniają pozycje: [20],[7], [28], [24], [4], [12], [16],
- problemem poszukiwania maksymalnego punktu mocy w systemach fotowoltaicznych zajęto się m.in. w pracach: [5], [13], [8], [17], [14], [31].

### 3.2 TEORIA LOGIKI ROZMYTEJ

Logika rozmyta zapewnia środki do obliczania za pomocą słów. Korzystając z niej, eksperci nie są już zmuszeni do podsumowania swojej wiedzy wyłącznie w języku zrozumiałym dla komputerów.

Logika rozmyta (FL – ang. *Fuzzy Logic*) składa się ze zbiorów rozmytych, które są sposobem reprezentowania niepewności niestatystycznej i przybliżonego wnioskowania, które obejmuje operacje wykorzystywane do wnioskowania. Teoria zbiorów rozmytych stanowi środek do reprezentowania niepewności. Niepewność zazwyczaj wynika z losowości zdarzeń lub z powodu niedokładności i niejednoznaczności informacji, które pozyskuje się na temat rozwiązywanego problemu. Gdy niepewność jest wypadkową losowości zdarzeń, właściwym narzędziem analizy jest teoria prawdopodobieństwa.

Systemy rozmyte i teorie sterowania rozmytego mają pewne cechy wyróżniające je w stosunku do innych metod rozwiązujących problemy optymalizacyjne, zwłaszcza gdy opis systemu wymaga pewnych ludzkich doświadczeń w kategoriach językowych.

W porównaniu z konwencjonalnymi metodami sterowanie rozmyte wykorzystuje więcej informacji pochodzących od ekspertów z określonych dziedzin, a mniej opiera się na modelowaniu matematycznym określającym rzeczywisty system fizyczny.

Większość systemów logiki rozmytej to systemy oparte na wiedzy eksperckiej, a ich modele rozmyte opisano przez zastosowanie wyrażen logicznych „*Jeżeli ... - To ...*”. Wyrażenia te muszą zostać ustalone, w oparciu o wiedzę na temat działania danego systemu. Dodatkowo wprowadzanie interwałów pomiędzy wejściem i wyjściem oraz określanie funkcji członkostwa jest subiektywne i zależy w dużej mierze od doświadczenia projektanta i dostępnych dla niego informacji. Należy jednak zauważyć, że po określeniu zbiorów rozmytych, wszystkie operacje matematyczne są rygorystyczne.

W latach 60. ubiegłego wieku Lofti A. Zadeh [29] w celu zdefiniowania pojęć, które trudno jednoznacznie interpretować, zaproponował nową teorię. Teoria ta miała zbliżyć do siebie precyzję klasycznej matematyki i nieprecyzyjne informacje z realnego świata.

Regulatory rozmyte stosuje się przede wszystkim w sterowaniu takimi obiektami, dla których metody analityczne nie dają dobrych wyników lub dla których trudno przedstawić model za pomocą równań różniczkowych, lub algebraicznych. Systemy oparte na regułach rozmytych są najbardziej przydatne w modelowaniu złożonych systemów, które mogą być obserwowane przez ludzi, ponieważ

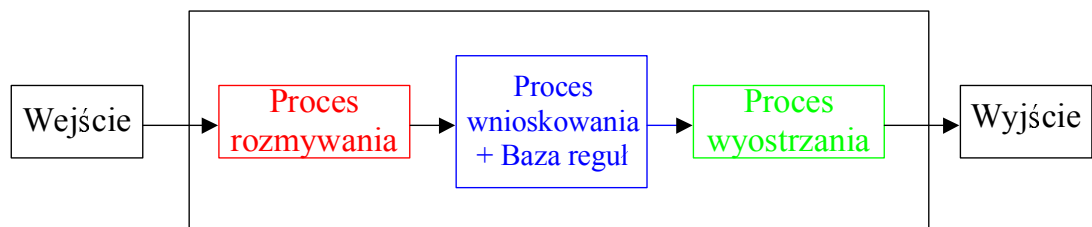
używają zmiennych lingwistycznych, które mogą być naturalnie reprezentowane przez zbiory rozmyte i logiczne połączenia ich zestawów.

Na zbiorach rozmytych można stosować operatory, które pozwalają przekształcać nam dane i wpływać na ich stan. Uogólnieniem operatorów boolowskich, m.in.  $\cap$ ,  $\cup$ ,  $\subset$ , stosowanych w teorii zbiorów, są operatory rozmyte.

Teoria zbiorów rozmytych umożliwia manipulowanie zarówno dokładnymi, jak i niedokładnymi (rozmytymi) wypowiedziami. Jest to bardzo ważne dla prognozowania różnego rodzaju obciążeń, jak również wykorzystywane jest w systemach eksperckich, gdyż jest wiele czynników rozmytych, które są trudne do jednoznacznego scharakteryzowania przez liczbę.

Na zbiorach rozmytych można dokonywać podstawowych operacji logicznych, takich jak np.: dopełnienie (NOT), suma (OR) czy iloczyn (AND) zbiorów.

Struktura klasycznego systemu rozmytego składa się z trzech bloków, co przedstawia rys. 3.3.



Rys. 3.3. Struktura systemu rozmytego [2]

**Blok rozmywania (fuzyfikacji)** realizuje funkcję przypisania wartości ostrych (konkretna wartość liczbowa) do określonych podzbiorów rozmytych. Operacja rozmywania polega na obliczaniu stopnia przynależności sygnałów wejściowych do poszczególnych zbiorów rozmytych. W celu obliczenia stopnia przynależności blok rozmywania wykorzystuje wcześniej zdefiniowane zbiory rozmyte.

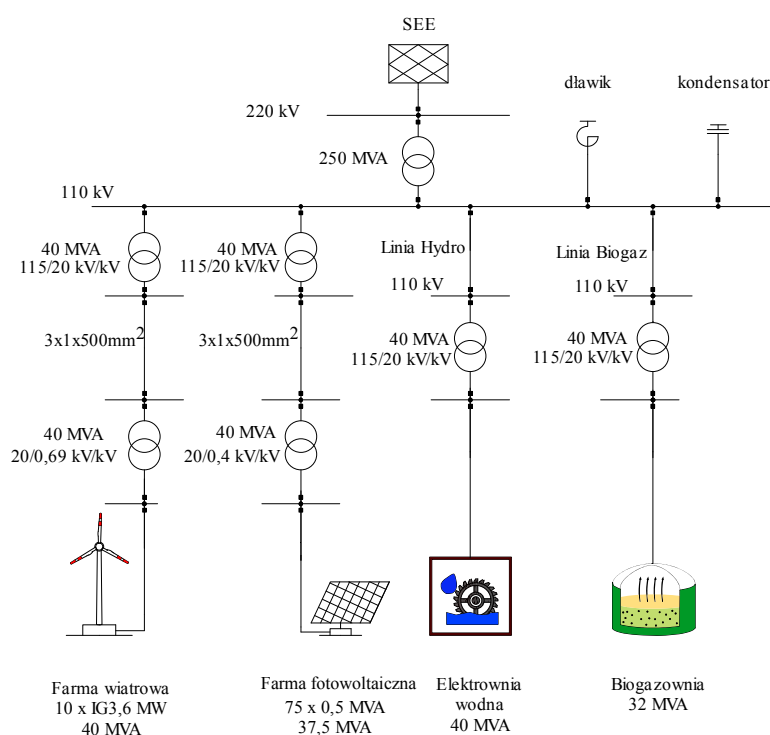
**Blok wnioskowania (interferencji)** wyznacza wynikową funkcję przynależności wyjścia na podstawie stopni przynależności sygnałów wejściowych. Aby przeprowadzić interferencję, proces ten musi mieć zdefiniowaną bazę reguł, funkcję przynależności wyjścia modelu oraz mechanizm interferencyjny. Baza reguł jest zestawieniem instrukcji warunkowych zdefiniowanych na podstawie wiedzy i doświadczenia eksperta. Baza reguł zawiera w sobie reguły rozmyte dla regulatora, na podstawie których regulator dokonuje wnioskowania.

## 4 STRUKTURY SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH WYKORZYSTYWANYCH W BADANIACH NADRZĘDNEGO UKŁADU REGULACJI

Przeprowadzone badania dotyczące nadrzędnego układu regulacji wykonano dla trzech systemów elektroenergetycznych. Pierwszy analizowany system to sieć promieniowa, której strukturę przedstawiono na rys. 4.1. Drugim badanym systemem jest system CIGRE, do którego przyłączono odnawialne źródła w węzłach B11112 oraz B13112, co przedstawiono na rys. 4.2. Trzecim badanym systemem jest również system CIGRE, do którego przyłączono odnawialne źródła w zmienionej konfiguracji w trzech węzłach systemu (rys. 4.3).

W sieci CIGRE, w celu określenia wpływu grupy odnawialnych źródeł energii na system elektroenergetyczny, zamodelowano 32-węzłowy system elektroenergetyczny wraz z czterema badanymi odnawialnymi źródłami wytwórczymi.

Dokonano oceny wpływu źródeł wytwórczych na wybrane parametry pracy systemu. Badania nadrzędnego układu regulacji przeprowadzono w dwóch etapach na zmodyfikowanej sieci testowej CIGRE. W pierwszym etapie zbadano układ regulacji mocy czynnej, a w drugim etapie zbadano układ regulacji mocy biernej. W celu sprawdzenia działania nadrzędnego układu regulacji przeprowadzono symulację jego działania w sieci promieniowej, której strukturę przedstawia rys. 4.1.

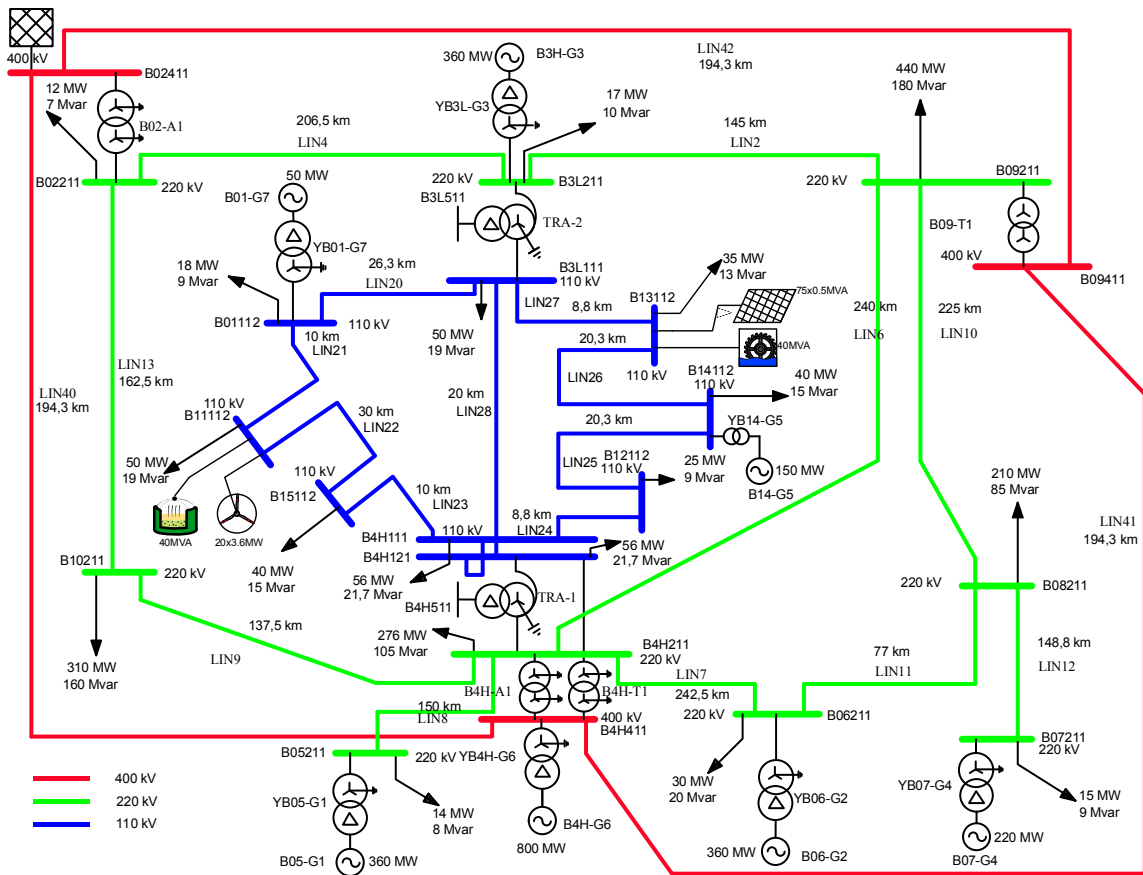


Rys. 4.1. Struktura badanej sieci promieniowej

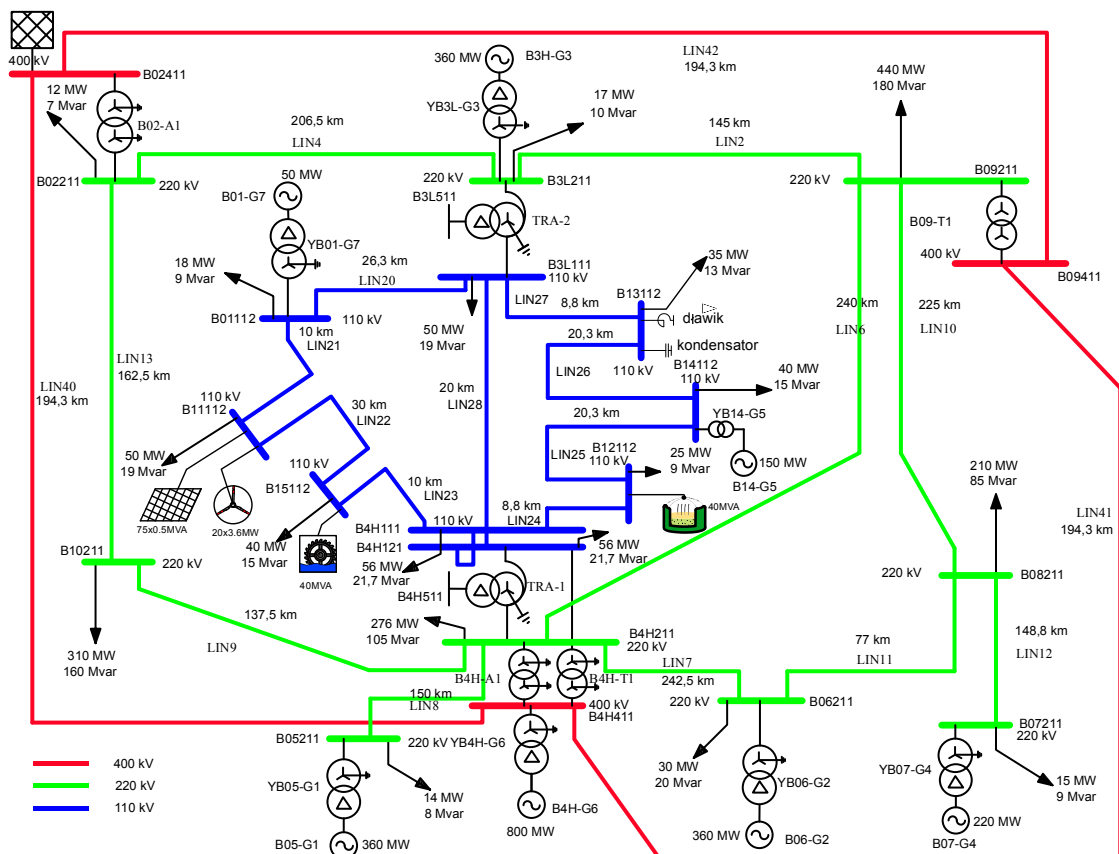
Wszystkie linie wewnętrzne farmy wiatrowej oraz farmy fotowoltaicznej zamodelowano jako linie kablowe wykonane kablem średniego napięcia HRUHAKXS.

