POLITECHNIKA
GDAŃSKA
Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Imię i nazwisko autora rozprawy: Agata Szultka
Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Sterowanie pracą sieci elektroenergetycznej z wykorzystaniem elektrochemicznych zasobników energii**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Control of the power network using electrochemical energy storage units**

Promotor *podpis*
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny, prof. zw. PG
Promotor pomocniczy *podpis*
Dr inż. Robert Małkowski

Gdańsk, rok 2019

POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Elektrotechniki i Automatyki

OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Agata Szultka

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej: Sterowanie pracą sieci elektroenergetycznej z wykorzystaniem elektrochemicznych zasobników energii do celów naukowych lub dydaktycznych.[1]

Gdańsk, dnia .....
.....
podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),[2] a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem prof. dr inż. Zbigniewem Lubośnym oraz promotorem pomocniczym dr inż. Robertem Małkowskim.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia .....
.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczaniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia .....
.....
podpis doktoranta
*) niepotrzebne skreślić

[1] Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

[2] Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE ... 6
ABSTRACT ... 7
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW ... 5
1. WSTĘP ... 6
2. TEZA I CEL PRACY ... 11
Teza pracy: ... 11
Cel pracy: ... 11
Zakres rozprawy: ... 11
3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZASOBNIKÓW ENERGII PRZEZNACZONYCH DLA SIECI DYSTRYBUCYJNYCH ... 12
3. 1. Rodzaje zasobników energii ... 12
3. 2. Przekształtnik zasobnika energii ... 16
4. PROBLEMY W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ ORAZ MOŻLIWOŚCI ICH ELIMINACJI POPRZEZ WYKORZYSTANIE ZASOBNIKÓW ENERGII ... 21
4. 1. Wstęp ... 21
4. 2. Wyrównywanie obciążenia, redukcja szczytów obciążenia ... 21
4. 3. Ograniczenie strat w sieci elektroenergetycznej ... 24
4. 4. Sterowanie poziomem napięcia ... 27
4. 5. Eliminacja asymetrii obciążenia oraz wyższych harmonicznych ... 32
4. 6. Współpraca zasobników energii z odnawialnymi źródłami energii ... 37
4. 7. Zasilanie awaryjne ... 38
4. 8. Eliminacja przeciążenia elementów przesyłowych ... 38
4. 9. Praca programowa ... 39
5. METODY WYBORU LOKALIZACJI ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ ... 41
6. ALORYTM GENETYCZNY OKREŚLANIA LOKALIZACJI ZASOBNIKÓW ENERGII ... 46
6. 1. Wprowadzenie do zagadnień związanych z wykorzystaniem i zastosowaniem algorytmów genetycznych ... 46
6. 2. Opis algorytmu genetycznego wykorzystanego do określenia lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej ... 48
6. 3. Analiza pracy sieci SN z wykorzystaniem opracowanego algorytmu lokalizacyjnego ... 52
7. FUNKCJA CELU ALGORYTMU LOKALIZACYJNEGO I JEJ KOMPONENTY ... 63

7. 1. Polioptymalizacja – wprowadzenie ... 63
7. 2. Wielokryterialna funkcja celu algorytmu lokalizacyjnego ... 66
7. 2. 1. Składowa funkcji celu związana z poziomem napięcia w sieci elektroenergetycznej ... 67
7. 2. 2. Koszt instalacji zasobników energii ... 67
7. 2. 3. Straty energii w sieci elektroenergetycznej ... 68
7. 2. 4. Obciążenie elementów przesyłowych ... 69
8. STEROWANIE ROZMYTE ZASOBNIKIEM ENERGII ... 71
8. 1. Wstęp ... 71
8. 2. Przegląd rozwiązań stosowanych do regulacji zasobników energii ... 72
8. 3. Elementy logiki rozmytej - wprowadzenie ... 74
8. 4. Opis regulatora rozmytego użytego do sterowania zasobnikami energii ... 76
8. 4. 1. Wstęp ... 76
8. 4. 2. Blok rozmywania – opis funkcji przynależności ... 76
8. 4. 3. Blok decyzyjny ... 82
8. 4. 4. Blok wyostrzania ... 84
8. 4. 5. Ograniczenia dla układu sterowania zasobnikiem energii ... 84
8. 4. 6. Strojenie regulatora zasobnika energii ... 85
8. 5. Analiza działania regulatora zasobnika energii ... 87
8. 5. 1. Struktura modelowanego układu ... 87
8. 5. 2. Wyniki przeprowadzonej analizy ... 89
9. ANALIZA PRACY UKŁADU REGULACJI PRZEPROWADZONA NA PRZYKŁADOWYM MODELU SIECI DYSTRYBUCYJNEJ ... 94
9. 1. Opis analizowanej sieci nn ... 94
9. 2. Wyniki symulacji ... 98
10. PODSUMOWANIE ... 122
BIBLIOGRAFIA: ... 124
SIPS RYSUNKÓW ... 130
SIPS TABEL ... 135
ZAŁĄCZNIK 1. ... 136

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

AG – algorytm genetyczny,
BESS – *ang. Battery Energy Storage System* – zasobnik energii,
BMS – *ang. Battery Management System* – układ monitorujący pracę zasobnika energii,
C_t – średnia cena energii elektrycznej,
F – funkcja celu algorytmu genetycznego do doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii,
K – koszt instalacji zasobników energii,
L_{obc} – obciążenie elementu sieci elektroenergetycznej,
M – funkcja celu algorytmu ewolucyjnego do doboru parametrów regulatora rozmytego zasobnika energii;
μ_{O_max} – funkcja przynależności dla stanu pracy sieci określonej jako "obciążona",
μ_{O_min} – funkcja przynależności dla stanu pracy sieci określonej jako "nieobciążona",
μ_{P-} – funkcja przynależności dla pracy zasobnika energii określonej jako "pobieraj moc czynną z sieci",
μ_{P+} – funkcja przynależności dla pracy zasobnika energii określonej jako "dostarczaj moc czynną do sieci",
μ_{Q-} – funkcja przynależności dla pracy zasobnika energii określonej jako "pobieraj moc bierną z sieci",
μ_{Q+} – funkcja przynależności dla pracy zasobnika energii określonej jako "dostarczaj moc bierną do sieci",
$\mu_{SoC_nalad.}$ – funkcja przynależności dla stanu naładowania zasobnika energii określonego jako "naładowany",
$\mu_{SoC_rozlad.}$ – funkcja przynależności dla stanu naładowania zasobnika energii określonego jako "rozładowany",
μ_{u_max} – funkcja przynależności dla napięcia określonego jako "zbyt wysokie",
μ_{u_min} – funkcja przynależności dla napięcia określonego jako "zbyt niskie",
N – liczba węzłów w sieci,
nn – niskie napięcie;
OZE – odnawialne źródła energii;
P_{ZE} – moc czynna zasobnika energii,
Q_{ZE} – moc bierna zasobnika energii,
R/X – stosunek rezystancji do reaktancji elementów sieci elektroenergetycznej,
SN – średnie napięcie,
SoC – *ang. State of Charge* – stan naładowania zasobnika energii,
T – okres analizy / liczba przyjętych scenariuszy zmienności obciążenia sieci,
t – kolejna iteracja zmienności obciążenia sieci,
t_p – przewidywany czas pracy zasobników energii / czas trwania inwestycji,
U_i – wartość napięcia w węźle i w sieci elektroenergetycznej odniesiona do napięcia znamionowego sieci,
W_{UT} – koszty związane z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia w sieci,
ΔP – starty mocy czynnej,
ΔQ – starty mocy biernej,
ZE – zasobnik energii.

STRESZCZENIE

Niniejsza rozprawa doktorska przedstawia możliwości wykorzystania elektrochemicznych zasobników energii w celu poprawy pracy sieci dystrybucyjnej. Analizę wykonano w programie rozpływowym Power Factory przy wykorzystaniu modeli sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia. Celem pracy jest optymalne wykorzystanie zasobników energii w sieci, dzięki ich odpowiedniej lokalizacji oraz sterowaniu nimi. Do wyboru lokalizacji zasobników energii został wykorzystany algorytm genetyczny opracowany w języku DPL programu Power Factory. Do sterowania zasobnikami energii posłużono się regulatorem stworzonym na bazie logiki rozmytej.

Rozprawa zawiera przegląd literatury w zakresie możliwości wykorzystania zasobników energii w sieci, metod wyboru lokalizacji oraz sposobów regulacji zasobników energii. Omówiono wpływ wprowadzania mocy czynnej i biernej na poziom napięcia w poszczególnych węzłach w sieci. Przedstawiono algorytm genetyczny wykorzystany do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci oraz regulator zasobnika energii. Opisana została także funkcja celu algorytmu lokalizacyjnego. W pracy doktorskiej zawarto wyniki symulacji pracy sieci średniego napięcia przy uwzględnieniu odpowiedniej lokalizacji zasobników energii pod względem kryterium poprawy poziomu napięcia w sieci. Analiza pracy sieci niskiego napięcia została zrealizowana zarówno przy odpowiedniej lokalizacji zasobników energii w sieci, jak ich właściwym sterowaniu. Wykazano, że odpowiednia lokalizacja i sterowanie zasobnikami energii ma wpływ na obniżenie kosztów związanych z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia w sieci i stratami mocy, a także umożliwia instalację zasobników energii o sumarycznie mniejszej mocy znamionowej i niższej pojemności.

ABSTRACT

This doctoral dissertation presents the possibilities of using electrochemical energy storage to improve the operation of the distribution network. The analysis was performed in the Power Factory reflow program using medium and low voltage distribution network models. The purpose of the work is the optimal use of energy storage in the network, thanks to their appropriate location and control. The genetic algorithm developed in the Power Factory DPL language was used to select the location of the energy storage. A controller created on the basis of fuzzy logic was used to control energy storage units.

The dissertation provides a review of the literature on the possibilities of using energy storage in the network, methods of location selection and ways to control energy storage. The impact of introducing active and reactive power on the voltage level in individual nodes in the network was discussed. The genetic algorithm used to select the location of energy storage in the network and the energy storage regulator were presented. The purpose function of the localization algorithm has also been described. The doctoral dissertation contains the results of simulation of medium voltage network operation taking into account the appropriate location of energy storage units in relation to the criterion of improving the voltage level in the network. The analysis of low voltage network operation was carried out both with the proper location of energy storage devices in the network and their proper control. It has been shown that the proper location and control of energy storage units has an impact on reducing the costs associated with failure to meet the required voltage level in the network and power losses, and also allows the installation of energy storage units with a total lower rated power and lower capacity.