Po weryfikacji poprawności działania układu regulacji tak przygotowany regulator nadrzędny przetestowano na wielowęzłowym systemie w dwóch wariantach lokalizacji źródeł odnawialnych.

Warianty lokalizacji odnawialnych źródeł energii przedstawiono na rys. 4.2 (sieć dalej zwana jako wariant A) oraz rys. 4.3 (sieć w dalszej części zwana wariantem A, B).



Rys. 4.2. System wraz z przyłączoną grupą źródeł odnawialnych w węzłach B13112 oraz B11112 (wariant A)

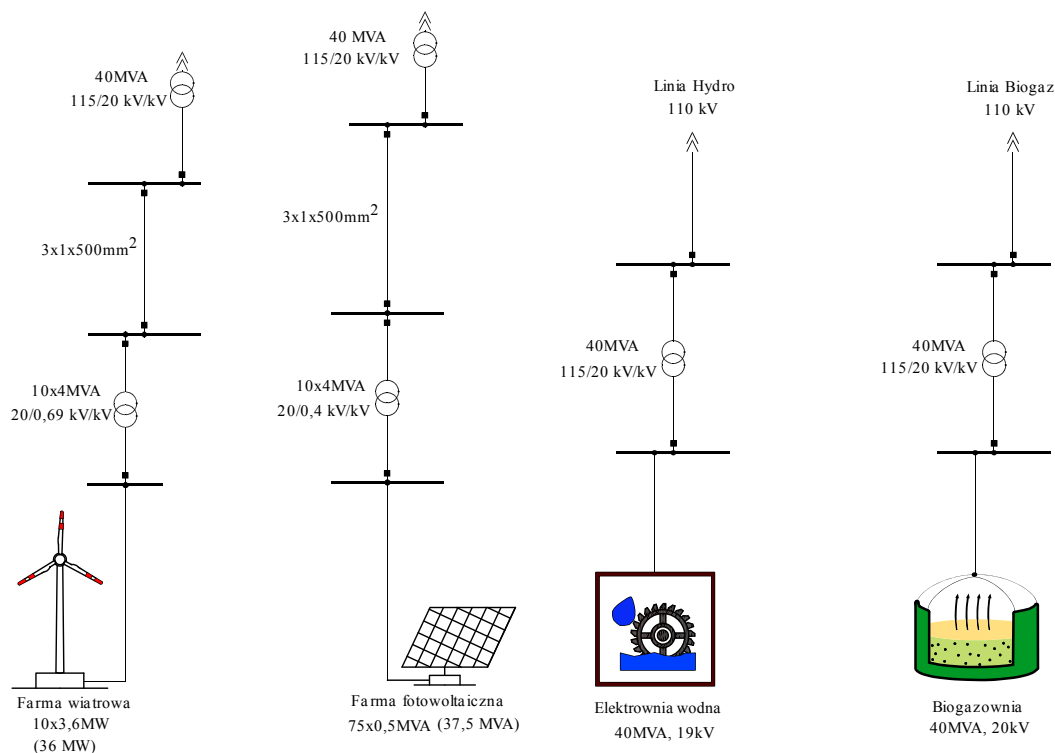


Rys. 4.3. System wraz z przyłączoną grupą źródeł odnawialnych w węzłach B15112, B11112 oraz B12112 (wariant B)

W pracy założono, że moc poszczególnych źródeł przyłączonych za pośrednictwem transformatorów oraz linii elektroenergetycznych do węzłów 110 kV tak przygotowanej sieci nie przekracza:

- 40 MVA dla farmy wiatrowej,
- 37,5 MVA dla farmy fotowoltaicznej,
- 40 MVA dla elektrowni wodnej,
- 40 MVA dla biogazowni.

Do sieci CIGRE przyłączono grupę odnawialnych źródeł energii, których strukturę przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Struktura badanych źródeł wytwórczych przyłączanych do badanej sieci 110 kV

## 5 NADRZĘDNY UKŁAD REGULACJI

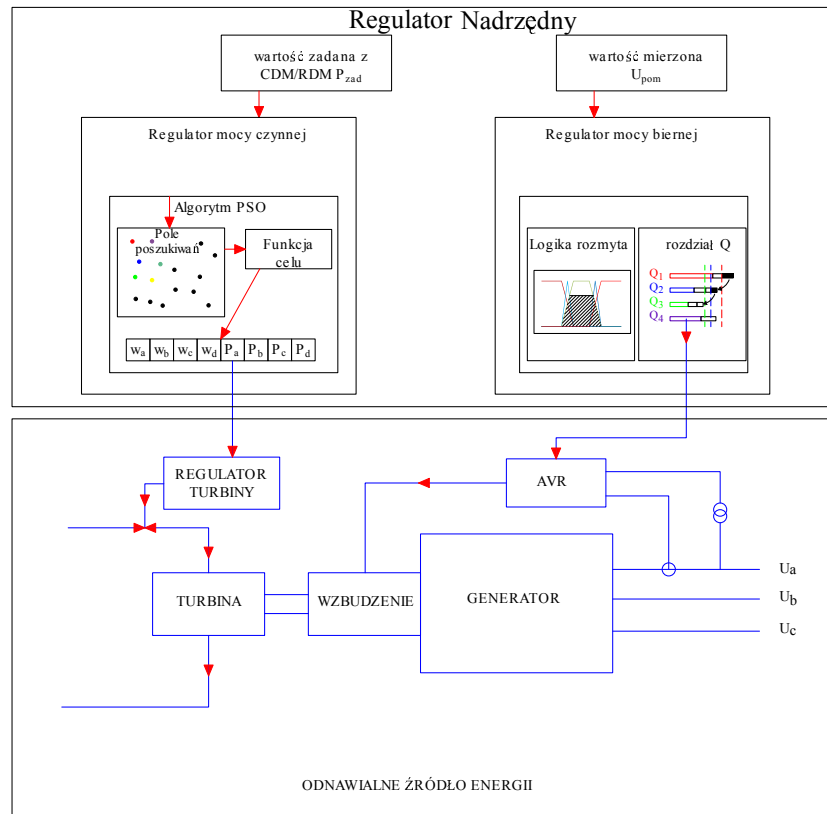
### 5.1 WPROWADZENIE

Odnawialne źródła energii są na szeroką skalę stosowane w systemach elektroenergetycznych na całym świecie. Ich ogromny rozwój i rozprzestrzenianie się sprawiło, że komplikuje się sterowanie systemem elektroenergetycznym. Jednak przez odpowiednie sterowanie pracą źródeł energii, realizowane przez nadrzędny układ regulacji, można poprawić możliwości regulacyjne systemu elektroenergetycznego.

W ramach pracy opracowano i zaprezentowano działanie nadrzędnego układu regulacji do sterowania pracą grupy źródeł odnawialnych w celu poprawy warunków napięciowych. Do tego celu wykorzystano algorytm PSO oraz teorię dotyczącą logiki rozmytej.

### 5.2 STRUKTURA NADRZĘDNEGO UKŁADU REGULACJI

Nadrzędny układ regulacji przedstawiony na rys. 5.1 składa się dwóch regulatorów, tj. regulatora mocy czynnej oraz regulatora mocy biernej.



Rys. 5.1. Struktura nadrzędnego układu regulacji

Regulator mocy czynnej odpowiada za sterowanie mocą czynną źródeł odnawialnych zgodnie z zadaną przez operatora systemu nadrzędnego wartością mocy czynnej. Na podstawie wartości zadanej, regulator wykorzystując algorytm PSO oraz minimalizując zdefiniowaną funkcję celu, poszukuje wartości mocy czynnej dla poszczególnych źródeł odnawialnych. Z kolei regulator mocy biernej wykorzystuje logikę rozmytą do określania mocy biernej poszczególnym źródeł odnawialnych tak, aby mogły one pomóc w utrzymywaniu napięcia w punktach ich przyłączenia.

### 5.3 UKŁAD REGULACJI MOCY CZYNNEJ

W badaniach dotyczących układu regulacji mocy czynnej zastosowano algorytm PSO, którego strukturę przedstawiono na rys. 3.2. W celu zastosowania tego algorytmu zbudowano 8-elementowy wektor, przedstawiony w tab. 5.1, którego pierwsze cztery pozycje wskazują na pracujące źródło, a kolejne cztery to wartości mocy czynnej poszczególnych elektrowni, które algorytm PSO dobiera w celu realizacji funkcji celu.

Tab. 5.1. Wektor przestrzeni poszukiwań regulatora mocy czynnej

$W_a$	$W_b$	$W_c$	$W_d$	$P_{PV}$	$P_{FW}$	$P_{HE}$	$P_{BG}$
-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------	----------

gdzie:

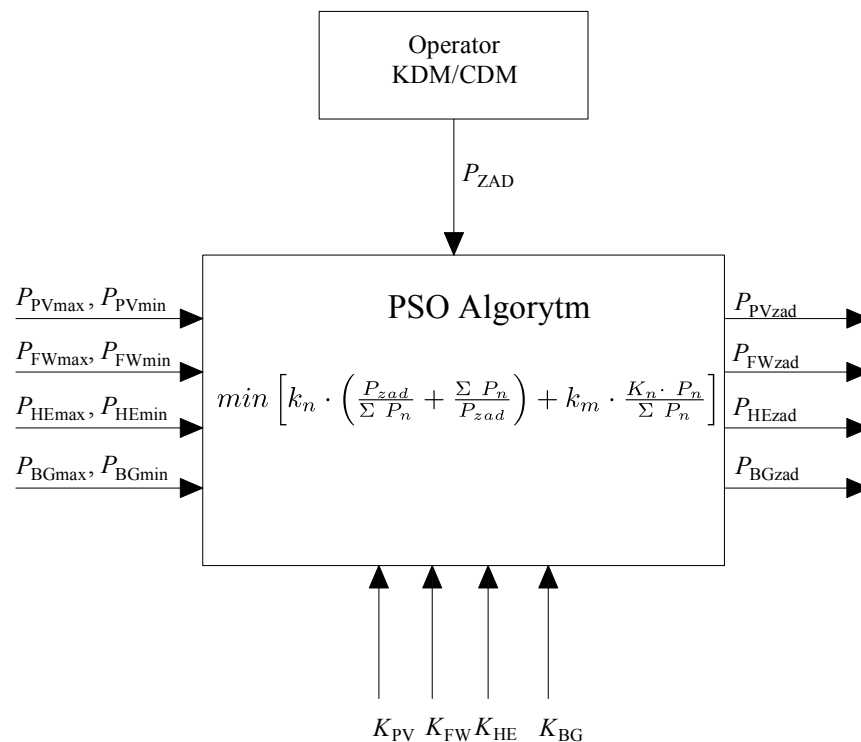
- $P_{PV}$  - moc czynna farmy fotowoltaicznej
- $P_{FW}$  - moc czynna farmy wiatrowej
- $P_{HE}$  - moc czynna elektrowni wodnej
- $P_{BG}$  - moc czynna biogazowni

Szczegółowe parametry wektora pola poszukiwań przedstawia tab. 5.2.

Tab. 5.2. Wybrana przestrzeń poszukiwań

	Wartość [1;4] wskazująca na jeden typ źródła				$P_{PV}$	$P_{FW}$	$P_{HE}$	$P_{BG}$
Wartość max	4	4	4	4	37,5	36	40	32
Wartość min	1	1	1	1	0	0	0	9

Szczegółową strukturę układu regulacji mocy czynnej przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Struktura układu regulacji mocy czynnej

Na wejście do regulatora mocy czynnej podawana jest wartość zadanej mocy czynnej. Dodatkowo do układu regulacji należy wprowadzić wartości maksymalne i minimalne mocy czynnej poszczególnych źródeł oraz wartości kosztów wytworzenia energii elektrycznej pozyskiwanych przez zaimplementowane zmienne krzywe. Uwzględniając powyższe parametry algorytm PSO wybiera losowo wartości mocy czynnej poszczególnych źródeł ze zdefiniowanego wcześniej przedziału



(przezeń poszukiwań z tab. 5.2) i dla określonej populacji iteracyjnie poszukuje najlepszych wartości funkcji celu. Wyjściem regulatora mocy czynnej są wartości zadane mocy czynnej poszczególnych źródeł odnawialnych.

Algorytm PSO minimalizuje funkcję celu, która określona jest wyrażeniem:

$$F_{celu} = k_N \left( \frac{P_{zad}}{P_a + P_b + P_c + P_d} + \frac{P_a + P_b + P_c + P_d}{P_{zad}} \right) + k_M \left( \frac{P_a K_a + P_b K_b + P_c K_c + P_d K_d}{P_a + P_b + P_c + P_d} \right) \quad (5.1)$$

gdzie:

$P_a, P_b, P_c, P_d$  - zmienne pomocnicze opisujące moce czynne źródeł odnawialnych,

$K_a, K_b, K_c, K_d$  - koszty produkowanej energii elektrycznej uwzględniające zmieniający się ich charakter w zależności od mocy,

$k_N, k_M$  - współczynniki wzmocnienia (wagowe) członu mocowego oraz członu kosztowego.

Pierwsza część funkcji celu (5.1) odpowiada za osiągnięcie i utrzymywanie wartości mocy zadanej. Druga część tego wyrażenia uzależnia funkcję celu od kosztów produkowanej energii elektrycznej i pilnuje, aby koszty były minimalizowane.

Funkcje kosztów zostały określone jako zmienne funkcje matematyczne. Wartości kosztów produkowanej energii poszczególnych źródeł zmieniają się w zależności od mocy przez nie osiąganey.

Funkcja kosztów uwzględnia ceny energii dla poszczególnych źródeł. Ceny te zostały zaczerpnięte z Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 16 marca 2017 r. w sprawie ceny referencyjnej energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w 2017 r. oraz okresów obowiązujących wytwórców, którzy wygrali aukcje w 2017 r. Przyjęte ceny dla poszczególnych źródeł ujęte zostały w tab. 5.3.

Tab. 5.3. Cena energii elektrycznej dla źródeł wytwórczych [32]

Źródło energii	Cena <sub>MAX</sub> [zł/MWh]
PV	425
FW	350
HE	480
BG	550

Wartości minimalne ceny zostały przyjęte na poziomie 95% ceny wartości maksymalnej.

Znając funkcję kosztów, operator systemu elektroenergetycznego w każdej godzinie może w łatwy sposób dowiedzieć się praca, których źródeł jest w danej chwili najbardziej korzystna ze względu na koszty wytwarzania energii. Z zasady nie optymalizuje się produkcji energii z elektrowni wiatrowych oraz słonecznych. Wymaga się jedynie, aby produkowały one maksymalne wartości mocy czynnej stosownie do przewidywanych warunków atmosferycznych. Jednak algorytm ten pozwala na

oszacowywanie tych kosztów, co może być wykorzystywane przez operatorów sieci w przypadku konieczności wyłączenia danego źródła. Pozwoli on również oszacować i minimalizować straty wynikające z kar związanych z wyłączeniem źródeł.

Parametry algorytmu PSO stosowane w obliczeniach odnoszące się do regulatora mocy czynnej przedstawiono w tab. 5.4.

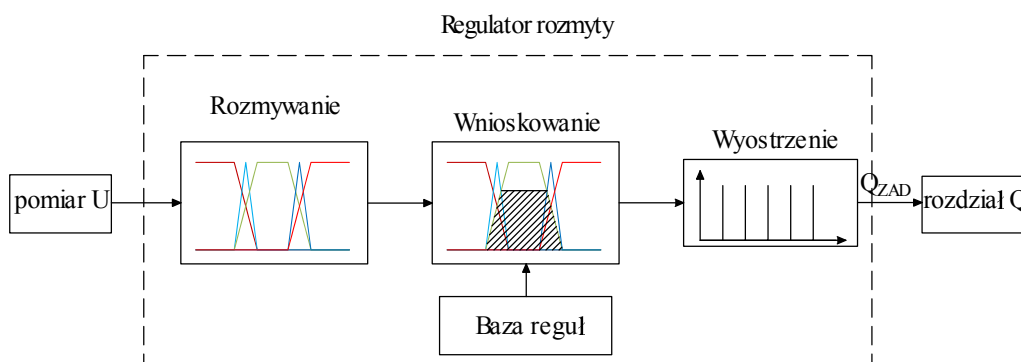
Tab. 5.4. Parametry algorytmu PSO regulatora mocy czynnej

Parametr	Wartość	Opis
$N_{pop}$	100	liczba populacji
$iter_{max}$	100	liczba iteracji
$N_{var}$	8	liczba zmiennych (przestrzeń poszukiwań)
$c_1$	2	współczynnik dot. własnego doświadczenia
$c_2$	2	współczynnik dot. doświadczenia sąsiada
$W_{min}$	0,4	max współczynnik wagi
$W_{max}$	0,9	min współczynnik wagi

## 5.4 UKŁAD REGULACJI MOCY BIERNEJ

Aby układ regulacji mocy biernej mógł realizować swoje zadania, musi otrzymywać wartości poszczególnych mocy czynnej wszystkich źródeł odnawialnych. Na podstawie tych danych regulator mocy biernej wyznacza dostępne wartości mocy biernej poszczególnych źródeł, wykorzystując w tym celu charakterystyki wytwarzania.

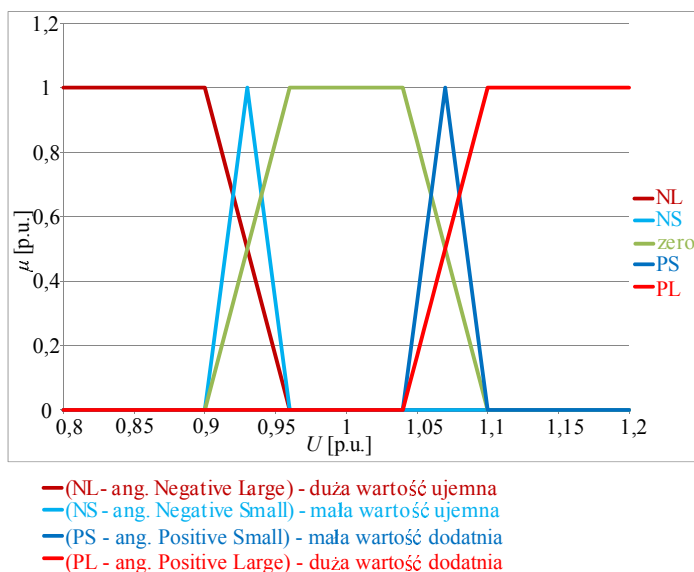
Głównym zadaniem regulatora jest określanie wartości mocy biernej potrzebnej do utrzymywania napięcia w punkcie przyłączenia. Strukturę regulatora rozmytego przedstawia rys. 5.3.



Rys. 5.3. Struktura układu regulacji mocy biernej

Znając wartość napięcia w punkcie przyłączenia, regulator przekształca wartość napięcia na wielkości jakościowe reprezentowane przez zbiory rozmyte na podstawie określonych funkcji przynależności zgodnie z rys. 5.4.

W badanej sieci promieniowej (rys. 4.1) regulator mocy biernej wyznacza moc bierną potrzebną do utrzymania napięcia tylko w jednym węźle. W sieci CIGRE – wariant A (rys. 4.2) regulator mocy biernej wyznacza moc bierną dla dwóch węzłów, tj. B11112 oraz B13112, natomiast w sieci CIGRE – wariant B (rys. 4.3) regulator ten określa moc bierną dla węzła, do którego nie przyłączono odnawialnych źródeł energii.



Rys. 5.4. Funkcje przynależności dotyczące napięcia w punkcie przyłączenia

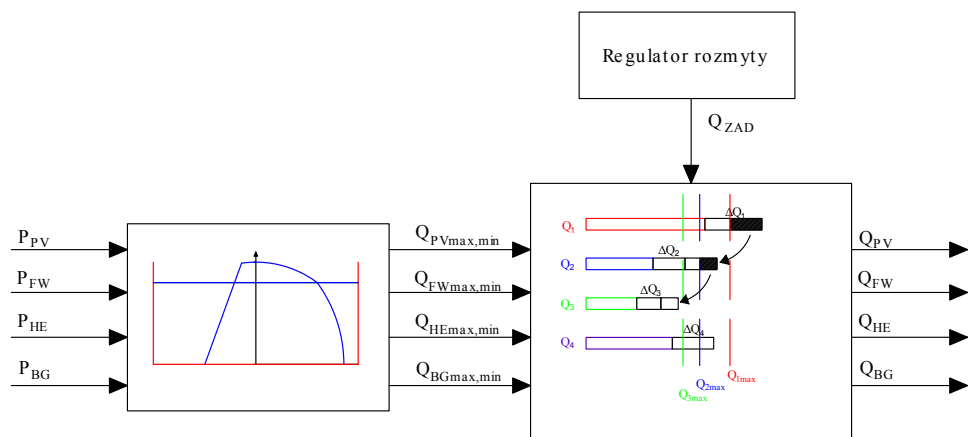
Kolejnym etapem jest wnioskowanie, czyli wyznaczenie w dziedzinie jakościowej wartości wyjść na podstawie bazy reguł i wartości wejściowych dla zbioru rozmytego.

Korzystając z powyższych danych oraz wyrażenia (5.2) przekształcone zostają sygnały wyjściowe z dziedziny jakościowej na dziedzinę ilościową, tzn. że za pomocą środka ciężkości określana zostaje wartość mocy biernej, która potrzebna jest do utrzymywania napięcia w punkcie przyłączenia.

$$Q_{zad} = k_s \frac{\mu_{NL}Q_{NL} + \mu_{NS}Q_{NS} + \mu_{zero}Q_{zero} + \mu_{PS}Q_{PS} + \mu_{PL}Q_{PL}}{\mu_{NL} + \mu_{NS} + \mu_{zero} + \mu_{PS} + \mu_{PL}} \quad (5.2)$$

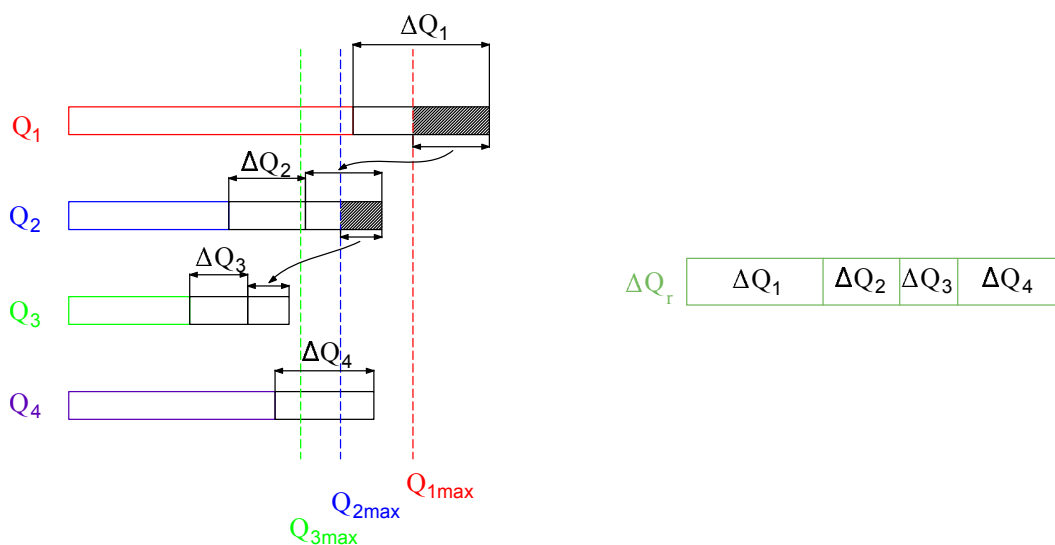
Tę wartość mocy biernej regulator mocy biernej następnie rozdziela pomiędzy wszystkie elektrownie w zależności od tego, jaka jest generowana aktualnie moc bierna przez dane źródło.

Znając dostępne obszary pracy generatorów oraz aktualne wartości mocy biernej, z którymi źródła pracują, układ regulacji rozdziela pomiędzy elektrownie moc bierną potrzebną do wytworzenia przez źródła, co przedstawiono na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Część "nierozmyta" regulatora mocy biernej

Schemat rozdziału mocy biernej pomiędzy poszczególne źródła przedstawia rys. 5.6.



$Q_1$  aktualna wartość mocy biernej elektrowni nr 1

$Q_{1max}$  granica maksymalnej mocy biernej generowanej przez źródło nr 1

$$\Delta Q_r = Q_{zad} - \sum (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)$$

$\Delta Q_1$  wartość mocy biernej przydzielona elektrowni nr 1

Rys. 5.6. Schemat rozdziału mocy biernej na poszczególne źródła

Na podstawie aktualnych wartości mocy biernej elektrowni od  $Q_1$  do  $Q_4$  algorytm wyznacza różnicę  $\Delta Q_r$  pomiędzy wartością  $Q_{zad}$  z równania (5.2) a sumą mocy biernej, z jakimi źródła aktualnie pracują. Następnie wartość  $\Delta Q_r$  jest dzielona pomiędzy poszczególne elektrownie, proporcjonalnie do ich aktualnych wartości generacji mocy biernej na wartości od  $\Delta Q_1$  do  $\Delta Q_4$ . W przypadku wyczerpania możliwości technicznych co do generacji mocy biernej przez dane źródło (linia  $Q_{1max}$  na schemacie), nieprzydzielona część mocy biernej przechodzi do kolejnego źródła i tak aż do wyczerpania zdolności kolejnego źródła. Następnie cała procedura powtarza się dla kolejnych źródeł aż do całkowitego wyczerpania ich zdolności generacji mocy biernej.

## 6 WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ DOTYCZĄCYCH NADRZĘDNEGO UKŁADU REGULACJI

### 6.1 WPROWADZENIE

Na podstawie opracowanego nadrzędnego układu regulacji, składającego się z regulatora mocy czynnej opartego na algorytmie PSO oraz regulatora mocy biernej wykorzystującego teorię zbiorów rozmytych, przeprowadzono badania dotyczące jego działania.