1. WSTĘP

Operatorzy sieci dystrybucyjnych zmagają się z licznymi wyzwaniami. Jednym z nich jest dostarczenie coraz większej mocy odbiorcom, przy utrzymaniu wymaganych parametrów jakościowych energii. Innym wyzwaniem są odnawialne źródła energii (OZE) instalowane w głębi sieci dystrybucyjnych, które w ostatnich latach stanowią przyczynę problemów związanych z niedotrzymaniem wymaganej wartości napięcia. Panele fotowoltaiczne (które są przykładowym OZE) coraz częściej pojawiają się u odbiorców w roli mikroźródeł. Największa produkcja energii elektrycznej przez źródła fotowoltaiczne występuje często w okresie małego obciążenia sieci. Zjawisko to jest przyczyną problemów napięciowych, przede wszystkim spotykanych w sieci niskiego napięcia (nn). Ponadto energia produkowana przez OZE niekiedy nie może być wprowadzona do sieci ze względu na zbyt wysoką wartość napięcia w węźle przyłączenia. Częstym problemem pojawiającym się w sieci nn jest asymetria napięciowa, najczęściej wynikająca z niesymetrycznego poboru lub generacji mocy.

W celu wyeliminowania wyżej wymienionych problemów można dokonać przebudowy sieci, np. poprzez skracanie obwodów lub zwiększenie przekroju poprzecznego przewodów elektroenergetycznych. Jednak to rozwiązanie jest czasochłonne, kosztowne i nie wyklucza wystąpienia dalszych problemów związanych z instalacją kolejnych OZE. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie zasobników energii, które pozwalają zarządzać przepływem mocy czynnej i biernej w sieci elektroenergetycznej.

Zasobniki energii, poprzez możliwość gromadzenia w nich energii mogą przyczynić się do eliminacji negatywnego wpływu stochastycznej zmienności mocy generowanej przez OZE. W konsekwencji mogą ograniczyć problemy napięciowe poprzez wyrównanie bilansu mocy czynnej i biernej, a także obniżyć szczyty obciążenia sieci, zmniejszając jednocześnie straty mocy oraz eliminując przeciążenia elementów przesyłowych [1]. Jednakże koszt związany z instalacją zasobników energii pozostaje nadal wysoki. Racjonalne jest zatem skupienie się na efektywnym ich wykorzystaniu, tj. spełnieniu założonych celów przy jak najniższym koszcie instalacji. Czynnikiem wpływającym na efektywne wykorzystanie zasobników energii jest odpowiedni dobór ich mocy, pojemności jak i lokalizacji w sieci [2]. Innym ważnym elementem optymalizacji jest właściwe sterowanie zasobnikami energii,

które pozwala na wydajną pracę zasobnika energii poprzez odpowiednie zarządzanie generowaną / pobieraną mocą czynną i bierną [1].

Znaczna część niniejszej pracy jest poświęcona zagadnieniu związanym z poszukiwaniem optymalnej lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej, a także ich parametrów. Optymalizacja polega tu na maksymalizowaniu funkcji celu *F*, której składowe są przeliczane do jednego parametru – kosztów. Funkcja celu *F* złożona jest ze składowych: składowej odpowiedzialnej za koszt inwestycji związany z instalacją zasobników energii, składowej odpowiadającej kosztom niedotrzymania wymaganego poziomu napięcia w sieci, składowej związanej ze stratami mocy czynnej oraz składowej odpowiedzialnej za koszt związany z przeciążeniem elementów przesyłowych sieci elektroenergetycznej.

Optymalizację lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej zrealizowano przy użyciu algorytmu genetycznego (AG) zaimplementowanego w programie Power Factory [3], [4]. Przegląd literatury pod kątem stosowanych metod do określania lokalizacji zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych – głównie dystrybucyjnych, został przedstawiony w rozdziale szóstym.

W pracy analizie podlegały sieci dystrybucyjne średniego napięcia (SN) i niskiego napięcia (nn). Do obliczeń zamodelowano dobową, dyskretną zmienność obciążenia sieci. W pierwszej kolejności analiza została przeprowadzona na testowej sieci SN, na której przetestowano algorytm lokalizacyjny. W kolejnym etapie przebadano przykładową sieć nn, w której występują OZE.

Rozprawa obejmuje także opracowanie wieloparametrowego regulatora zasobnika energii. W opracowanym algorytmie sterowania zasobnikiem energii, zmiennymi wejściowymi są: poziom napięcia w węźle przyłączenia zasobnika energii, profil obciążenia linii zasilającej dany węzeł oraz stan naładowania / rozładowania zasobnika energii. Zmiennymi wejściowymi są zadana moc czynna i bierna dla zasobnika energii. Regulator opracowano z wykorzystaniem elementów logiki rozmytej w programie Power Factory.

Rozprawa doktorska składa się z jedenastu rozdziałów. Rozdział pierwszy zawiera spis ważniejszych skrótów i oznaczeń. Rozdział drugi stanowi wstęp rozprawy doktorskiej. W rozdziale trzecim przedstawiono tezę i zakres rozprawy. W czwartym rozdziale pracy przedstawiono ogólną charakterystykę parametrów różnych typów zasobników energii oraz omówiono układ energoelektroniczny współpracujący z zasobnikiem energii. Uzasadniono także wybór elektrochemicznych

zasobników energii do dalszych badań. W kolejnym rozdziale przedstawiono możliwości wykorzystania zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych wraz z przykładowymi kryteriami doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii. W rozdziale szóstym omówiono dostępne metody wykorzystywane przy wyborze lokalizacji zasobników energii. W kolejnym rozdziale przedstawiono autorski algorytm lokalizacyjny, którego działanie przetestowano na przykładowej sieci SN. W rozdziale ósmym opisano składowe funkcji celu, którą wykorzystywano do lokalizacji zasobników energii w dalszej części pracy. W następnym rozdziale opisano działanie regulatora zasobnika energii działającego w oparciu o logikę rozmytą. Rozdział dziesiąty zawiera analizę pracy przykładowej sieci nn z uwzględnieniem opracowanego algorytmu lokalizacyjnego i opracowanego regulatora zasobnika energii. Rozdział jedenasty podsumowuje rozprawę doktorską.

2. TEZA I CEL PRACY

Teza pracy:

Poprawę jakości pracy sieci dystrybucyjnej można osiągnąć poprzez właściwą lokalizację zasobników energii oraz odpowiednie ich sterowanie.

Cel pracy:

Celem rozprawy jest:

- wykazanie, że skuteczna poprawa wskaźników jakościowych energii elektrycznej może być zrealizowana przy wykorzystaniu elektrochemicznych zasobników energii,
- wykazanie, że uwzględnienie kryteriów regulacji zasobników w procesie określania lokalizacji istotnie wpływa na efektywności ich wykorzystania,
- opracowanie algorytmu lokalizacji zasobników,
- opracowanie algorytmu sterowania zasobnikiem energii.

Zakres rozprawy:

1. Badania literaturowe.
2. Opracowanie modelu sieci dystrybucyjnej ze zmiennym obciążeniem w programie Power Factory, a w tym zamodelowanie stochastycznej zmienności generowanej mocy przez OZE.
3. Analiza sieci pod względem parametrów jakościowych energii i obciążenia poszczególnych elementów sieci.
4. Określenie odpowiedniej lokalizacji zasobników energii przy wykorzystaniu Algorytmu Genetycznego.
5. Opracowanie regulatora zasobnika energii na bazie logiki rozmytej.
6. Weryfikacja efektywności opracowanego układu sterowania siecią z zasobnikami energii.

3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZASOBNIKÓW ENERGII PRZEZNACZONYCH DLA SIECI DYSTRYBUCYJNYCH

3. 1. Rodzaje zasobników energii

Zasobniki energii (magazyny energii) w energetyce znane są już od ubiegłego wieku. Jednymi z najstarszych są elektrownie szczytowo-pompowe oraz bateryjne zasobniki energii, a w szczególności akumulatory kwasowo-ołowiowe. W ostatnich latach nastąpił znaczny postęp w rozwoju magazynów energii [5], [6]. Wyróżnić można następujące typy zasobników energii:

- kinetyczne zasobniki energii (*ang. Flywheel Energy Storage*),
- ogniwa paliwowe,
- elektrownie szczytowo-pompowe,
- pneumatyczne zasobniki energii – CAES (*ang. Compressed Air Energy Storage*),
- superkondensatory (*ang. Supercapacitors*),
- nadprzewodnikowe zasobniki energii – SMES (*ang. Superconductive Megnetic Energy Storage*),
- bateryjne zasobniki energii [7].

Elektrownie szczytowo-pompowe oraz pneumatyczne zasobniki energii są mechanicznymi zasobnikami energii. Energia w zasobniku gromadzona jest pod postacią energii potencjalnej w przypadku elektrowni szczytowo-pompowej lub pod postacią sprężonego powietrza w pneumatycznym zasobniku energii. Ze względu na gabaryty oraz koszt budowy zasobniki te wykorzystywane są w sieciach wysokiego napięcia (WN) i nie będą podlegały analizie w dalszej części pracy.

Ogniwa paliwowe są chemicznymi zasobnikami energii. Ich działanie opiera się o proces produkcji syntetycznego gazu lub wodoru. Technologia ta wydaje się być obiecująca, jednak na razie jest w fazie rozwoju.

Nadprzewodnikowy zasobnik energii magazynuje energie w polu elektromagnetycznym. Do jego budowy wykorzystywane są kosztowne materiały, a podczas pracy wymagane jest utrzymanie niskich temperatur, wobec tego zasobnik ten charakteryzuje się bardzo wysokim kosztem. W praktyce wykorzystanie tego typu zasobnika energii w sieci elektroenergetycznej jest niespotykane (wykorzystywany jedynie w celach laboratoryjnych).

Innym rodzajem bateryjnych zasobników energii są baterie przepływowe (baterie wandawowe oraz cynkowo-bromowe), które zaliczają się do zasobników chemicznych. Składają się one z ogniwa i dwóch oddzielnych zbiorników z reagentami. Ich budowa pozwala wykonać większą ilość cykli ładowania / rozładowania w porównaniu z akumulatorowymi zasobnikami energii, jednak charakteryzują się one mniejszą gęstością energii w stosunku do akumulatorowych zasobników energii (gęstość energii definiowana jest jako stosunek pojemności zasobnika energii do jego objętości lub wagi). Ze względu na gabaryty baterii przepływowych, w celu ich instalacji wymagana jest stosunkowo duża powierzchnia. Wobec powyższego również nie zostaną uwzględnione w dalszej analizie.

Ze względu na swoje właściwości dynamiczne i fizyczne pozwalające na współpracę z siecią dystrybucyjną, szerzej zostaną omówione następujące zasobniki energii: koło zamachowe, superkondensator oraz baterie akumulatorowe. W tabeli 3.1. zostały przedstawione wybrane właściwości omawianych zasobników energii.