Badanie działania regulatora mocy czynnej odbywa się na podstawie obliczania funkcji celu dla każdej cząstki uwzględniającej moce czynne oraz funkcje kosztów źródeł wytwórczych.

Badanie regulatora mocy biernej odbywa się na podstawie obliczania rozplywów w modelowanym systemie i poddawania wyników analizie zbiorów rozmytych celem określenia mocy biernej potrzebnej do regulacji napięcia.

We wszystkich przeprowadzonych badaniach założono, że liczba wykonywanych iteracji ma wynosić 100 dla każdej próby, tak aby zaobserwować działanie algorytmu. Nie ustalono również dokładności osiągnięcia wartości zadanej w regulatorze mocy czynnej, która wskazywałaby na zakończenie działania algorytmu.

### 6.2 WYNIKI BADANIA UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ W SIECI PROMIENIOWEJ

Zamodelowana sieć promieniowa (rys. 4.1) jest siecią promieniową o napięciu 110 kV przyłączona do sieci 220 kV.

W pierwszym etapie badań, w celu uproszczenia niezbędnych obliczeń oraz kodu źródłowego programu, weryfikację działania układu dokonano na prostej sieci promieniowej.

Na potrzeby zweryfikowania poprawności działania układu regulacji mocy czynnej, przeprowadzono symulację we wszystkich badanych wariantach. Zadawane wartości mocy czynnej przedstawiono w tab. 6.1.

Maksymalna osiągalna moc wszystkich źródeł odnawialnych wynosi 145,5 MW. W celu weryfikacji działania układu, tak aby uwidocznić działania wszystkich źródeł razem, oraz poszczególne ich współdziałanie, przyjęto, że wartość  $P_{\text{zad}}$  stanowi procent wartości maksymalnej, tj. 96%, 68%, 40% oraz 20%. Takie wartości pozwalają zweryfikować, czy algorytm będzie poprawnie wybierał do pracy poszczególne źródła tak, aby osiągać zadaną moc.

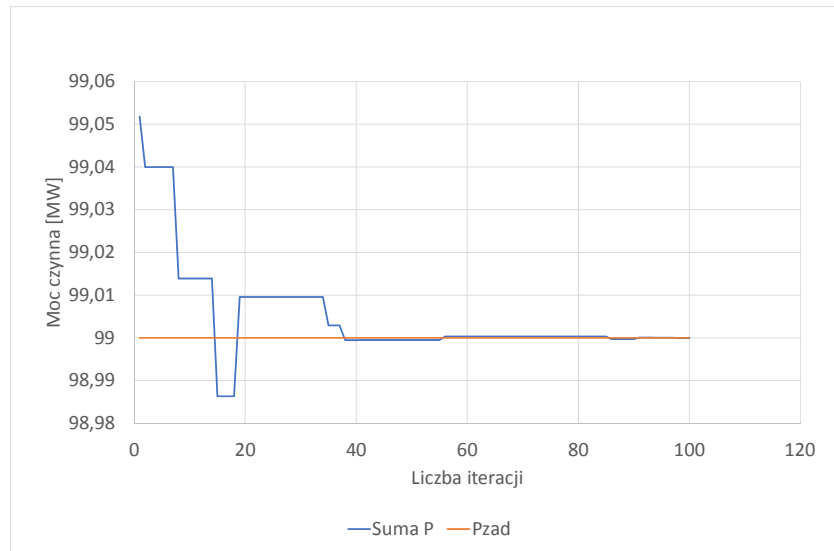
Tab. 6.1. Wartości zadawanych mocy czynnej w regulatorze mocy czynnej

	$96\%P_n$	$68\%P_n$	$40\%P_n$	$20\%P_n$
$P_{\text{zad}}$ [MW]	140	99	58	29

Pierwsze próby miały na celu zbadanie działania pierwszego czlonu wyrażenia (5.1). Aby to zrealizować wartości  $k_N$  oraz  $k_M$  ustalono na poziomie odpowiednio 1, oraz 0.

Dla tak określonych parametrów można było sprawdzić, czy algorytm minimalizuje funkcję celu oraz, czy przydziela wartości zadane do poszczególnych źródeł. Wybrane wyniki dla tych prób przedstawiono na rysunkach 6.1 i 6.2.

Rysunek 6.1 przedstawia osiąganie zadanej wartości mocy czynnej. Na poziomie 40. iteracji dokładność stanowi 99,99%. Kształt krzywej mocy zachował charakter malejący, jedynie przy 17. iteracji wyznaczył wartość mocy czynnej poniżej wartości zadanej.

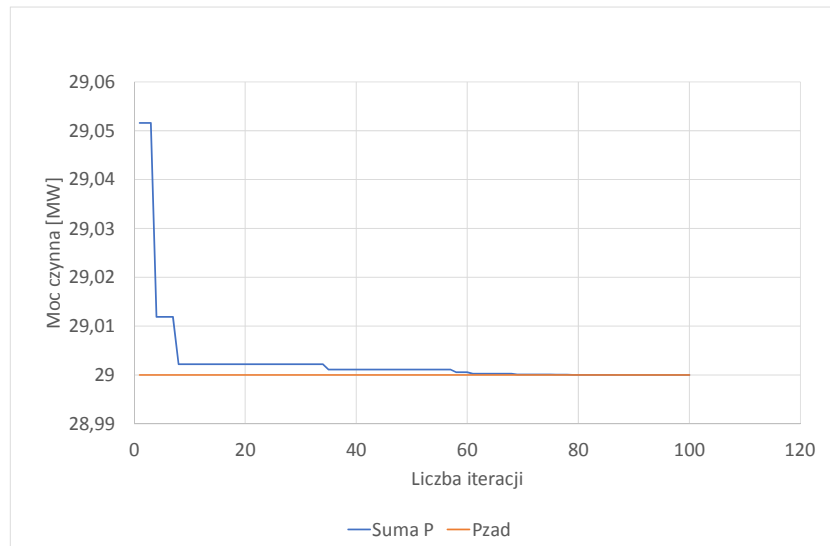


Rys. 6.1. Zależność osiągania wartości zadanej  $P_{zad} = 99$  MW od liczby iteracji - sieć promieniowa

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiągnięte}$	Błąd względny [%]
99	98,999	0,001

W kolejnej próbie z tej serii (rys. 6.2) otrzymano również wynik potwierdzający poprawność działania pierwszego czlonu równania (5.1). Błąd bezwzględny przy 10. iteracji stanowi wartość poniżej 0,01 MW.



Rys. 6.2. Zależność osiągnięcia wartości zadanej  $P_{zad} = 29$  MW od liczby iteracji - sieć promieniowa

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiągnięte}$	Błąd względny [%]
29	29	0

W wykonanej próbie wyniki potwierdzają poprawność działania części regulatora odpowiedzialnego za rozdział mocy czynnej na poszczególne źródła.

Dla  $P_{zad} = 99$  MW algorytm przydzielił źródłom odpowiednie moce czynne, z którymi źródła te mają pracować:

$P_{PV}$ [MW]	$P_{FW}$ [MW]	$P_{HE}$ [MW]	$P_{BG}$ [MW]	$\Sigma P$ [MW]
0	32,3	34,6	31,9	98,9

Dla  $P_{zad} = 29$  MW algorytm przydzielił źródłom odpowiednie moce czynne, z którymi źródła te mają pracować:

$P_{PV}$ [MW]	$P_{FW}$ [MW]	$P_{HE}$ [MW]	$P_{BG}$ [MW]	$\Sigma P$ [MW]
0	0	0	29	29

Jak można zauważyć, algorytm pozwala na pracę trzech źródeł nawet w przypadku, gdy moc zadana jest mniejsza od sumy maksymalnych mocy osiągniętych przez dwie elektrownie.

Rysunki 6.1 i 6.2 przedstawiają, że układ regulacji mocy czynnej poprawnie minimalizuje funkcję celu i dość szybko osiąga minimalną wartość równą 2 (zgodnie z pierwszym członem wzoru 5.1) oraz to, że układ rozdziela moc zadaną wśród źródeł odnawialnych tak, aby suma ich mocy była równa wartości wejściowej mocy zadanej.

Uwzględniając współczynnik  $k_M$  różny od zera, do funkcji celu (5.1) włącza się jej drugi człon. Celem takiego zabiegu jest zbadanie, jak algorytm będzie minimalizować funkcję celu w zależności od kosztów produkcji energii elektrycznej.

Funkcje kosztowe nie są funkcjami stałymi, a głównym celem takiej modyfikacji funkcji celu jest sprawdzenie, czy algorytm wykona obliczenia, uwzględniając dynamikę zmian zaimplementowanych krzywych.

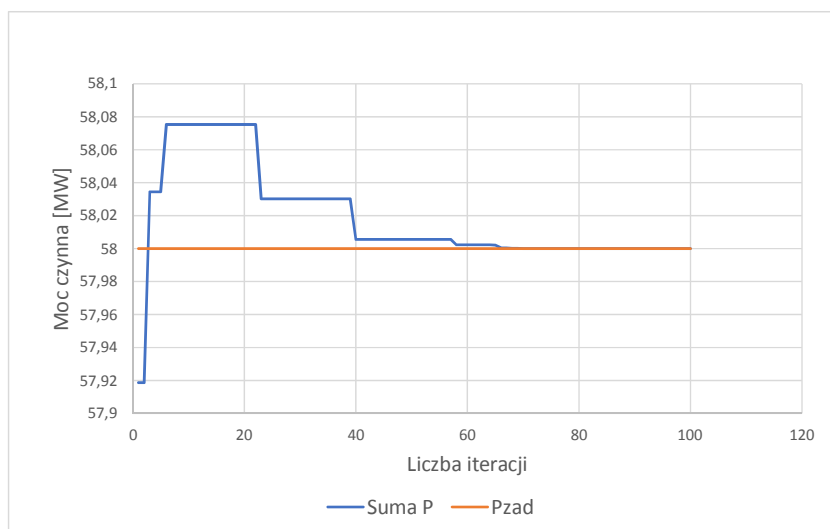
Aby to wykonać i sprawdzić działanie członu drugiego równania (5.1), nie wyłączono członu pierwszego. W przypadku jego wyłączenia nie byłaby już pilnowana moc zadana, a program korzystając z funkcji kosztów, wybierałby pracę tych źródeł, których koszty byłyby najmniejsze, a część elektrowni mógłby odstawić z pracy.

W celu poprawy działania układu regulacji dobrano wartości współczynników tak, aby była zachowana równowaga pomiędzy szukanymi wartościami mocy czynnej źródeł odnawialnych a kosztami produkcji energii elektrycznej.

Na rys. 6.4 przedstawiono wyniki symulacji dla parametrów  $k_N = 1200$ ,  $k_M = 0,0005$ ,  $P_{zad} = 58$  MW. Po wykonaniu wielu prób doboru parametrów  $k_N$  i  $k_M$  okazało się, że dopiero dla wartości  $k_N = 1200$ ,  $k_M = 0,0005$  algorytm zaczyna poprawnie funkcjonować.

Poniżej przedstawione przebiegi dotyczą próby optymalizacji funkcji celu przy wartości zadanej równej 58 MW.

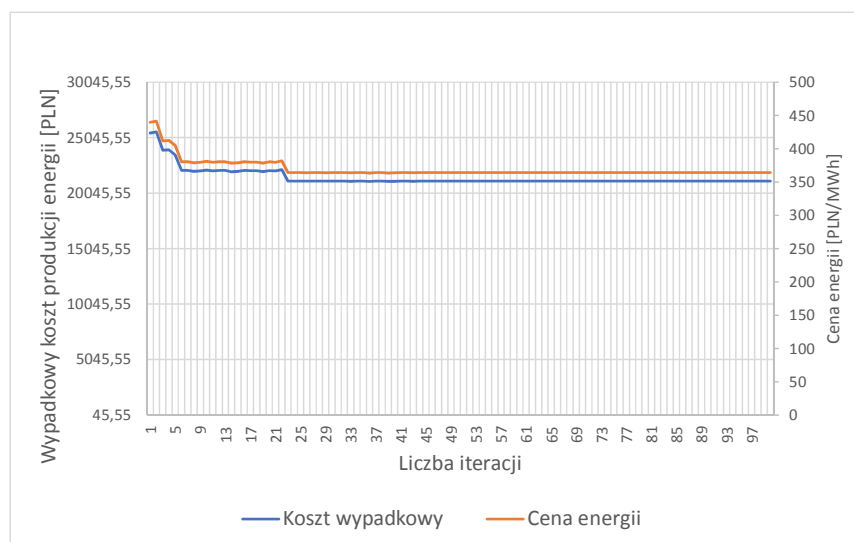
Z rysunków 6.3 i 6.4 wynika, że układ osiąga zadaną wartość mocy czynnej.



Rys. 6.3. Wyniki symulacji (moc czynna i liczba iteracji) dla parametrów  $k_N = 1200$ ,  $k_M = 0,0005$ ,  $P_{zad} = 58$  MW, sieć promieniowa

Na rys. 6.4 przedstawiono rozkład kosztów produkcji, jak i ceny energii oraz optymalne wartości, które układ regulacji dobrał.





Rys. 6.4. Wyniki symulacji (koszt wypadkowy i cena energii) dla parametrów  $k_N = 1200$ ,  $k_M = 0,0005$ ,  $P_{zad} = 58$  MW, sieć promieniowa

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiągnięte}$	Błąd względny [%]
58	58	0

Przedstawione wyniki potwierdzają dokładność osiągania wartości zadanych. Można więc stwierdzić, że dla przedstawionych przypadków stanowi ona powyżej 99,99% po kilkunastu iteracjach.