Tabela 3.1. Przegląd wybranych właściwości zasobników energii [8], [9]

	Bateria NaS	**Bateria Li-on**	**Bateria kwasowo-ołowiowa**	**Super-kondensator**	**Koło zamachowe**
Gęstość energii [Wh/kg]	100÷250	60÷200	30÷45	1÷15	5÷30
Gęstość energii [Wh/dm^3]	150÷300	200÷350	50÷100	10÷20	20÷80
Gęstość mocy [W/dm^3]	120÷160	100÷3500	90÷700	40 000÷120 000	5000
Czas ładowania	1 min ÷ 8 h	1 min ÷ 8 h	1 min ÷ 8 h	ms ÷ min	s ÷ godz.
Czas rozładowania	30 min ÷ 8 h	15 min ÷ 4 h	10 s ÷ 4 h	< 30 s	s ÷ min
Współczynnik samorozładowania	10 %/dzień	5 %/msc	(0,1÷0,4) %/dzień	do 25% w pierwszych 48 h	(5÷15) %/h
Sprawność [%]	75÷80	83÷86	70÷85	85÷94	80÷95
Liczba cykli	5000÷ 10 000	1000÷5000	500÷2000	10^4÷10^6	kilka milionów
Głębokość rozładowania [%]	do 100	do 100	70	75	75
Czas życia	(15÷20) lat	(5÷20) lat	(5÷15) lat	15 lat	(15÷20) lat
Koszt instalacji PLN/kWh	2000÷40 000	1200÷32 000	400÷1000	40 000÷80 000	4000

Koło zamachowe jest kinetycznym zasobnikiem energii, które gromadzi energię pod postacią energii mechanicznej zgromadzonej w wirującej masie. Koła zamachowe charakteryzuje bardzo wysoka żywotność i duża gęstość mocy – tab. 3.1. Do wad możemy zaliczyć przeciętne wartości magazynowanej energii oraz wysoki współczynnik samorozładowania, który informuje ile procent zgromadzonej energii jest tracone w procesie przechowywania energii. Zasobniki te sprawdzają się w zastosowaniach, które wymagają dostarczenia lub odebrania bardzo dużej mocy w krótkim czasie, z dużą liczbą cykli ładowania / rozładowania i krótkim okresem magazynowania energii. Do zastosowań koła zamachowego związanych ze współpracą z siecią dystrybucyjną możemy zaliczyć: redukcję wahań napięcia, stabilizację częstotliwości (dla wyspowej pracy sieci) oraz redukcję szczytów obciążenia (*ang. peak shaving*).

Superkondensator w porównaniu z baterią akumulatorów charakteryzuje się znacznie większą liczbą cykli ładowania / rozładowania, dużą gęstością mocy oraz niską gęstością energii – tab. 3.1. Superkondensatory mają zastosowanie w krótkoterminowym magazynowaniu energii, związanym z dużą mocą ładowania / rozładowania. Superkondensator i koło zamachowe charakteryzują się podobnymi właściwościami, wobec tego ich zastosowanie jest bardzo podobne.

W tabeli 3.1 przedstawiono parametry techniczne trzech rodzajów baterii akumulatorowych: baterii wysokotemperaturowych (NaS), baterii litowo-jonowych (Li-on) oraz baterii kwasowo-ołowiowych ($PbSO_4$). Istnieją także baterie niklowo-kadmowe, lecz zostały one wyparte przez baterie Li-on, podobnie jak baterie niklowo-metalowo-wodorkowe. Podczas ładowania / rozładowania baterii występuje ruch elektronów i jonów w elektrolicie. Na anodzie i katodzie zachodzą reakcje chemiczne. Gabaryty elektrod ulegają zmianie w zależności od przebiegającego procesu ładowania / rozładowania. Różnica w objętości elektrod podczas cyklu zależy od głębokości rozładowania oraz typu baterii. Dla poszczególnych typów baterii jest ona inna i m. in. definiuje liczbę cykli baterii. Baterie wysokotemperaturowe charakteryzują się większą liczbą cykli w porównaniu z bateriami litowo-jonowymi czy kwasowo-ołowiowymi, ze względu na brak naprężeń mechanicznych pojawiających się podczas cyklu ładowania / rozładowania. Wadą baterii NaS jest wysoka temperatury ich pracy tj. ok. 300÷400°C. Ze względów bezpieczeństwa (ryzyko pożaru) baterie te rzadko wykorzystywane są w przemyśle [5]. Znane od dawna baterie akumulatorowe $PbSO_4$ charakteryzują się niewielką liczbą cykli oraz tzw.

efektem pamięciowym. Z tego względu są one najczęściej wykorzystywane do zasilania awaryjnego, a nie do pracy cyklicznej. Baterie Li-on charakteryzują się dużą gęstością energii, wysoką wydajnością i relatywnie długą żywotnością – ilością cykli ładowania / rozładowania [10]. Do swojej pracy potrzebują systemu BMS (*ang. Battery Management System*), który monitoruje pracę każdego ogniwa. Proces monitorowania pracy baterii Li-on jest niezbędny ze względów bezpieczeństwa. Niedopuszczalne jest przeładowanie ogniwa oraz utrzymywanie zbyt wysokiej temperatury jego pracy.

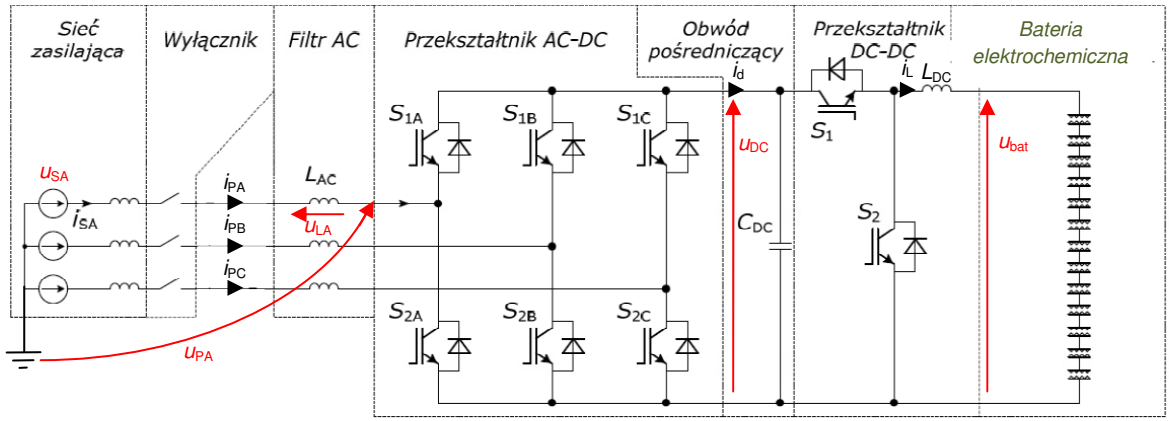
Baterie akumulatorów w porównaniu z superkondensatorami czy kołami zamachowymi, charakteryzują się znacznie mniejszą liczbą cykli ładowania / rozładowania, a także mniejszym współczynnikiem samorozładowania. Wobec tego, zastosowanie baterii akumulatorów jest bardziej korzystne do zadań związanych z magazynowaniem energii w dłuższych okresach czasu (rzędu paru godzin), a nie jest odpowiednie do zadań związanych z dynamiczną regulacją parametrów jakościowych energii (np. wahań napięcia). Zastosowanie bateryjnych zasobników energii sprowadza się do współpracy z OZE, odciążania elementów sieci, redukowania strat, minimalizowania odchyłki napięcia związanego z rozpływem mocy w sieci elektroenergetycznej oraz wszędzie tam, gdzie nie jest konieczna szybka reakcja, a czas trwania stanu zakłóceniowego jest rzędu przynajmniej paru minut.

W pracy [11] przedstawiono działanie połączenia hybrydowego baterii akumulatorowej i koła zamachowego. W publikacji [12] zaprezentowano współpracę baterii i superkondansatora. Celem połączenia hybrydowego dwóch rodzajów zasobników energii w obydwu przypadkach jest poszerzenie możliwości regulacyjnych – możliwość redukcji wolno- i szybkozmiennych zakłóceń.

W pracy doktorskiej rozważane są wolnozmienne stany pracy sieci – związane ze zmiennością mocy generowanej i pobieranej, wobec tego w dalszej analizie założono wykorzystanie baterii akumulatorowych. Ze względu na właściwości fizyczne i dynamiczne do dalszej analizy przyjęto parametry (gęstość mocy i gęstość energii) zasobników energii odpowiadające akumulatorom litowo-jonowym.

3. 2. Przekształtnik zasobnika energii

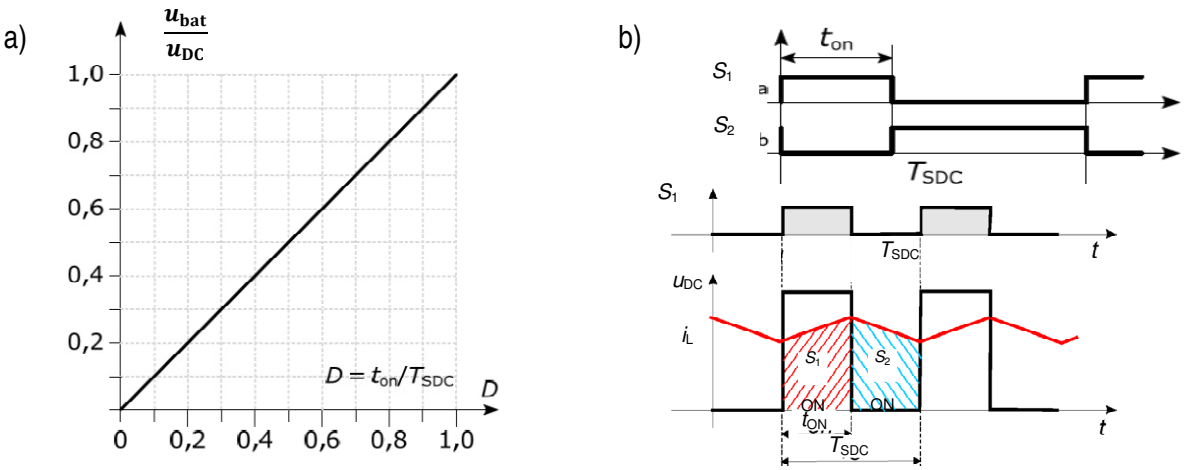
Magazyn energii, jakim może być np. bateria elektrochemiczna, przyłączany jest do sieci elektroenergetycznej przez układ energoelektroniczny. Na rysunku 3.1 przedstawiony jest schemat podłączenia zasobnika energii do sieci.