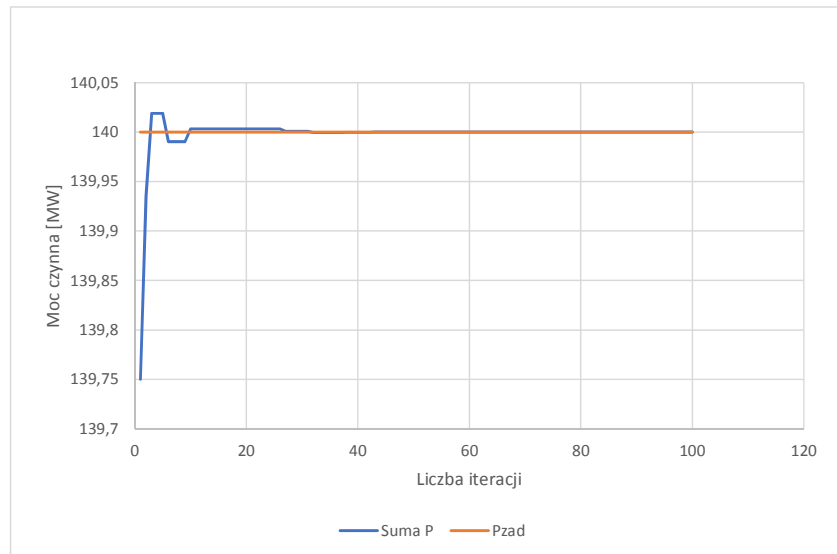
### 6.3 WYNIKI BADANIA UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ – WARIANT A –PRZYŁĄCZENIE ŹRÓDEŁ W WĘZŁACH B1112 ORAZ B13112

Uzyskawszy poprawnie działający układu regulacji mocy czynnej, układ ten rozbudowano tak, aby mógł obsługiwać sieć testową CIGRE wariant A (rys. 4.2). Zamodelowano dwie grupy źródeł odnawialnych, które przyłączono do dwóch różnych szyn. Pierwszą grupę stanowiły: biogazownia oraz farma wiatrowa, które zostały przyłączone do szyny B1112. Natomiast w skład drugiej grupy wchodziły: elektrownia wodna oraz farma fotowoltaiczna, które przyłączono do szyn w węźle B13112.

W pierwszej części badania regulatora mocy czynnej w sieci CIGRE przeprowadzono symulację, uwzględniając te same wartości mocy czynnej jak w przypadku sieci promieniowej (tab. 6.1).

W celu zweryfikowania poprawności działania pierwszego członu wyrażenia (5.1) wartości  $k_N$  oraz  $k_M$  ustawiono również na poziomie odpowiednio 1 i 0. W przypadku tych parametrów można było sprawdzić, czy algorytm minimalizuje funkcję celu oraz czy przydziela wartość zadaną poszczególnym źródłom. Wyniki dla tych prób przedstawiono na rysunkach 6.5 oraz 6.6.

Rysunek 6.5 przedstawia osiągnięcie wartości zadanej. Już przy 10. iteracji osiągnięta wartość mocy czynnej jest bliska wartości zadanej. Z wykresu wynika, że układ regulacji poszukuje wartości mocy czynnej znajdujących się zarówno poniżej, jak i powyżej poziomu mocy zadanej.

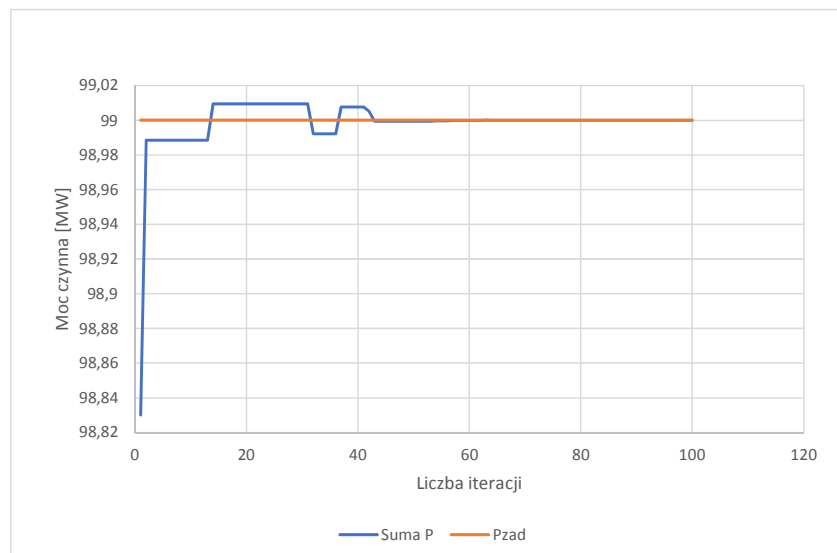


Rys. 6.5. Zależność osiągnięcia wartości zadanej  $P_{zad} = 140$  MW od liczby iteracji – wariant A

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiagniete}$	Błąd względny [%]
140	140	0

W kolejnym badaniu obniżono moc zadaną do wartości 99 MW i sprawdzono skuteczność osiągnięcia wartości mocy czynnej. Rysunek 6.6 przedstawia osiągnięcie tych wartości. Przy 43. iteracji układ regulacji osiągnął dużą zbieżność z pożądaną wartością mocy czynnej.



Rys. 6.6. Zależność osiągnięcia wartości zadanej  $P_{zad} = 99$  MW od liczby iteracji - wariant A

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiagnięte}$	Błąd względny [%]
99	99	0

Dla  $P_{zad} = 140$  MW algorytm przydzielił źródłom następujące moce czynne, z którymi źródła mają pracować:

$P_{PV}$ [MW]	$P_{FW}$ [MW]	$P_{HE}$ [MW]	$P_{BG}$ [MW]	$\Sigma P$ [MW]
37,5	30,5	40	32	140

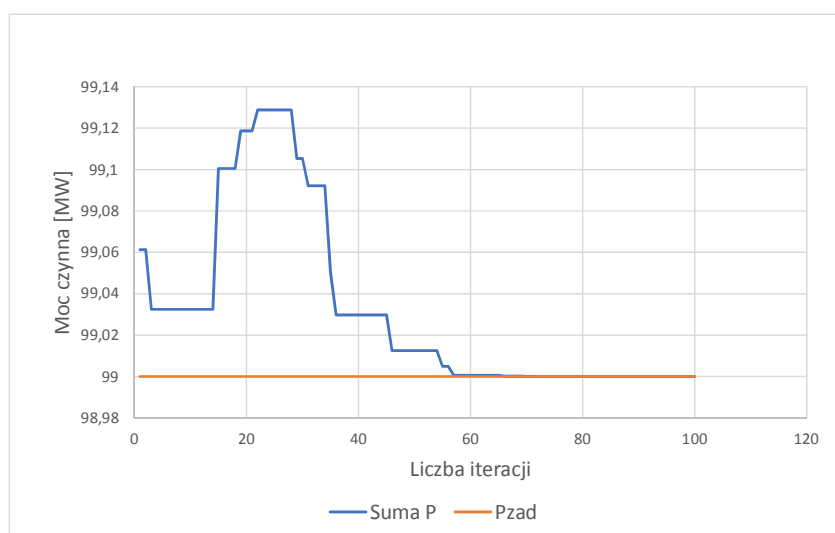
Dla  $P_{zad} = 99$  MW algorytm przydzielił źródłom następujące moce czynne, z którymi źródła mają pracować:

$P_{PV}$ [MW]	$P_{FW}$ [MW]	$P_{HE}$ [MW]	$P_{BG}$ [MW]	$\Sigma P$ [MW]
13,4	36	40	9,6	99

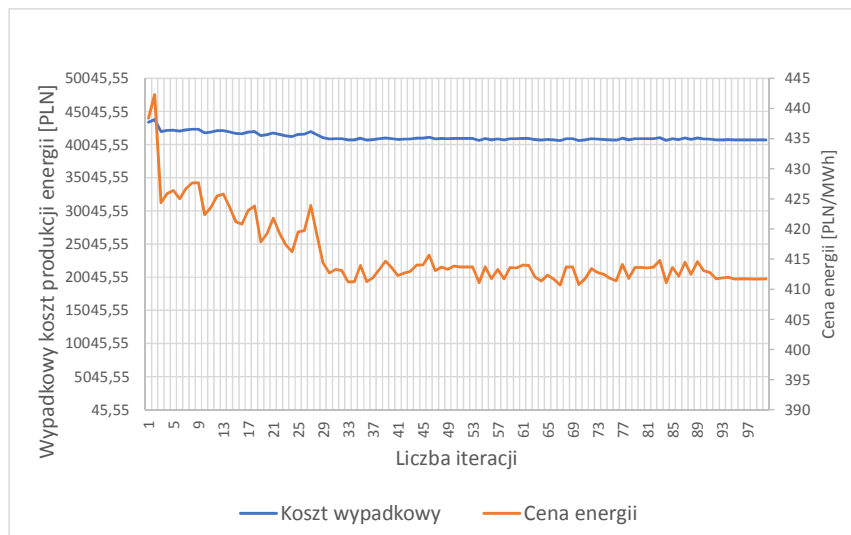
Jak można zauważyć, algorytm pozwala na pracę wielu źródeł nawet w przypadku gdy moc zadana jest mniejsza niż moc jednej elektrowni.

Rysunki 6.5 orza 6.6 pokazują, że układ regulacji mocy czynnej poprawnie minimalizuje funkcję celu i dość szybko osiąga minimalną wartość równą 2 oraz to, że układ rozdziela moc zadaną wśród źródeł odnawialnych tak, aby suma ich mocy uzyskiwała wartość wejściowej mocy zadanej z bardzo wysoką dokładnością.

Z przedstawionego poniżej rysunku wynika, że wartość mocy czynnej ustala się i zbliża się do wartości zadanej przy ok. 60. iteracji (rys. 6.7). Rysunek 6.8 wskazuje, jak ustalają się koszty produkcji energii elektrycznej i jak zmienia się średnia cena energii elektrycznej, tak aby jednocześnie utrzymać moc zadaną oraz minimalizować koszty produkcji energii.



Rys. 6.7. Wyniki symulacji (moc czynna i liczba iteracji) dla parametrów  $k_N = 1200$ ,  $k_M = 0,005$ ,  $P_{zad} = 99$  MW – wariant A



Rys. 6.8. Wyniki symulacji (koszt wypadkowy i cena energii) dla parametrów  $k_N = 1200$ ,  $k_M = 0,005$ ,  $P_{zad} = 99$  MW – wariant A

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiągnięte}$	Błąd względny [%]
99	99	0

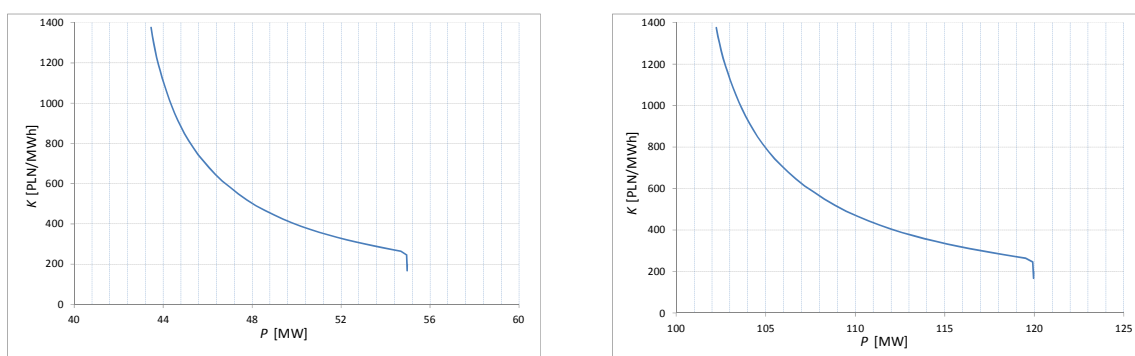
Wyniki przedstawione dla prób dotyczących regulatora mocy czynnej w sieci – wariant A, potwierdzają poprawność jego działania, w tym poprawny rozdział mocy czynnej pomiędzy pracującymi elektrowniami. Układ ten, podobnie jak w sieci promieniowej, cechuje bardzo wysoka dokładność w osiągnięciu wartości zadanej przy uwzględnianiu funkcji kosztów energii elektrycznej dotyczących poszczególnych źródeł.

Wyżej wykonane badania oraz otrzymane wyniki pozwoliły na dalsze kontynuowanie rozbudowy nadrzędnego układu regulacji w sieci CIGRE o regulator mocy biernej.

#### 6.4 WYNIKI BADANIA UKŁADU REGULACJI MOCY CZYNNEJ W SIECI – WARIANT B – PRZYŁĄCZENIE ŹRÓDEŁ W WĘZŁACH B11112, B15112 ORAZ B12112

W ostatnim etapie badania nadrzędnego układu regulacji zmodyfikowano lokalizację odnawialnych źródeł wytwórczych, a także dodatkowo przyłączono do nadrzędnego układu regulacji dwa źródła wytwórcze znajdujące się w węzłach B01112 oraz B14112. Dwa źródła odnawialne, tj. farmę wiatrową oraz farmę fotowoltaiczną, przyłączono do wspólnego węzła B11112, natomiast biogazownie przyłączono oddzielnie do węzła B12112, a elektrownię wodną przyłączono do węzła B14112. Dodatkowo dla układu regulacji mocy czynnej wprowadzono sygnały wartości mocy czynnej

z elektrowni B01-G7 oraz B14-G5 i zamodelowano dla nich charakterystyki kosztów energii w funkcji generowanej mocy czynnej przedstawione na rys. 6.9.



Rys. 6.9. Koszty energii elektrycznej w funkcji mocy czynnej Elektrowni B01-G7 oraz B14-G5 [11]

W związku z dołączeniem do układu regulacji źródeł wytwórczych B01-G7 oraz B14-G5 rozszerzono wektor przestrzeni poszukiwań, który można przedstawić jako:

Tab. 6.2. Wektor przestrzeni poszukiwań regulatora mocy czynnej - sieć wariant B

$W_a$	$W_b$	$W_c$	$W_d$	$W_e$	$W_f$	$P_{PV}$	$P_{FW}$	$P_{HE}$	$P_{BG}$	$P_{G7}$	$P_{G5}$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Po przyłączeniu nowych źródeł wraz ze zmianą sumarycznej mocy źródeł, w celu zbadania działania układu regulacji mocy czynnej wprowadzono nowe wartości zadane zgodnie z tab. 6.3.