Rys. 3.1. Schemat podłączenia zasobnika energii do sieci [13]

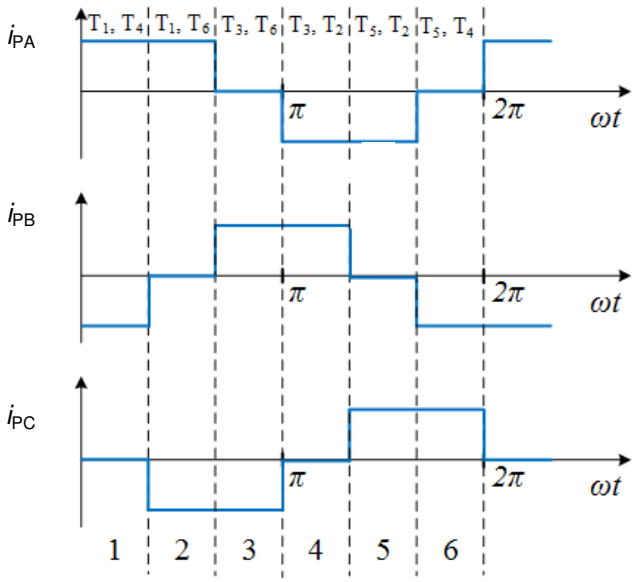
Poniżej opisane zostaną poszczególne elementy układu energoelektronicznego oraz ich funkcje w procesie ładowania / rozładowania zasobnika energii.

Przekształtnik DC-DC (nazywany także przekształtnikiem dwukierunkowym) decyduje o kierunku przepływu prądu – od którego zależy proces ładowania / rozładowania baterii [13]. Przekształtnik DC-DC łączy obwód pośredniczący napięcia stałego u_{DC} z magazynem energii. Napięcie u_{DC} zmienia się wraz ze stopniem jego naładowania. Ładowanie / rozładowanie baterii realizuje się przy niezmiennej biegunowości napięcia baterii u_{bat} oraz przy odpowiednim kierunku przepływu prądu i_L. Przekształtnik DC-DC najczęściej składa się z dwóch tranzystorów. Oba tranzystory S_1 i S_2 są sterowane naprzemiennie, co zapewnia pracę przy ciągłym prądzie i_L dławika L_{DC} oraz gwarantuje liniową charakterystykę sterowania $u_{bat} / u_{DC} = f(D)$, gdzie parametr D zdefiniowano na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Charakterystyka działania przekształtnika dwukierunkowego (DC-DC) (a), przebiegi sygnałów sterujących tranzystorami S_1 i S_2 oraz przebieg napięcia u_{DC} oraz prądu i_L (b) [14]

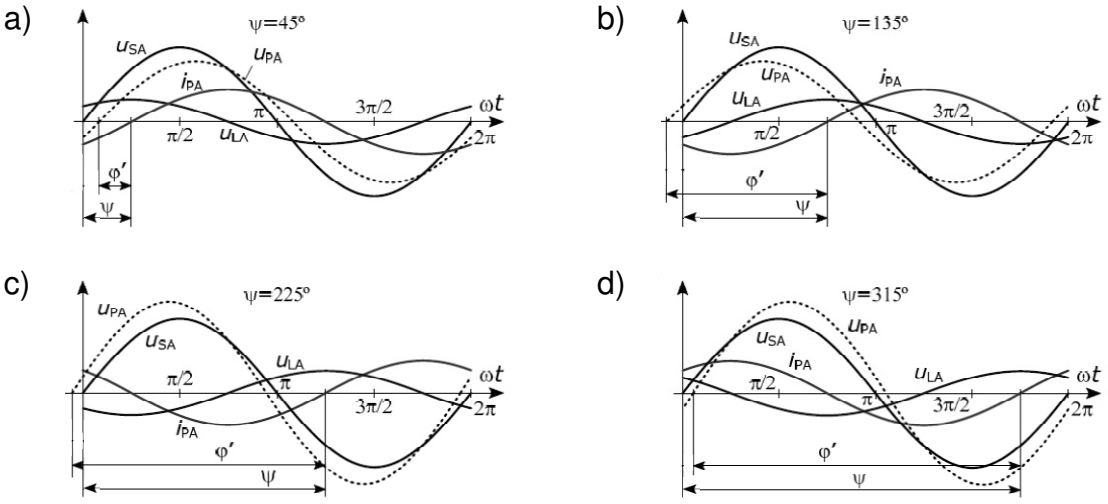
Z kolei w skład przekształtnika AC-DC wchodzi układ składający się z co najmniej sześciu tranzystorów (zazwyczaj układy te są bardziej skomplikowane tj. wielopoziomowe). Zasada działania przekształtnika AC-DC polega na zadaniu odpowiedniej sekwencji sygnałów sterujących dla poszczególnych tranzystorów, tak aby wytworzyć odpowiednią wartość i kształt napięcia przekształtnika (u_{PA} na rys. 3.1. dla fazy A). Sygnałem wejściowym (sterującym przekształtnika) jest sygnał zadanego prądu przekształtnika i_{zad_PA}. Napięcie u_{PA} definiowane jest w taki sposób, aby przy odpowiedniej wartości napięcia przekształtnika u_{PA}, prąd przekształtnika i_{PA} był równy prądowi zadanemu i_{zad_PA}. Dzięki możliwości odpowiedniej modulacji wartości prądu zadanego i_{zad_PA} możliwe jest również dostarczanie przez zasobnik mocy biernej, a także kompensacja wyższych harmonicznych.



Rys. 3.3. Przykładowa sekwencja załączania tranzystorów w falowniku 6-pulsowym w celu wytworzenia odpowiednich przebiegów prądów w poszczególnych fazach [13]

Zasobnik wytwarza moc bierną wraz przy stosunkowo niewielkim poborze mocy czynnej potrzebnej do pokrycia strat w przekształtniku AC/DC [14]. Ze względu na niewielką wartość strat mocy czynnej w przekształtniku podczas jego pracy w trybie kompensacji mocy biernej, zostały one pominięte w analizie przeprowadzonej w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Na rysunku 3.4 przedstawiono przebiegi napięć i prądów dla przekształtnika AC/DC oraz przebieg napięcia sieci zasilającej dla wybranych trybów pracy zasobnika energii.



Rys. 3.4. Przebiegi napięć sieci u_{SA}, przekształtnika u_{PA}, dławika u_{LA} oraz prądu przekształtnika i_{PA} dla następujących stanów pracy zasobnika energii: a) $P_{ZE} < 0$, $Q_{ZE} < 0$, b) $P_{ZE} > 0$, $Q_{ZE} < 0$, c) $P_{ZE} > 0$, $Q_{ZE} > 0$, d) $P_{ZE} > 0$, $Q_{ZE} < 0$ [14]

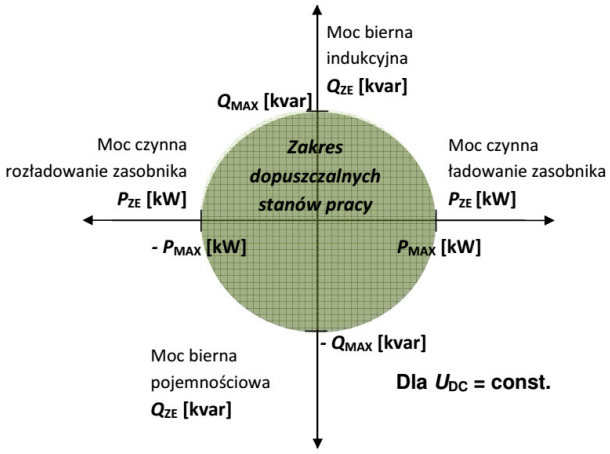
Na rysunku 3.4 (a) przedstawiony jest przypadek pracy zasobnika energii przy kącie $\psi = 45\,°$ (ψ – kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i_{PA}, a napięciem u_{SA} dla pierwszej harmonicznej). Przypadek ten obrazuje sytuację, w której zasobnik energii pobiera moc czynną P_{ZE} i moc bierną indukcyjną Q_{ZE} ($P_{ZE} < 0$, $Q_{ZE} < 0$). Przypadek (b) przedstawia sytuację, gdzie kąt $\psi = 135\,°$ – moc czynna P_{ZE} przekazywana jest z zasobnika energii do sieci, przy jednoczesnym poborze mocy biernej Q_{ZE} przez zasobnik energii ($P_{ZE} > 0$, $Q_{ZE} < 0$). Kolejny przypadek (c) przedstawiono dla kąta $\psi = 225\,°$. Odpowiada on punktowi pracy, gdzie moc czynna i bierna przekazywana jest z zasobnika energii do sieci. Ostatni przypadek (d), przedstawiony dla kąta $\psi = 315\,°$, przestawia sytuację gdzie moc czynna P_{ZE} jest pobierana przez zasobnik energii, a moc bierna indukcyjna Q_{ZE} jest oddawana ($P_{ZE} < 0$, $Q_{ZE} > 0$).

Filtr AC (rys. 3.1.) ogranicza tętnienia prądu. Do sieci nn zasobnik energii można przyłączyć bezpośrednio lub za pomocą transformatora, który zapewni separację galwaniczną pomiędzy zasobnikiem energii, a siecią elektroenergetyczną. Do sieci SN ze względu na napięcie wyjściowe układów energoelektronicznych wymagane jest zastosowanie dodatkowego transformatora SN/nn.

Ograniczeniem układu, który należy uwzględnić w analizie jest maksymalny prąd I_{max} zasobnika energii. Na wartość maksymalnego prąd ładowania / rozładowania I_{max} zasobnika energii, którego wartość ma przełożenie na moc pozorną układu, mają wpływ następujące czynniki:

- napięcie sieci u_{SA},
- napięcie u_{DC} kondensatora C_{DC},
- pojemność kondensatora C_{DC},
- indukcyjność dławików L_{AC},
- maksymalny prąd ładowania / rozładowania baterii ograniczany przez jej wewnętrzny system bezpieczeństwa – BMS (*ang. Battery Management System*) [14], [15].

Na rys. 3.5 przedstawione są możliwe stany pracy zasobnika energii, przy uwzględnieniu ograniczenia wynikającego z maksymalnego prądu przekształtnika I_{max} oraz założenia u_{DC} = const.