Tab. 6.3. Wartości zadawane mocy czynnej w regulatorze mocy czynnej - wariant B

	$100\%P_n$	$87\%P_n$	$74\%P_n$	$65\%P_n$
$P_{zad}$ [MW]	320	279	238	209

Ponownie zweryfikowano działanie regulatora mocy czynnej w zmodyfikowanej sieci wariant B dla pierwszego członu wyrażenia (5.1). Wybrane wyniki dla tych prób przedstawiono na rys. od 6.10 do 6.13.

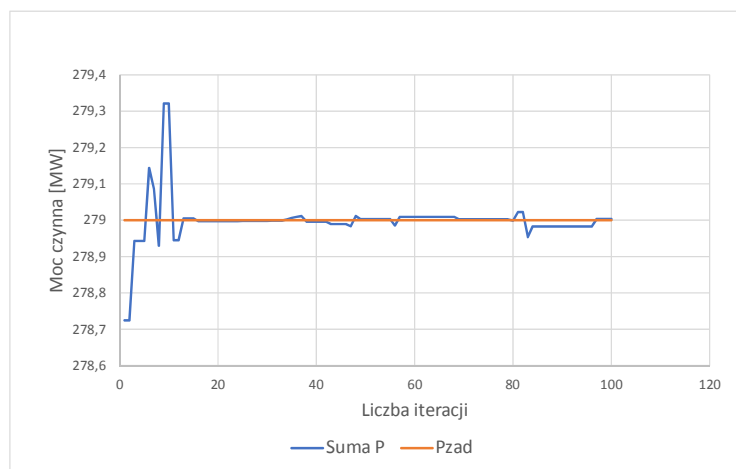
W jednej z prób tego badania ustalono czynną moc zadaną na poziomie 279 MW i sprawdzono, jak układ uzyskuje wartość zadaną. Rysunek 6.10 przedstawia szybkie osiągnięcie tych wartości. Przy 16. iteracji układ regulacji osiągnął dużą zbieżność z pożądaną wartością mocy czynnej.

Z załączonych rysunków wynika, że wartość mocy czynnej ustala się i zbliża się do wartości zadanej między 5. a 20. iteracją (rys. 6.10, 6.13). Człon mocowy funkcji celu ustala się już po kilku pierwszych iteracjach, natomiast drugi człon kosztowy funkcji celu dla dwóch pierwszych warunków  $P_{zad} = 279$  MW ustala się niemal od samego początku prób, natomiast dla  $P_{zad} = 209$  MW zmienia się dynamicznie w ciągu trwania całej próby i ustala się dopiero w ostatnich iteracjach, co świadczy o ciągłym poszukiwaniu przez algorytm najlepszych wartości.

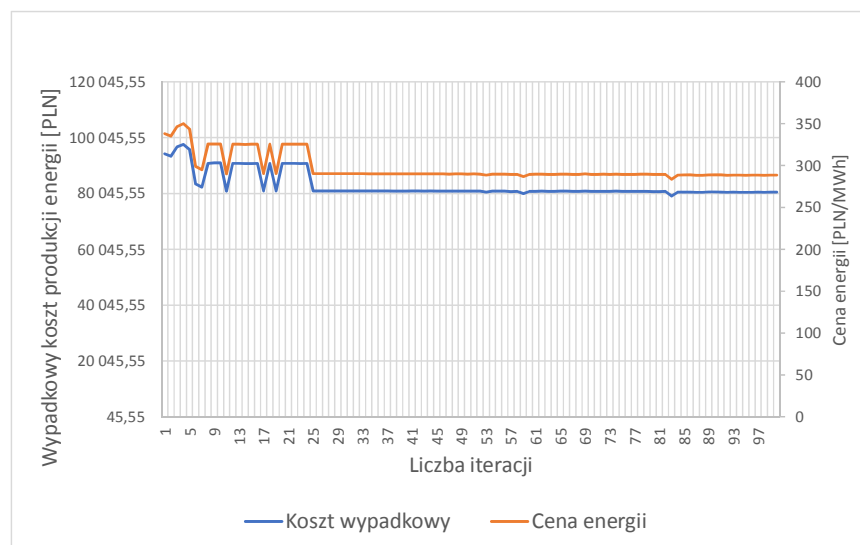
Rysunki 6.11, 6.13 wskazują, jak ustalają się koszty produkcji energii elektrycznej i jak zmienia się średnia cena energii elektrycznej tak, aby jednocześnie utrzymać moc zadaną oraz minimalizować koszty produkcji energii. Dla próby z rys. 6.11 krzywa kosztów ma małe wahania, co wskazuje, że układ szybko znajduje optimum funkcji celu, natomiast dla  $P_{zad} = 209$  MW (rys. 6.13) układ regulacji do końca próby poszukuje minimalnej wartości funkcji celu.

Weryfikując drugi człon funkcji celu, odpowiednio dobrano współczynniki  $k_N$  i  $k_M$ , których wartości wynoszą  $k_N = 2100$  oraz  $k_M = 0,0005$  i otrzymano następujące przebiegi przedstawione na rys. 6.10. Dla tak dobranych współczynników  $k_N$  i  $k_M$  stwierdzono, że funkcja celu jest szybko minimalizowana oraz poprawnie uzyskiwana zostaje wartość zadanej mocy czynnej.

Dla próby o wartości zadanej  $P_{zad} = 279$  MW i dobranych parametrach  $k_N = 2100$ ,  $k_M = 0,0001$  otrzymano następujące przebiegi (rys. 6.11).



Rys. 6.10. Wyniki symulacji (moc czynna i liczba iteracji) dla parametrów  $k_N = 2100$ ,  $k_M = 0,0001$ ,  $P_{zad} = 279$  MW – wariant B



Rys. 6.11. Wyniki symulacji (koszt wypadkowy i cena energii) dla parametrów  $k_N = 2100$ ,  $k_M = 0,0001$ ,  $P_{zad} = 279$  MW – wariant B

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiagniete}$	Błąd względny [%]
279	279,003	0,001

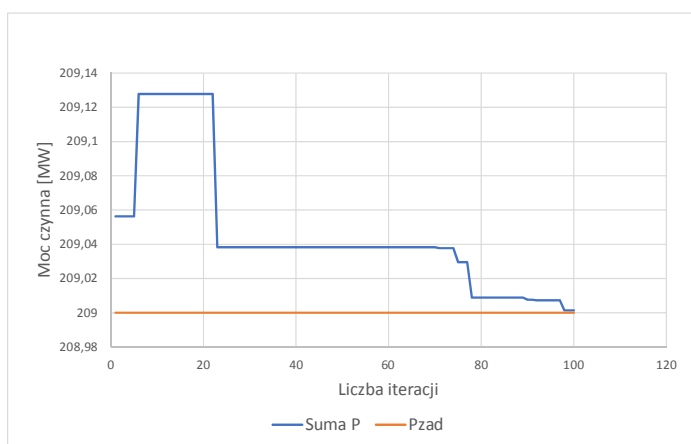
Jak widać na wykreślonych przebiegach, funkcja celu szybko osiąga swoje minimum, a także wartości mocy czynnej źródeł zbliżają się do wartości mocy zadanej.

Błąd względny dotyczący dokładności osiągania wartości zadanej wynosi poniżej 0,01%.

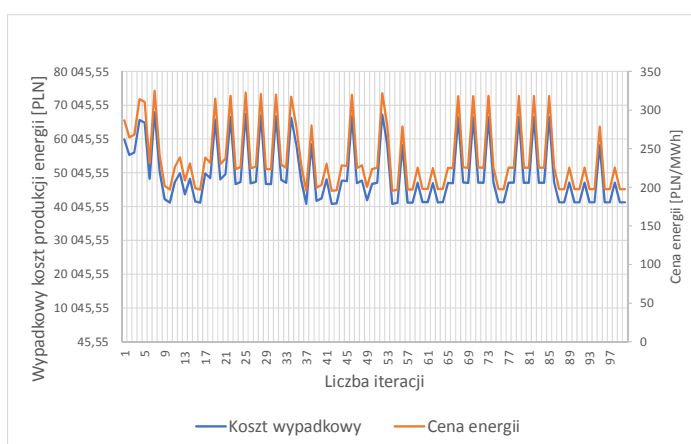
Algorytm przydzielił źródłom następujące wartości mocy czynnej:

$P_{PV}$ [MW]	$P_{FW}$ [MW]	$P_{HE}$ [MW]	$P_{BG}$ [MW]	$P_{G7}$ [MW]	$P_{G5}$ [MW]	$\Sigma P$ [MW]
6,8	36	29	32	55,2	120	279

W kolejnej próbie dotyczącej mocy  $P_{zad} = 209$  MW oraz parametrów  $k_N = 2100$ ,  $k_M = 0,0001$  uzyskano przebiegi przedstawione na rys. 6.12 oraz 6.13.



Rys. 6.12. Wyniki symulacji (moc czynna i liczba iteracji) dla parametrów  $k_N = 2100$ ,  $k_M = 0,0001$ ,  $P_{zad} = 209$  MW – wariant B



Rys. 6.13. Wyniki symulacji (koszt wypadkowy i cena energii) dla parametrów  $k_N = 2100$ ,  $k_M = 0,0001$ ,  $P_{zad} = 209$  MW – wariant B

Błąd względny dotyczący dokładności uzyskiwania wartości zadanej po 100. iteracji wynosi:

$P_{zad}$	$P_{osiągnięte}$	Błąd względny [%]
209	209,001	0,0005

Wyniki przedstawione dla prób dotyczących regulatora mocy czynnej potwierdzają prawidłowość jego działania we wszystkich badanych sieciach. Poprawność dotyczy zarówno rozdziału mocy czynnej pomiędzy występującymi elektrowniami, jak i dokładności uzyskiwania wartości zadanej przy uwzględnianiu funkcji kosztów energii elektrycznej dotyczących poszczególnych źródeł.

Wyżej wykonane badania oraz otrzymane wyniki pozwoliły na kontynuowanie rozbudowy nadrzędnego układu regulacji o regulator mocy biernej.

## 6.5 WYNIKI DOTYCZĄCE UKŁADU REGULACJI MOCY BIERNEJ

### Sieć promieniowa

W celu zbadania nadrzędnego regulatora mocy biernej w sieci promieniowej (rys. 4.1) wprowadzano do sieci zaburzenie w postaci załączenia naprzemiennie baterii kondensatorów oraz dławika. Wartości mocy biernej generowanej przez układy statyczne zawierały się w przedziałach przedstawionych w tab. 6.4.

Tab. 6.4. Wartości mocy biernej zadawanej układom statycznym – sieć promieniowa

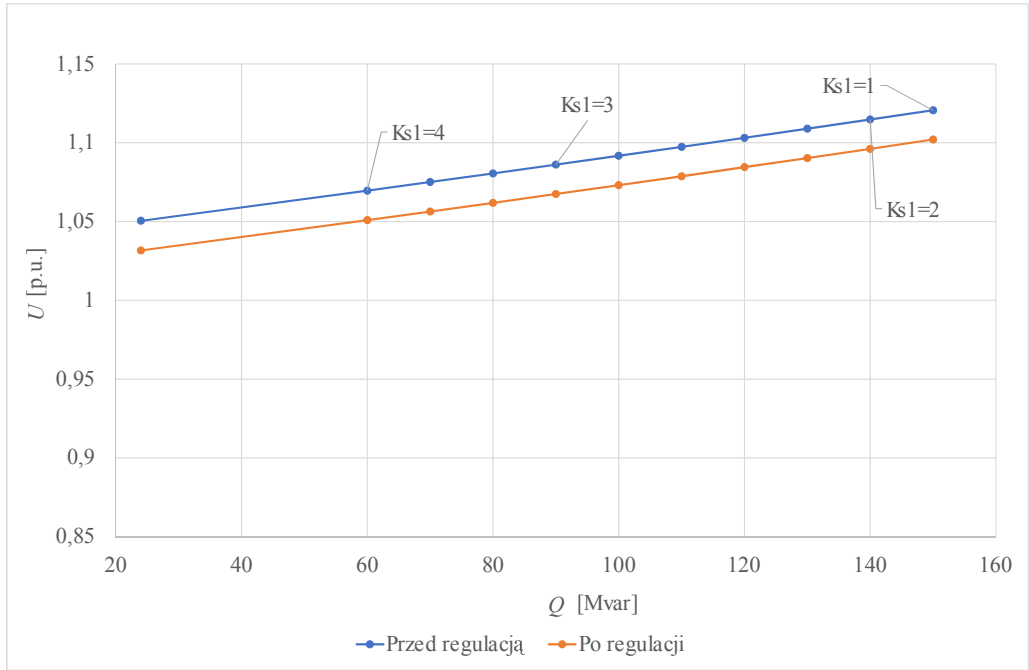
$Q_{poj}$ [Mvar]	-150	-140	-130	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-24
$Q_{ind}$ [Mvar]	300	290	280	270	260	190					

W wyniku zadziałania układu regulacji dla poszczególnych zmian napięcia, wywołanych działaniem układów statycznych, regulator mocy biernej wyznaczył sumaryczną moc bierną potrzebną do utrzymania napięcia na odpowiednim poziomie. Regulator nadrzędny rozdzielił moc bierną na poszczególne źródła wytwarzania tak, aby zniwelować powstałe zaburzenie. W wyniku rozdziału zadanej mocy biernej na poszczególne elektrownie oraz wymuszenia pracy źródeł z mocą bierną wynikającą z wartości  $Q_{zad}$  otrzymano poprawę sytuacji napięciowej.