Rys. 3.5. Obszar osiągalnych stanów pracy zasobnika energii [13]

W dalszej części pracy przyjęto ograniczenie mocy pozornej zasobnika energii, opisane wzorem (3.1) oraz (3.2).

$$S_{ZE} \leq S_{max} \tag{3.1}$$

$$S_{ZE} = \sqrt{P_{ZE}^2 + Q_{ZE}^2} \tag{3.2}$$

4. PROBLEMY W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ ORAZ MOŻLIWOŚCI ICH ELIMINACJI POPRZEZ WYKORZYSTANIE ZASOBNIKÓW ENERGII

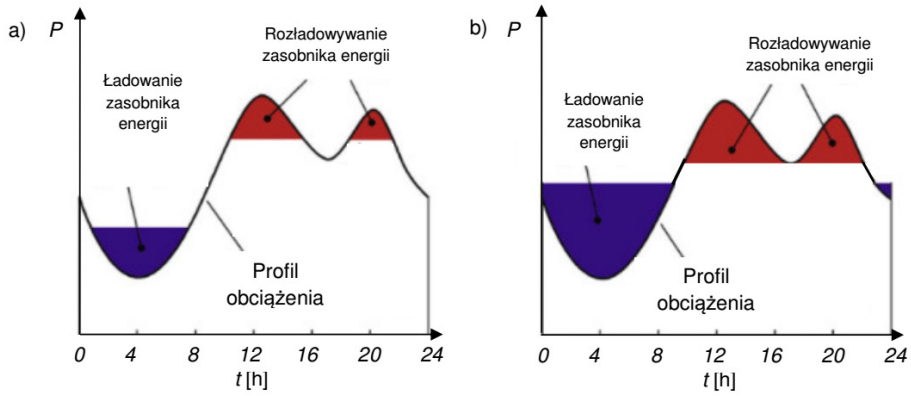
4. 1. Wstęp

W niniejszym rozdziale omówiono problemy występujące w sieci dystrybucyjnej wynikające ze zmienności obciążenia oraz wpływu generacji mocy przez OZE. Omówiono zjawiska występujące w sieci elektroenergetycznej oraz przedstawiono przykłady z literatury zastosowania zasobników energii w celu poprawy pracy sieci dystrybucyjnej. Opisano również wybrane składowe funkcji celu, których wartości stanowią kryteria doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii w sieci dystrybucyjnej.

4. 2. Wyrównywanie obciążenia, redukcja szczytów obciążenia

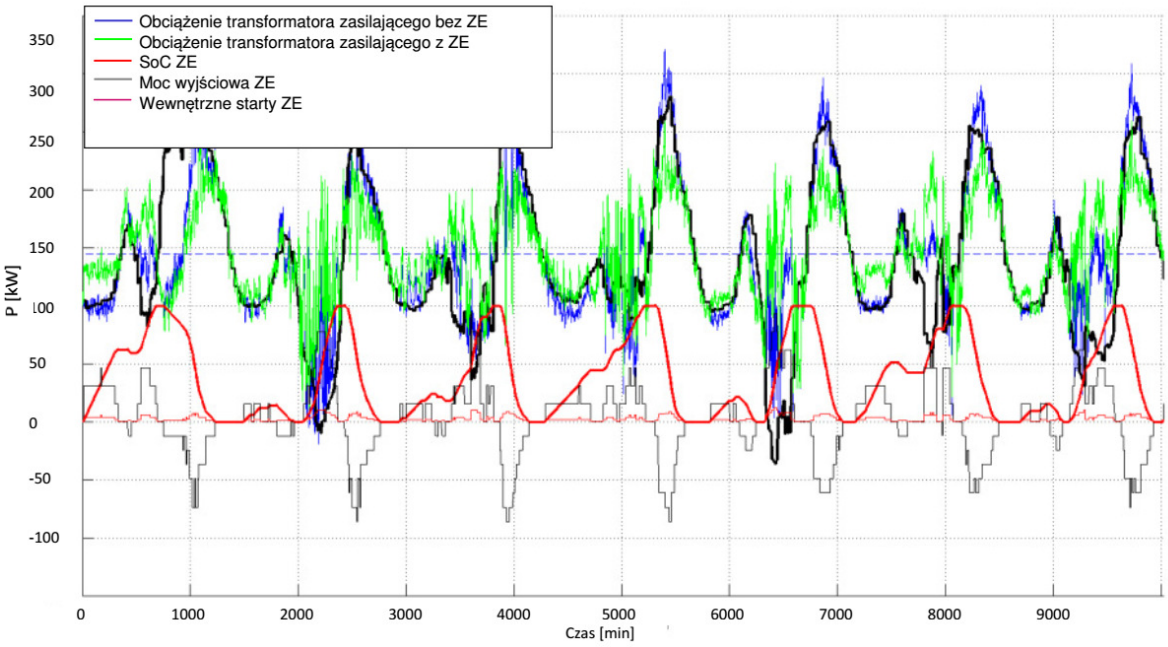
Zmienność obciążenia, wpływa na rozpływ mocy czynnej i biernej w sieci elektroenergetycznej. W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, szczyt obciążenia nie tylko stanowi wyzwanie dla całego systemu elektroenergetycznego pod względem zbilansowania mocy wytwarzanej i pobieranej, ale także wpływa na obciążenie elementów przesyłowych – co z kolei przekłada się na mniejszą przepustowość elementów przesyłowych sieci, większe straty mocy w elementach przesyłowych, a także problemy związane z jakością dostarczanej energii elektrycznej [16]. Zatem wyrównanie obciążenia (*ang. Load Levelling*) pomiędzy np. doliną nocną, a szczytem dziennym jest pożądane, a odpowiednio dobrany zasobnik energii jest narzędziem temu służącym. Innym zastosowaniem zasobników energii może być redukcja mocy szczytowej (*ang. Peak Shaving*).
Na rysunku 4.1 przedstawiono działanie zasobnika energii dla dobowej zmienności obciążenia z następującymi kryteriami:

- pokrywanie szczytowych obciążeń w systemie (*ang. Peak Shaving*) – rys. 4.1 (a),
- przesunięcie obciążenia na okresy pozaszczytowe (*ang. Load Levelling*) – rys. 4.1 (b).



Rys. 4.1. Redukcja szczytów obciążenia (a) i wyrównywanie obciążeń (b) w sieci

Energia zużyta podczas ładowania jest równa sumie energii rozładowywania oraz strat poniesionych podczas tego procesu. Na rys. 4.1 (a) i 4.1 (b) energia zużyta na ładowanie zasobnika jest zilustrowana kolorem niebieskim natomiast energia rozładowywania kolorem czerwonym. Z porównania rys. 4.1 a) i 4.1. b) wynika, że w celu wyrównywania dobowych zmienności obciążenia potrzebne jest zastosowanie zasobnika energii o większej pojemności, niż dla celu redukcji szczytów obciążenia. Do realizacji celu, jakim jest przenoszenie szczytowego obciążenia dziennego na dolinę nocną w sieciach dystrybucyjnych (a w szczególności w sieci nn), korzystniejsze jest zastosowanie baterii akumulatorów, a w przypadku ograniczenia szczytowego obciążenia w węźle możliwe jest zastosowanie koła zamachowego bądź superkondensatora.



Rys. 4.2. Wyrównywanie obciążenia sieci elektroenergetycznej przy zastosowaniu bateryjnego zasobnika energii [18]

Rysunek 4.2 przedstawia przykład redukcji szczytowej mocy czynnej stacji transformatorowej SN/nn. W prezentowanym przykładzie zmniejszono wartość szczytowej mocy przepływającej przez transformator SN/nn o około 18%. Na rysunku widoczna jest także praca zasobnika energii, tj. proces ładowania / rozładowania, w którym zostały uwzględnione straty wewnętrzne zasobnika energii, którego sprawność założono na poziomie 78%. W celu zapewnienia odpowiedniej pracy zasobnika energii, zoptymalizowano parametry jego regulatora w oparciu o znane profile obciążenia oraz generacji mocy. Niezbędne było także zastosowanie odpowiednich kryteriów, względem których przeprowadzona była optymalizacja. Kryteriami tymi było zminimalizowanie strat mocy transformatora SN/nn oraz wyrównanie obciążenia stacji transformatorowej. Funkcja celu odpowiadająca wyrównaniu obciążenia została zdefiniowana w następujący sposób:

$$\delta_{\mathrm{obc}} = \sum_{t=1}^{T} (P_{\mathrm{obc}}^{\mathrm{t}} - \overline{P_{\mathrm{obc}}})^2 \tag{4.1}$$

$$F = max \left| \frac{\delta_{\mathrm{obc2}} - \delta_{\mathrm{obc1}}}{\delta_{\mathrm{obc1}}} \right| \tag{4.2}$$

gdzie:

$P_{\mathrm{obc}}^{\mathrm{t}}$ – moc czynna dostarczona przez stację zasilającą w chwili *t*,

$\overline{P_{obc}}$ – średnia moc czynna dostarczona przez stację zasilającą przez okres *T*,

δ_{obc1} – odchyłka mocy od jej średniej wartości – bez zasobników energii, obliczona na podstawie wzoru (5.1),

δ_{obc2} – odchyłka mocy od jej średniej wartości – z zasobnikami energii, obliczona na podstawie wzoru (5.1),

T – czas analizy.

Innym wskaźnikiem jakościowym wykorzystywanym do redukcji szczytów obciążenia lub wyrównywania obciążenia w węźle jest ograniczenie maksymalnej mocy w węźle bezpośrednio do wartości P_{max} lub P_{min} [19]–[22]. W praktyce może odpowiadać to sytuacji, w której funkcja celu *F* definiuje parametry zasobnika energii tak, aby nie została przekroczona przez odbiorcę jego maksymalna moc umowna.

W pracy [23], wykorzystano funkcję celu minimalizującą koszty związane z dostarczaniem mocy ze stacji zasilającej podczas szczytu obciążenia (4.3). Ma to znaczenie zwłaszcza dla stacji abonenckich SN/nn, gdzie pomiar energii jest najczęściej realizowany po stronie SN.

$$F = min\left(\sum_{t=1}^{T} C_{\mathrm{t}} \cdot P_{1\mathrm{t}}\right) \tag{4.3}$$

gdzie:

C_{t} – koszt dostarczanej energii elektrycznej, w odniesieniu do danej godziny / dnia,

$P_{1\mathrm{t}}$ – moc pobrana przez stację zasilającą,

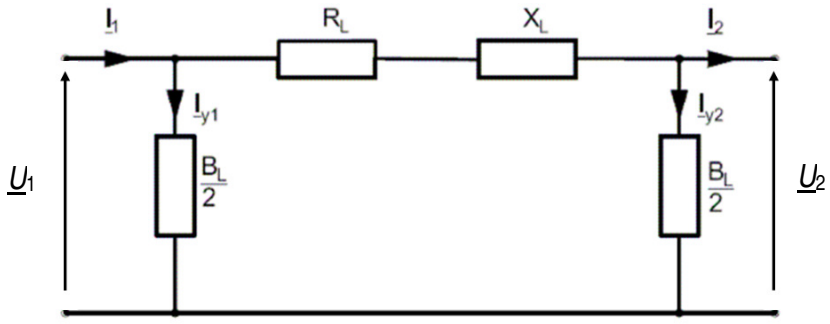
t – indeks aktualnego stanu obciążenia,

T – liczba scenariuszy obciążenia.