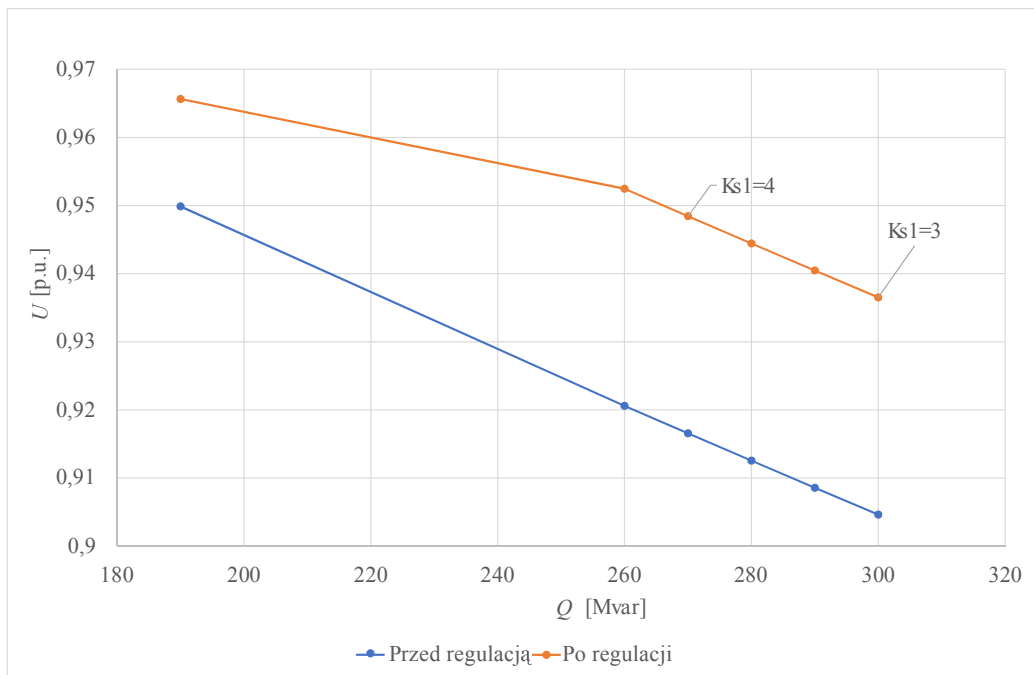
Przy odpowiednio dobranych parametrach regulatora mocy biernej można uzyskać znaczną poprawę pracy sieci. W algorytmie wykonuje się to przez zmianę współczynnika  $k_s$  w równaniu (5.2). W wyniku działania nadrzędnego układu regulacji, w tym również regulatora mocy biernej, układ wymusza pracę źródeł tak, aby po przekroczeniu napięcia w punkcie przyłączenia o wartość +/- 5% kompensować moc bierną powodującą zaburzenie w postaci spadku napięcia.

Odpowiedź układu regulacji na zmianę napięcia w punkcie przyłączenia wywoływana zmianą wielkości załączanej baterii kondensatorów znajduje się na rys. 6.14. Natomiast na rys. 6.15 przedstawiono odpowiedź układu regulacji na załączenie dławika. Na wykresach zaznaczono punkty, w których dokonywano poprawy pracy regulatora przez zmianę wartości współczynnika  $k_s$ .





Rys. 6.14. Zależność napięcia od mocy biernej w punkcie przyłączenia (załączenie baterii kondensatorów) – sieć promieniowa



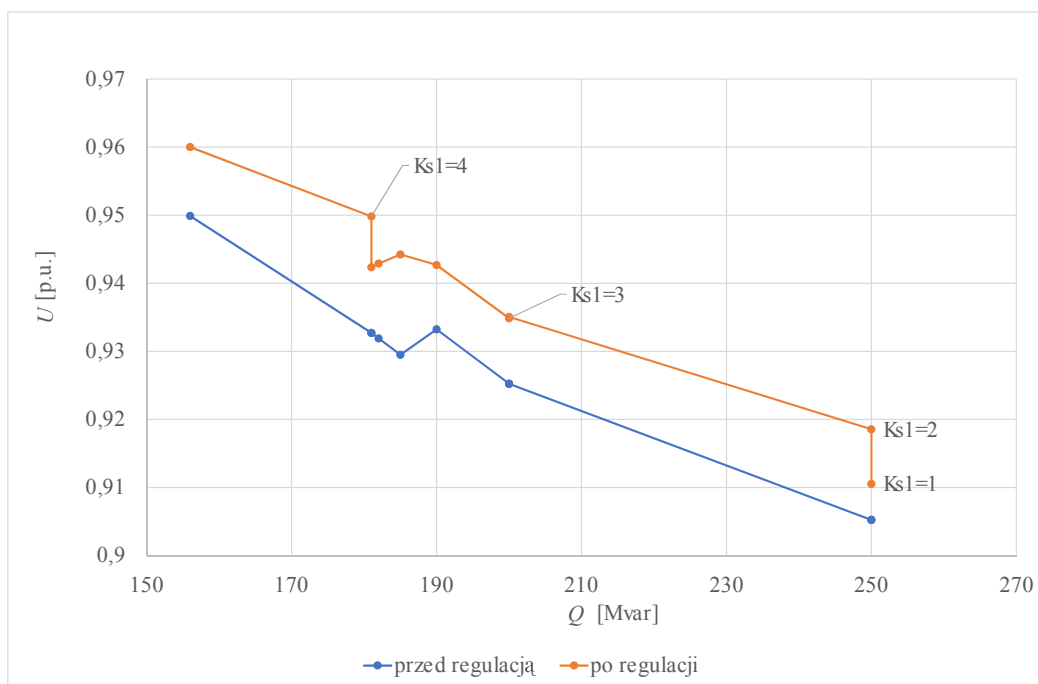
Rys. 6.15. Zależność napięcia od mocy biernej w punkcie przyłączenia (załączenie dławika) – sieć promieniowa

W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że układ działa poprawnie i dąży do przeciwdziałania zmianom napięcia, wspomagając tym samym możliwości regulacyjne w sieci promieniowej.

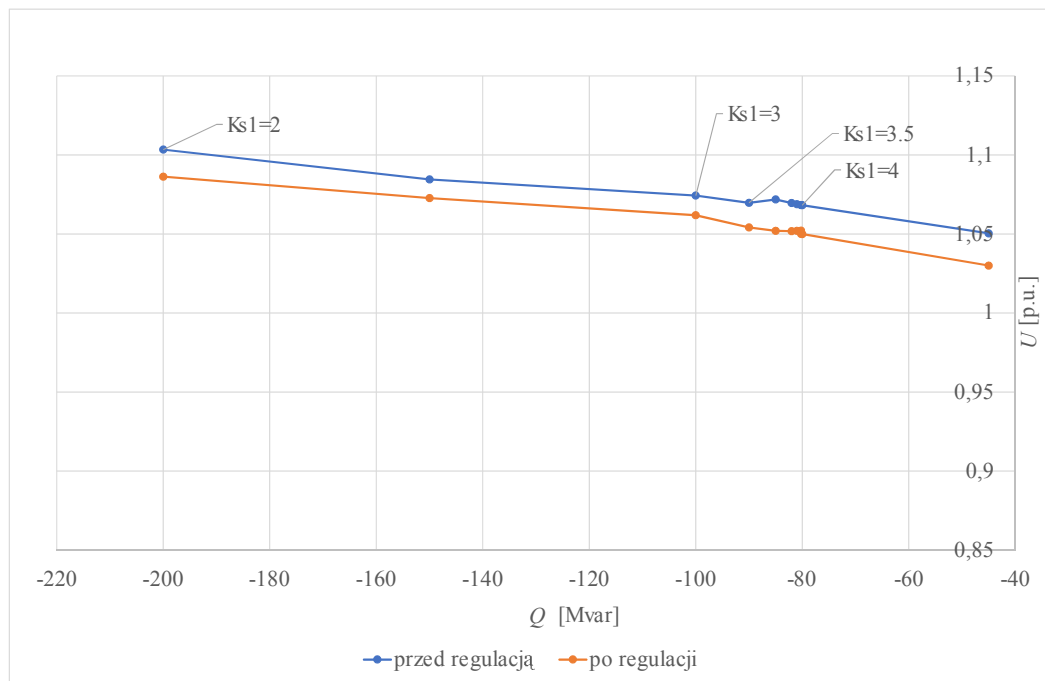
### Sieć – wariant A

W układzie sieci wariant A układ regulacji został zmodyfikowany tak, aby układ utrzymywał napięcia w dozwolonych zakresach w dwóch punktach przyłączenia, tj. węzeł B11113 oraz B12111. W przypadku kontrolowania napięcia w dwóch punktach algorytm wyznacza dwie wartości zadane mocy biernej odpowiednio dla wybranych węzłów. Na podstawie obliczonych przez regulator mocy biernej dwóch wartości zadanych  $Q_{zad1}$  oraz  $Q_{zad2}$ , nadrzędny regulator rozdziela te wartości tzn.  $Q_{zad1}$  pomiędzy farmę wiatrową oraz biogazownię, a  $Q_{zad2}$  pomiędzy elektrownię wodną i farmę fotowoltaiczną. Odpowiednia generacja i pobór mocy biernej przez źródła wytwarzania przyczyniają się do przeciwdziałania zmianom napięcia. Na rys. 6.16 i 6.17 przedstawiono zależności napięcia od mocy biernej. Charakterystyki te przedstawiają działanie regulatora w wyniku wystąpienia zakłócenia w postaci załączenia dławika lub baterii kondensatorów.

W wyniku wyznaczenia przez układ regulacji sumarycznej mocy biernej następuje przydzielenie jej poszczególnym źródłom.



Rys. 6.16. Zależność napięcia od mocy biernej w węźle B13112 (załączenie dławika) – wariant A



Rys. 6.17. Zależność napięcia od mocy biernej w węźle B13112 (załączanie baterii kondensatorów) – wariant A

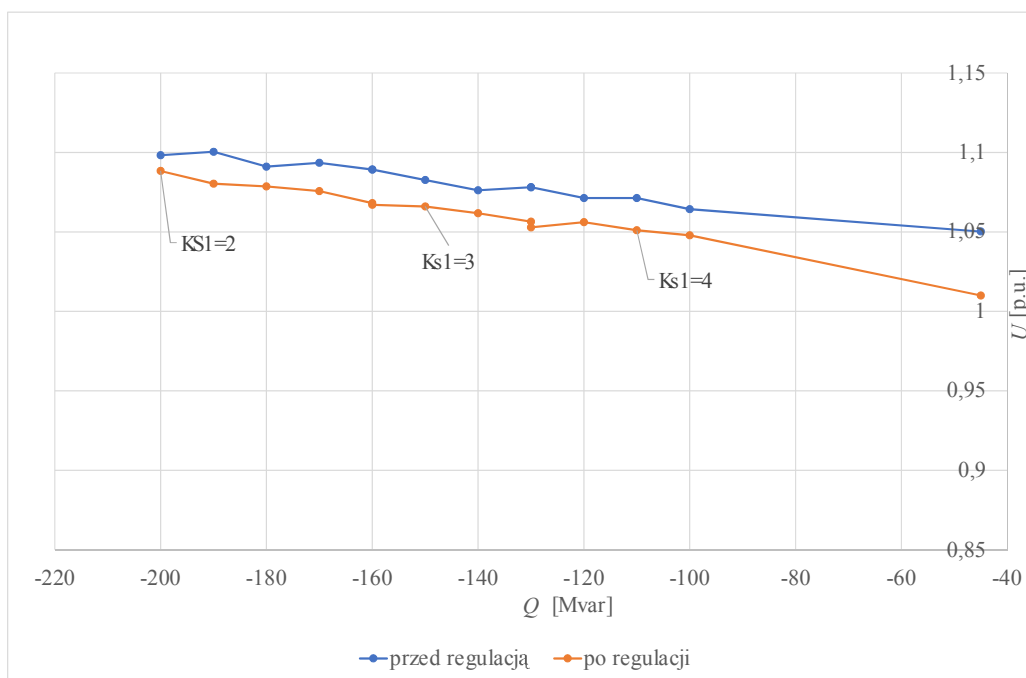
Układ regulacji mocy biernej dostrajano za pomocą dwóch wskaźników wzmacniania regulacji  $K_{s1}$  i  $K_{s2}$  odpowiednio dla węzła B13112 oraz dla węzła B11112.

Układ regulacji poprawia sytuację napięciową w sieci – wariant A. Nie zawsze jednak układ poprawi sytuację napięciową tak, aby napięcia znajdowały się w granicach napięcia dopuszczalnego  $\pm 5\%$ . Wynika to z faktu, że zaburzenia w sieci w tych punktach są bardzo duże w stosunku do możliwości generowania maksymalnej mocy biernej przez wszystkie źródła odnawialne.