4. 3. Ograniczenie strat w sieci elektroenergetycznej

W celu opisania strat w dystrybucyjnej sieci elektroenergetycznej, tj. w liniach i transformatorach posłużono się schematem zastępczym typu π linii III rodzaju oraz schematem zastępczym typu Γ transformatora dwuuzwojeniowego. Model linii przedstawiony na schemacie zastępczym typu π (rys. 4.3), składa się z elementów podłużnych: rezystancji i reaktancji oraz elementu poprzecznego – susceptancji. Konduktancja została pominięta, bowiem odpowiada ona upływności przewodu, której wartość zależy m. in. od napięcia znamionowego linii. Dla linii SN i nn wartość

konduktancji jest pomijalna. Susceptancja, która związana jest z pojemnością układu została uwzględniona tylko dla linii kablowych SN.



Rys. 4.3. Schemat zastępczy typu π linii III rodzaju

Straty w liniach elektroenergetycznych opisują wzory (4.4) i (4.5) [24]. Straty w elementach podłużnych związane są z pobieraną mocą czynną i bierną na końcu linii, natomiast straty poprzeczne związane są z wartością napięcia.

$$\Delta P_{\mathrm{L}} = \left[\left(\frac{P_2}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{U_2} + \frac{U_2 \cdot B_L}{2}\right)^2\right] \cdot R_{\mathrm{L}} \tag{4.4}$$

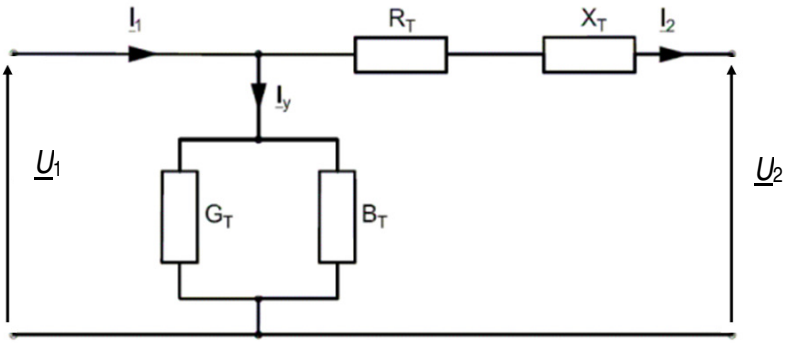
$$\Delta Q_{\mathrm{L}} = \left[\left(\frac{P_2}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{U_2} + \frac{U_2 \cdot B_L}{2}\right)^2\right] \cdot X_{\mathrm{l}} + (U_1^2 + U_2^2) \cdot \frac{B_{\mathrm{L}}}{2} \tag{4.5}$$

gdzie:

ΔP_{L} – starty mocy czynnej w linii elektroenergetycznej,
ΔQ_{L} – starty mocy biernej w linii elektroenergetycznej,
P_2 – moc czynna pobierana na końcu linii,
Q_2 – moc bierna pobierana na końcu linii,
U_1 – napięcie międzyfazowe na początku linii
U_2 – napięcie międzyfazowe na końcu linii,
R_{L} – rezystancja linii,
X_{L} – reaktancja linii,
B_{L} – susceptancja linii.

Schemat zastępczy typu Γ transformatora dwuuzwojeniowego przedstawiono na rys. 4.4. Model transformatora dwuuzwojeniowego składa się z: rezystancji podłużnej R_{T}, która związana jest ze stratami mocy czynnej w miedzianych uzwojeniach, reaktancji rozproszenia uzwojenia pierwotnego i wtórnego X, która

definiuje straty mocy biernej, susceptancji B_T związanej z magnesowaniem się rdzenia – również odpowiada stratom mocy biernej oraz konduktancji G_T odwzorowującej zjawisko histerezy magnetycznej i prądów wirowych w obwodach magnetycznych transformatora – odpowiada stratom mocy czynnej w żelazie.



Rys. 4.4. Schemat zastępczy typu Γ transformatora dwuuzwojeniowego

Straty mocy czynnej i biernej w transformatorach opisują odpowiednio wzory (4.6) i (4.7) [24]. Tak samo jak w przypadku linii straty na elementach podłużnych zależą od wielkości pobieranej mocy po stronie wtórnej transformatora. Straty poprzeczne zależą od napięcia po stronie pierwotnej.

$$\Delta P_{\mathrm{T}} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \cdot R_T + U_1^2 \cdot G_T \tag{4.6}$$

$$\Delta Q_{\mathrm{T}} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_{\mathrm{f2}}^2} \cdot X_{\mathrm{T}} + U_1^2 \cdot B_{\mathrm{T}} \tag{4.7}$$

gdzie:

ΔP_{T} – straty mocy czynnej w transformatorze,
ΔQ_{T} – starty mocy biernej w transformatorze,
P_2 – moc czynna pobierana po stronie wtórnej transformatora,
Q_2 – moc bierna pobierana po stronie wtórnej transformatora,
U_2 – napięcie międzyfazowe po stronie wtórnej transformatora,
U_1 – napięcie międzyfazowe po stronie pierwotnej transformatora,
R_{T} – rezystancja transformatora,
X_{T} – reaktancja transformatora,
B_{T} – susceptancja transformatora,

G_T – konduktancja transformatora.

Straty mocy w sieci elektroenergetycznej występują praktycznie zawsze. Jednak poprzez odpowiednie zabiegi można ograniczyć ich wartość. Jednym ze sposobów, które mają wpływ na zmniejszenie start w sieci jest ograniczenie przepływu mocy przez elementy przesyłowe sieci (zmiana wartości P_2 i Q_2), na co można wpłynąć instalując zasobniki energii. Ograniczenie strat mocy w sieci zasilającej jest uwzględniane jako kryterium optymalizacyjne w procesie wyboru lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii. Przykładową funkcję celu wykorzystaną w celu minimalizacji strat mocy czynnej i biernej w sieci nn opisano worem (4.8) [25].

$$S = min\left\{\sum_{t=1}^{T}\left[\sum_{\mathrm{i,j}\ \epsilon\ L} R_{\mathrm{i,j}}\left(\frac{P_{i,j,t}^2 + Q_{i,j,t}^2}{U_{zas}^2}\right)\right]\right\} \tag{4.8}$$

gdzie:

S – suma start mocy w czasie T,

$P_{\mathrm{j,t}}$ – moc czynna w czasie t, przepływająca pomiędzy węzłem *i*, a *j*,

$Q_{\mathrm{j,t}}$ – moc bierna w czasie t, przepływająca pomiędzy węzłem *i*, a *j*,

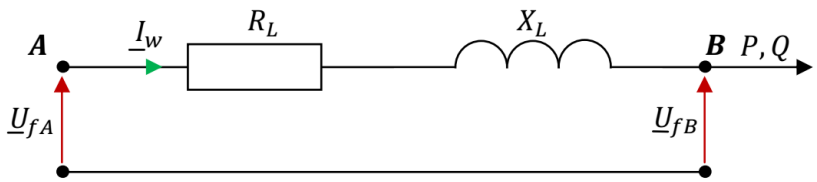
$R_{\mathrm{i,j}}$ – rezystancja gałęzi *i-j*,

U_{zas} – napięcie w węźle zasilającym sieć nn,

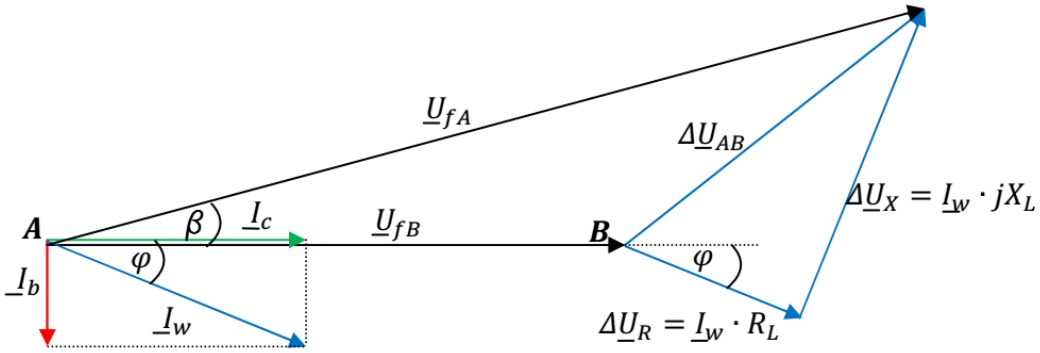
L – liczba linii elektroenergetycznych w sieci.

4. 4. Sterowanie poziomem napięcia

W sieci dystrybucyjnej na drodze przesyłanej mocy P i Q od punktu zasilania (stacja GPZ lub SN/nn) do odbiorcy występują elementy przesyłowe sieci (linie i transformatory). Bezpośredni wpływ na spadek napięcia w sieci mają wartości elementów podłużnych linii i transformatorów (rys. 4.5 – R_L, X_L) oraz wartość prądu przepływająca przez te elementy (rys. 4.5 – I_W). Susceptancja, jako element podłużny m. in. linii kablowych SN, powoduje w przypadku niedociążonych linii wprowadzanie dodatkowej mocy biernej, a tym samym wzrost napięcia w sieci [26]. Susceptancja ogranicza także wartość składowej biernej pobieranego prądu, co wpływa na mniejszy spadek napięcia na elementach podłużnych. Spadek napięcia na elementach przesyłowych sieci w sposób graficzny został przedstawiony na rys. 4.5 i 4.6.



Rys. 4.5. Schemat zastępczy fragmentu sieci dystrybucyjnej od punktu A do punktu B



Rys. 4.6. Wykres fazorowy napięć w punkcie A i B [27]

Na rysunku 4.6 przedstawiono wykres fazorowy prądów i spadków napięcia na poszczególnych elementach sieci R_L oraz X_L. Na moduł wartości napięcia w punkcie B – U_{fA} składa się różnica geometryczna wektora napięcia w punkcie A – $\underline{U}_{fA}$ oraz wektora spadku napięcia na odcinku A-B $\Delta\underline{U}_{AB}$. W związku z tym, że dla sieci SN i nn kąt β osiąga niewielkie wartości, a tym samym $\underline{U}_{fA}\cdot\cos(\beta) \approx \underline{U}_{fA}$, w celu obliczenia napięcia w punkcie B można wykorzystać wzór (4.9).

$$U_{\mathrm{fB}} = U_{\mathrm{fA}} - \frac{1}{U_{\mathrm{fB}}}(R_{\mathrm{L}} \cdot P + X_{\mathrm{L}} \cdot Q) \tag{4.9}$$

gdzie:

U_{fb} – napięcie fazowe na końcu linii,

U_{fa} – napięcie fazowe na początku linii,

R_L – rezystancja na odcinku A-B,

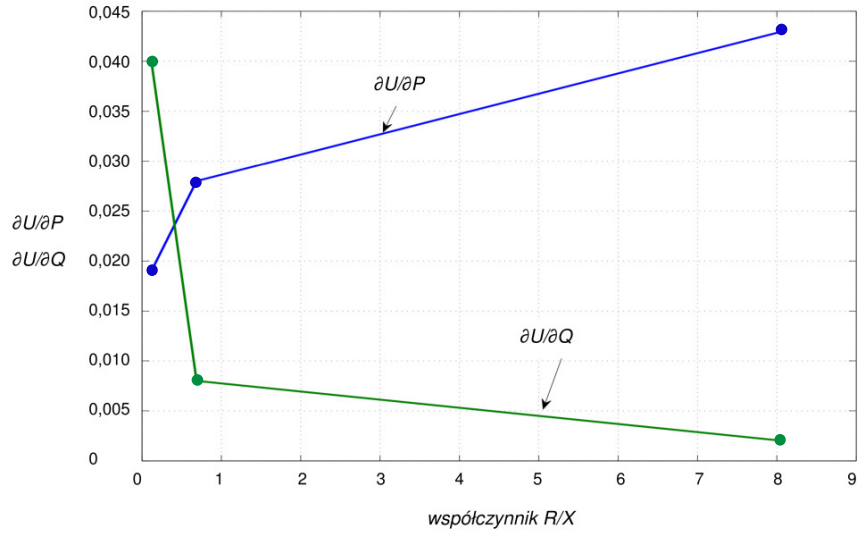
X_L – reaktancja na odcinku A-B,

P – moc czynna pobierana w punkcie B,

Q – moc bierna pobierana w punkcie B.