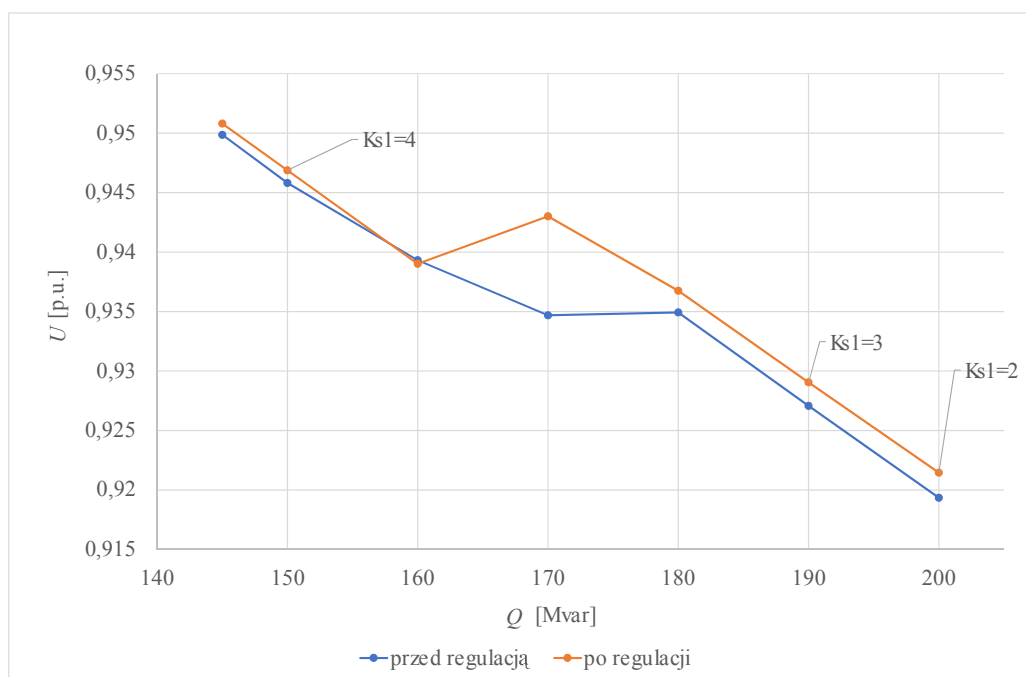
### Sieć – wariant B

W wariantcie B sieci układ regulacji mocy biernej warunkował wyznaczenie jednej wartości zadanej  $Q_{zad}$  w zależności od sytuacji napięciowej w węźle B13112. Ta wartość zostawała rozdzielana pomiędzy wszystkie elektrownie w pierścieniu 110 kV, w tym również elektrownie konwencjonalne B01-G7 oraz B14-G5. Zwiększając możliwości generacyjne mocy biernej przez włączenie dwóch elektrowni konwencjonalnych spowodowano, że układ regulacji mógł znacząco oddziaływać na węzeł B13112, do którego nie przyłączano żadnego źródła. Zaburzenia realizowano w tym węźle przez załączanie układów statycznych.

Na rys. 6.18 oraz rys. 6.19 przedstawiono, jak układ regulacji wpływa na napięcie w węźle B13112. W tym przypadku również należało odpowiednio dobrać współczynnik wzmocnienia  $K_{s1}$ , który powodował poprawę działania układu regulacji.



Rys. 6.18. Zależność napięcia od mocy biernej w węźle B13112 (załączanie baterii kondensatorów) – wariant B



Rys. 6.19. Zależność napięcia od mocy biernej w węźle B13112 (załączanie dławika) – wariant B

W przypadku pracy indukcyjnej źródeł wytwórczych układ lepiej radzi sobie z bilansowaniem mocy biernej. Dla pracy pojemnościowej sytuacja napięciowa poprawiła się w niewielkim stopniu, a w punkcie przy załączeniu dławika o mocy 160 Mvar układ nie spowodował poprawy sytuacji napięciowej węzła.

## 7 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiona rozprawa doktorska wpisuje się w badania dotyczące układów regulacji wykorzystujących połączenie nowych metod metaheurystycznych oraz metod wykorzystujących teorię zbiorów rozmytych.

Wykazano, że nowe metody rozwiązywania zagadnień nieliniowych dotyczących problemów sieci i systemów elektroenergetycznych, w tym problemów napięciowych, są bardzo skuteczne, a obliczenia są bardzo szybkie.

Metodyka zaprezentowana w pracy umożliwia analizę systemu elektroenergetycznego pod kątem warunków napięciowych oraz proponuje optymalną pracę źródeł wytwórczych, przy uwzględnieniu ograniczeń dotyczących ich obciążenia mocą bierną. Pozwala to na zwiększenie zapasu stabilności napięciowej systemu oraz zwiększenie możliwości regulacyjnych w systemie. Podstawą opracowanej metodyki są wymagania dotyczące stabilnej pracy systemu elektroenergetycznego.

Działanie nadrzędnego układu regulacji polega na wyszukaniu rozwiązania pozwalającego na przeciwdziałanie niekorzystnym zmianom napięcia, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań operatorów dotyczących warunków napięciowych oraz częstotliwościowych dla źródeł wytwórczych.

Opracowaną metodykę ograniczania generowanej mocy czynnej oraz metodykę określania i przydzielania mocy biernej źródłom wytwarzania zweryfikowano dla sieci promieniowej i wielowęzłowego systemu testowego.

Opracowano algorytm dotyczący układu regulacji nadrzędnej, w którym rozdzielono układ regulacji mocy czynnej od układu regulacji mocy biernej z uwagi na koncepcję wykorzystania dwóch różnych metod regulacyjnych.

Opracowany algorytm typuje poziom mocy czynnej dla źródeł wytwórczych, optymalizując go według kryterium kosztowego oraz określa i przydziela poziom mocy biernej, który musi zostać osiągnięty w celu wspomagania pracy sieci. Określenie przez układ regulacji sumarycznej mocy biernej, jaką należy dostarczyć do punktu sieci, w której napięcia odbiegają od wartości dopuszczalnych, pozwala na wykorzystanie zdolności generacyjnych mocy biernej odnawialnych źródeł wytwórczych, co wspomaga pracę systemu.

Przeprowadzono weryfikację działania algorytmu przez grupowanie odnawialnych źródeł wytwórczych oraz zmianę ich lokalizacji uzyskując poprawę warunków pracy systemu elektroenergetycznego.

Otrzymane wyniki badań wskazują, że zaproponowany nadrzędny układ regulacji realizuje z dużą dokładnością przedstawione przed nim zadania skutkujące poprawą elastyczności sieci i zapewnieniem możliwości regulacyjnych systemu elektroenergetycznego. Dodatkowo układ regulacji może zostać wykorzystany przez operatora systemu w sytuacjach wymagających ograniczenia mocy źródeł, do szybkiego wyboru źródeł, których moc należy ograniczyć tak, aby koszty produkcji energii elektrycznej były jak najniższe.

Wykonane w ramach realizacji rozprawy analizy dały podstawę do sformułowania następujących wniosków:

- opracowana metodyka oddziałuje w szczególności na te węzły w sieci, których poziomy napięcie odbiegają od wymagań stawianych przez operatorów systemów elektroenergetycznych,
- zaproponowany algorytm nadrzędnego układu regulacji pozwala na analizę sieci elektroenergetycznej pod kątem napięciowym oraz mocowym dla dowolnej liczby węzłów w badanym systemie, jak również dla dowolnie wybranego węzła,
- zaproponowana metodyka działania regulatora mocy biernej pozwala wyznaczyć wartość mocy biernej, która dostarczona do wybranych punktów sieci umożliwia utrzymanie napięcie w węzłach w granicach wartości dopuszczalnych,
- zaproponowany algorytm regulacji mocy czynnej pozwala na wskazanie optymalnej mocy generowanej odnawialnych źródeł energii w sytuacjach wymagających jej ograniczenia, przy uwzględnieniu kosztów wytwarzania energii elektrycznej przez te źródła,
- wykonywanie analiz w programie rozplwowym umożliwia wykorzystanie własnych skryptów, które istotnie skracają czas analizy i pozwalają na automatyzację żmudnych i powtarzających się czynności,
- przedstawione w rozprawie wyniki modelowania systemów elektroenergetycznych umożliwiają analizę różnych stanów pracy sieci, a także mogą posłużyć przy podejmowaniu decyzji dotyczących ewentualnego jej rozwoju, czy też zmiany lokalizacji źródeł wytwórczych,
- czas wykonywania obliczeń zależy jest od złożoności systemu elektroenergetycznego, w tym liczby przyłączonych źródeł wytwórczych, a także doboru parametrów wykorzystywanych metod (zakresy napięć, liczby iteracji, liczby populacji itp.).

Biorąc pod uwagę przedstawione w rozprawie analizy oraz wyniki badań wykazano i udowodniono prawdziwość tezy stwierdzającej, że nadrzędne sterowanie grupą odnawialnych źródeł energii elektrycznej:

- koordynuje działania regulacyjne poszczególnych elektrowni, przez co poprawia możliwości regulacyjne systemu elektroenergetycznego, zwiększając jego bezpieczeństwo,
- skutkuje wzrostem elastyczności oraz odporności systemu elektroenergetycznego na zakłócenia.

W dalszych badaniach przedstawiony w rozprawie nadrzędny układ regulacji należałoby rozbudować o elementy umożliwiające jego pracę w czasie rzeczywistym, tak aby przydzielał on wartości mocy biernej źródłom i potrafił dostosowywać się do zmieniających się w czasie warunków napięciowych.

## 8 BIBLIOGRAFIA

1. Boyd R., Richerson P. J.: „Culture and the evolutionary process”. University of Chicago Press, Chicago, 1988.
2. Chen G., Chen G., Pham T. T.: „Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems”. Boca Raton, FL, 2000.
3. Dahat S. A., Isasare M. S., Argelwar R. P., Shanu T.: „Co-ordinated tuning of PSS with TCSC damping controller in single machine power system using PSO”, 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), 2018, s. 301–306.
4. Divya K., Srinivasan S.: „Optimal siting and sizing of DG in Radial Distribution System and identifying fault location in Distribution System integrated with Distributed Generation”, 2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 2016, t. 01, s. 1–7.
5. Fu Q., Tong N.: „A Complex-Method-Based PSO Algorithm for the Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System”, 2010 Second International Conference on Information Technology and Computer Science, 2010, s. 134–137.
6. Fukuyama Y.: „Parallel particle swarm optimization for reactive power and voltage control verifying dependability”, 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2015, s. 304–310.
7. Ghatak S. R., Acharjee P.: „Optimal Allocation of DG Using Exponential PSO with Reduced Search Space”, 2016 Second International Conference on Computational Intelligence Communication Technology (CICT), 2016, s. 489–494.
8. Guan T., Zhuo F.: „An improved SA-PSO global maximum power point tracking method of photovoltaic system under partial shading conditions”, 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe), 2017, s. 1–5.
9. Iwata S., Fukuyama Y.: „Dependability verification of parallel differential evolutionary particle swarm optimization based voltage and reactive power control”, 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2016, s. 1–6.
10. Jalilvand A., Keshavarzi M. D., Khatibi M.: „Optimal tuning of PSS parameters for damping improvement using PSO algorithm”, 2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010, s. 1–6.
11. Janiczek R.: „Eksploracja elektrowni parowych”. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1992.
12. Kaur N., Jain S. K.: „Placement of distributed generators for loss minimization and voltage improvement using particle swarm optimization”, 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), 2016, s. 1–5.
13. Liu C. L., Luo Y. F., Huang J. W., Liu Y. H.: „A PSO-based MPPT algorithm for photovoltaic systems subject to inhomogeneous insolation”, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, 2012, s. 721–726.
14. Miyatake M., Veerachary M., Toriumi F., Fujii N., Ko H.: „Maximum Power Point Tracking of Multiple Photovoltaic Arrays: A PSO Approach”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, t. 47, nr 1, 2011, s. 367–380.
15. Mukhopadhyay B., Mandal R. K.: „Voltage compensation using PSO-PI controlled STATCOM in a DFIG-based grid-connected wind energy system”, 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 2016, s. 88–93.
16. Niazi G., Lalwani M.: „PSO based optimal distributed generation placement and sizing in power distribution networks: A comprehensive review”, 2017 International Conference on Computer, Communications and Electronics (Comptelix), 2017, s. 305–311.
17. Oliveira F. M., Silva S. A. O. da, Durand F. R., Sampaio L. P.: „Application of PSO method for maximum power point extraction in photovoltaic systems under partial shading conditions”, 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, s. 1–6.

18. Patel A., Gandhi P. R.: „Damping oscillations in detail model of synchronous generator using PSO based PSS”, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, s. 1–6.
19. Rafiee Z., Ganjefar S., Fattahi A.: „A new PSS tuning technique using ICA and PSO methods with the fourier transform”, 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2010, s. 806–811.
20. Rahmani R., Khairuddin A., Cherati S. M., Pesaran H. A. M.: „A novel method for optimal placing wind turbines in a wind farm using particle swarm optimization (PSO)”, 2010 Conference Proceedings IPEC, 2010, s. 134–139.
21. Rayudu K., Yesuratnam G., Ali M., Jayalaxmi A.: „Optimal reactive power dispatch based on particle swarm optimization and LP technique”, 2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT), 2016, s. 1–7.
22. Rayudu K., Yesuratnam G., Surendhar K., Jayalaxmi A.: „Voltage stability enhancement based on particle swarm optimization and LP technique”, 2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT), 2016, s. 1–7.
23. Shafiullah M., Rana M. J., Abido M. A.: „Power system stability enhancement through optimal design of PSS employing PSO”, 2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2017, s. 26–31.
24. Shafiullah M., Rana M. J., Alam M. S., Uddin M. A.: „Optimal placement of Phasor Measurement Units for transmission grid observability”, 2016 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET), 2016, s. 1–4.
25. Shi Y., Eberhart R.: „A modified particle swarm optimizer”, 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360), 1998, s. 69–73.
26. Singh H., Srivastava L.: „Optimal VAR control for real power loss minimization and voltage stability improvement using Hybrid Multi-Swarm PSO - IEEE Conference Publication”. [Online:] <https://ieeexplore.ieee.org/document/7530198/>. [Dostęp: 01-lip-2018].
27. Staviță A., Gavrițaș M., Stahie V.: „Optimal tuning and placement of Power System Stabilizer using Particle Swarm Optimization algorithm”, 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2012, s. 242–247.
28. Varghese D., Janamala V.: „Optimal location and parameters of GUPFC for transmission loss minimization using PSO algorithm”, 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 2017, s. 1–6.
29. Zadeh L. A.: „Fuzzy sets”. *Information and Control*, t. 8, nr 3, 1965, s. 338–353.
30. Zhang X., Wang X., Qi X.: „Reactive power optimization for distribution system with distributed generations based on AHSPSO algorithm”, 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2016, s. 1–4.
31. Zheng Y., Wang W., Chen W., Li Q.: „Research on MPPT of photovoltaic system based on PSO under partial shading condition”, 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 2016, s. 8654–8659.
32. „Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 16 marca 2017 r. w sprawie ceny referencyjnej energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w 2017 r. oraz okresów obowiązujących wytwórców, którzy wygrali aukcje w 2017 r.”: Ministerstwo Energii, 2017.