W zależności od rodzaju sieci: kablowa, napowietrzna, sieć SN czy nn, wiejska lub miejska, dany typ sieci charakteryzuje się różnymi wartościami rezystancji R_L

oraz reaktancji X_L. Stosunek rezystancji R_L do reaktancji X_L odnosi się impedancji zwarciowej w danym węźle w sieci oraz określa wrażliwość na zmianę napięcia w tym węźle w zależności od wprowadzanej mocy czynnej ($\partial U_i / \partial P_i$) lub biernej ($\partial U_i / \partial Q_i$). Na rys. 4.7 przedstawiono wpływ współczynnika *R/X* na wrażliwość napięciową [28]. Krzywe przedstawione na rys. 4.7 są wyprowadzone dla przykładowych sieci WN, SN oraz nn, zatem wrażliwość napięciowa ($\partial U_i / \partial P_i$) oraz ($\partial U_i / \partial Q_i$) może być inna dla różnych typów sieci. Z rys. 4.7 wynika, że czułość napięciowa od wprowadzania mocy czynnej jest tym większa, im większa jest wartość współczynnika *R/X*. Wraz ze wzrostem współczynnika *R/X* czułość napięciowa od wprowadzanie mocy biernej maleje. Uzasadnione jest to, że wartość współczynnika *R/X* sieci ma znaczenie dla wyboru sposobu regulacji napięcia w sieci.



Rys. 4.7. Wpływ współczynnika *R/X* na wrażliwość napięciową ($\partial U_i / \partial P_i$) oraz ($\partial U_i / \partial Q_i$) [28] [3]

Sterowanie napięciem w sieci nn można realizować poprzez zmianę napięcia zasilającego sieć średniego napięcia (SN) pod obciążeniem, zmianę przekładni transformatorów SN/nn w stanie beznapięciowym lub poprzez instalację dodatkowych środków technicznych powiększającymi stabilność napięciową w sieci, jak np. baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej, kondensatory szeregowe do kompensacji reaktancji linii, autotransformatory dodawcze. Innym

[3] Zależność ($\partial U_i / \partial P_i$) oraz ($\partial U_i / \partial Q_i$) przedstawiona na wykresie na rys. 5.7 została wyprowadzona jedynie dla trzech wartości współczynnika *R/X*, którego wartość odpowiada kolejno: sieci WN, sieci SN oraz sieci nn.

zabiegiem wpływającym na poziom napięcia w sieci jest jej przebudowa, polegająca na: wyprowadzeniu nowych linii od stacji zasilającej, wymianie przewodów na przewody o większym przekroju lub dobudowie nowych stacji SN/nn i skróceniu długości linii nn. Kolejnym sposobem jest odpowiednie zarządzaniem rozpływem mocy czynnej i biernej w sieci, którą można osiągnąć poprzez instalację zasobników energii w sieci elektroenergetycznej lub innych sterowalnych źródeł mocy [29]. Regulacja napięcia w stacji zasilającej sieć SN lub nn powoduje globalną regulację napięcia. W takim przypadku może okazać się, że nie będą spełnione wymagania napięciowe we wszystkich węzłach obwodów wychodzących ze stacji zasilającej. Wystąpi to np. w przypadku, kiedy na końcu jednego obwodu istnieje duży odbiór, a na końcu innego – również zasilanego z tej samej stacji – duża generacja mocy. Dopuszczalne wartości spadków napięcia w sieciach dystrybucyjnych przedstawiono w tab. 4.1 [30].

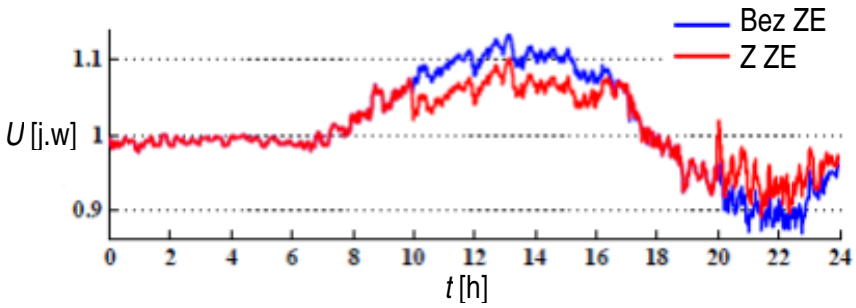
Tabela 4.1. Dopuszczalne spadki napięcia w liniach SN i nn według wytycznych zawartych w [30]

Opis	**Sieć SN w stanie**		**Sieć nn**
	Normalnym	**Zakłóceniowym**	
Miasta zasilane ze stacji 110kV/SN zlokalizowanej na jego terenie	2 %	4 %	4,5 %
Miasta zasilane z odległej stacji 110kV/SN	8 %	10 %	(3÷4,5) %
Wioski	8 %	13 %	(7,5÷10) %
Odbiorcy przemysłowi	8 %	13 %	(3÷4,5) %

Jakość energii elektrycznej definiowana jest przez wartość napięcia, współczynnik mówiący o zawartości wyższych harmonicznych – współczynnik THD, współczynnik asymetrii oraz współczynnik długookresowego migotania światła P_{LT}. W rozprawie doktorskiej skupiono się na poprawie wartości napięcia. Pożądane jest to m. in. w sieciach nn, w których źródła fotowoltaiczne często są przyczyną wzrostu wartości napięcia lub w wyniku zbyt dużego obciążenia sieci – spadku wartości napięcia poza dopuszczalną granicę określoną w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD). Dla sieci SN i nn, 95% z 10-minutowych średnich

wartości skutecznych napięcia musi zawierać się w zakresie ±10 % U_n (napięcia znamionowego sieci).

Zastosowanie zasobników w celu regulacji napięcia w sieci dystrybucyjnej jest tematem wielu artykułów [19], [20], [23], [32]–[41]. Bardzo często zasobniki współpracują z OZE. W czasie, kiedy produkcja energii elektrycznej przez OZE jest wysoka, a obciążenie niewielkie (powoduje to lokalny wzrost napięcia w sieci nn), energia ta jest gromadzona w zasobniku energii. Oddanie zgromadzonej energii następuje w czasie szczytu obciążenia lub w czasie kiedy OZE nie pracuje [19], [20], [23], [31]–[36], [37], [38]. Na rys. 4.8 przedstawiono przykład pracy sieci z zasobnikiem energii. Dzięki zastosowaniu zasobnika energii możliwe było ograniczenie zarówno wzrostu napięcia poza dopuszczalny zakres (rys. 4.8, godz. 10÷17) wywołanego przez źródła fotowoltaiczne, a także spadku napięcia (rys. 4.8 – godz. 20÷23) spowodowanego dużym obciążeniem sieci.



Rys. 4.8. Efekt poprawy poziomu napięć w węźle w wyniku zastosowania zasobnika energii [39]

Kryterium napięciowe jest istotnym kryterium wpływającym na poprawę pracy sieci dystrybucyjnej. Często wykorzystywane ono jest jako kryterium wyboru lokalizacji oraz doboru parametrów zasobników energii. Wartość funkcji celu odpowiedzialnej za poziom napięcia w sieci może uwzględniać jedynie wartość napięcia w poszczególnych węzłach w sieci, bądź brać pod uwagę zarówno poziom napięcia w poszczególnych węzłach jak i moc odbiorów przyłączonych do danych węzłów. Uwzględnianie zarówno poziomu napięcia, jak i mocy odbioru w danym węźle związane jest z kosztem, jaki ponosi Operator w wyniku niedotrzymania wymaganego poziomu napięcia. Funkcję celu uwzględniającą poziom napięcia w sieci w odniesieniu do krajowego systemu elektroenergetycznego przedstawiono w rozdziale siódmym. Wzór (4.10) opisuje przykładową funkcję celu związaną z minimalizacją odchyleń wartości napięcia od wartości znamionowej [41]. Celem

optymalizacji jest minimalizacja wartości funkcji celu *F*. Wartość funkcji celu *F* jest znacznie większa jeżeli wartości napięcia znajdują się poza dopuszczalną wartością odchylenia $\Delta U^{\mathrm{i}}_{\max}$ od wartości znamionowej $U_{\mathrm{n_i}}$.

$$F = min \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{U_{\mathrm{i}} - U_{\mathrm{n_i}}}{\Delta U^{\mathrm{i}}_{\max}} \right)^2 \tag{4.10}$$

gdzie:

U_{i} – wartość napięcia w węźle *i*,

$U_{\mathrm{n_i}}$ – wartość napięcia znamionowego węzła *i,*

$\Delta U^{\mathrm{i}}_{\max}$ – dopuszczalne odchylenia napięcia w węźle *i*,

N – liczba węzłów w sieci.

W publikacji [40] funkcja celu odpowiedzialna za poziom napięcia w sieci została opisana wzorem (4.11). W tym przypadku zostały uwzględnione wartości napięć w poszczególnych węzłach, jak i moce odbiorów przyłączonych do węzłów. Jeżeli napięcie w danym węźle U_{i} jest poza dopuszczalnym zakresem $U_{\min}$ lub $U_{\max}$, składowa funkcji *F* dla danego węzła przyjmuje wartości ujemne. Celem optymalizacji dla funkcji celu opisanej wzorem (5.11) jest zmaksymalizowanie jej wartości.

$$F = max \sum_{i=1}^{M} \left[\frac{(U_{\mathrm{i}} - U_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_{\mathrm{i}}) \cdot |P_{\mathrm{i}}|}{(U_{\mathrm{n}} - U_{\min}) \cdot (U_{\max} - U_{\mathrm{n}}) \cdot \sum_{j=1}^{M} |P_{\mathrm{j}}|} \right] \tag{4.11}$$

gdzie:

U_{i} – wartość napięcia w węźle *i*,

U_{n} – napięcie znamionowe w węźle

$U_{\min}$ – minimalne dopuszczalne napięcie w węźle,

$U_{\max}$ – maksymalne dopuszczalne napięcie w węźle,

P_{i} – moc czynna pobierana w węźle *i*,

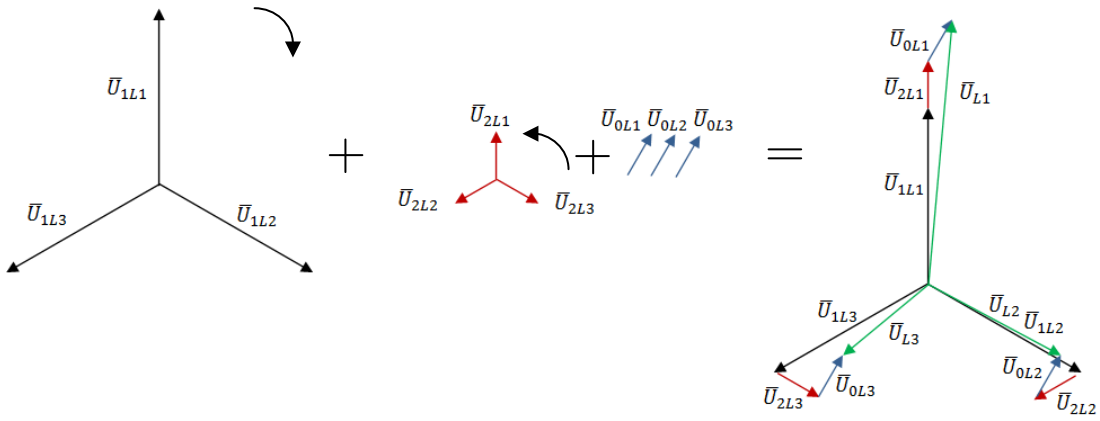
P_{j} – moc czynna pobierana w węźle *j*,

M – liczba węzłów w sieci.

4. 5. Eliminacja asymetrii obciążenia oraz wyższych harmonicznych

W układach trójfazowych asymetrię definiuje się jako stan, gdzie wartości skuteczne napięć (prądów) fazowych nie są tej samej wielkości lub kąty przesunięć pomiędzy wektorami tych napięć (prądów) nie różnią się o 120°. Metoda składowych symetrycznych najczęściej wykorzystywana jest do analizy obwodów pracujących

w warunkach asymetrii. Metoda ta bazuje na zastąpieniu dowolnego niesymetrycznego układu wektorów trójfazowych sumą trzech trójfazowych układów symetrycznych o kolejności: zgodnej, przeciwnej i zerowej. Na rys. 4.9 zobrazowano w sposób graficzny ideę składowych symetrycznych.



Rys. 4.9. Interpretacja graficzna idei składowych symetrycznych

W ustalonych stanach pracy sieci możemy wyróżnić dwa podstawowe rodzaje asymetrii: wewnętrzną i zewnętrzną. Przyczyną asymetrii wewnętrznej (podłużnej) jest różnica impedancji własnych i wzajemnych pomiędzy poszczególnymi fazami elementów przesyłowych sieci. Asymetria zewnętrzna (poprzeczna) zależy od obciążenia poszczególnych faz.

Asymetria prądowa jest zjawiskiem występującym w sieci nn i jest normalnym stanem pracy w sieci w której występują odbiory jednofazowe. Asymetria ta w sieciach dystrybucyjnych powoduje wzrost start mocy liniach oraz asymetrię napięciową.

Przeciwdziałanie asymetrii napięciowej sprowadza się do podjęcia działań polegających m. in. na przyłączaniu nowych odbiorców do mniej obciążonych faz. Z racji tego, że rozkład obciążenia pomiędzy fazami ma charakter losowy oraz brak informacji, z których faz zasilane są instalacje jednofazowe u odbiorców posiadających trójfazowe przyłącze, określenie które odbiory należy przełączyć na inne fazy jest trudne. Inną metodą ograniczenia asymetrii jest instalacja urządzeń służących do symetryzacji obciążenia. Przykładowo są to transformatory wpięte równolegle do sieci z uzwojeniem wtórnym połączonym w zygzak. Kolejnym rozwiązaniem jest odpowiednie zarządzanie przepływem mocy w sieci

elektroenergetycznej. Do realizacji powyższego można zastosować zasobniki energii [42].

Miarą asymetrii napięć i prądów w układzie trójfazowym są współczynniki asymetrii i niezrównoważenia napięć i prądów opisane następującymi zależnościami:

- współczynnik asymetrii napięcia K_{2U},

$$K_{2\mathrm{U}} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% \tag{4.12}$$

- współczynnik asymetrii prądu K_{2I},

$$K_{2\mathrm{I}} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\% \tag{4.13}$$

- współczynnik niezrównoważenia napięcia K_{0U},

$$K_{\mathrm{OU}} = \frac{U_{\mathrm{O}}}{U_1} \cdot 100\% \tag{4.14}$$

- współczynnik niezrównoważenia prądu K_{0I},

$$K_{\mathrm{OI}} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\% \tag{4.15}$$

gdzie:

U_1 – składowa symetryczna zgodna napięcia,
U_2 – składowa symetryczna przeciwna napięcia,
U_0 – składowa symetryczna zerowa napięcia,
I_1 – składowa symetryczna zgodna prądu,
I_2 – składowa symetryczna przeciwna prądu,
I_0 – składowa symetryczna zerowa prądu

Wartość asymetrii ma szczególne znaczenie dla odbiorów zasilających silniki indukcyjne, gdzie pojawia się moment hamujący od składowej przeciwnej i zerowej. Powoduje to niestabilną pracę silnika. W Polsce przepisy zawarte w rozporządzeniu [43] określają dopuszczalne wartości współczynnika K_{2U}. Zgodnie w wymaganiami rozporządzenia 95% z 10-minutowych średnich wartości skutecznych składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego powinno się mieścić w przedziale od 0 do 2% wartości składowej zgodnej.

W pracy [42] wykazano, że można do oceny asymetrii także posłużyć się współczynnikiem obliczonym na podstawie pomiaru napięć fazowych – wzór (4.16).

$$A = \frac{|U_{\mathrm{L1}} - \overline{U}| + |U_{\mathrm{L2}} - \overline{U}| + |U_{\mathrm{L3}} - \overline{U}|}{\overline{U}} \cdot 100\% \tag{4.16}$$

gdzie:

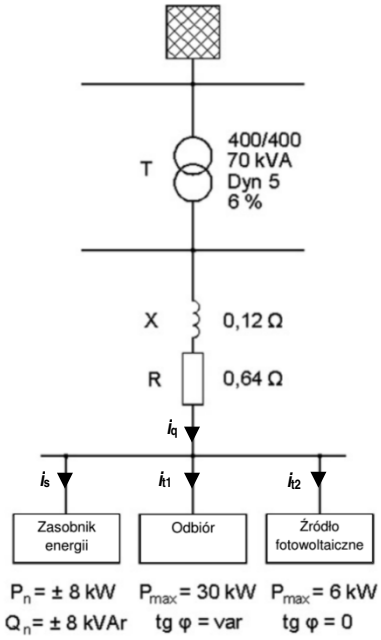
U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} – wartości skuteczne napięć fazowych,

$\overline{U}$ – wartość średnia napięć fazowych.

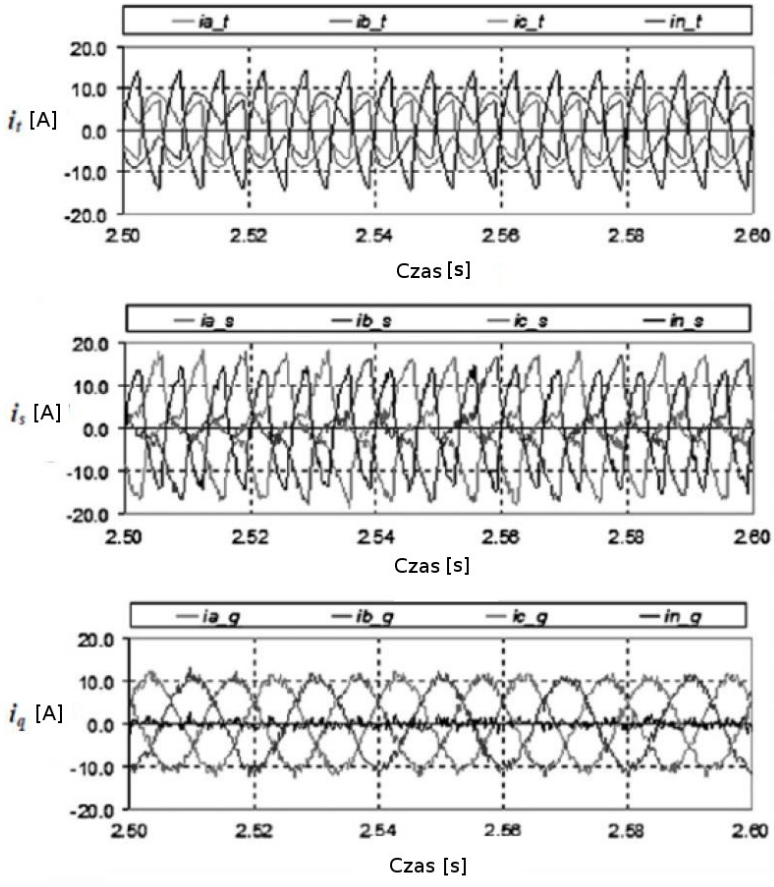
Jak wspominano wcześniej asymetria obciążenia pomiędzy fazami jest częstym problem pojawiającym się w sieci dystrybucyjnej, a zwłaszcza w sieci nn. Wynika to faktu, iż część odbiorców jest podłączona 1-fazowo oraz tego, że nie zawsze jest równomiernie rozmieszczone przyłączenie odbiorców. Wyrównanie asymetrii poprzez zasobnik energii przyłączony do sieci trójfazowo może odbywać się poprzez dostarczanie odpowiedniej mocy do odpowiednich faz [15].
Innymi działaniami, które pozwalają na ograniczenie asymetrii napięciowej w sieci nn (która wynika z niesymetrycznego poboru mocy) mogą być:

- dbałość o równomierne obciążenie poszczególnych faz, poprzez odpowiednie przyłączenie odbiorców do sieci elektroenergetycznej,
- zastosowanie linii o większym przekroju, dzięki temu można uzyskać mniejsze starty mocy na elementach przesyłowych [44], a tym samym mniejsze spadki napięcia na poszczególnych fazach,
- zastosowanie specjalnych urządzeń przyłączanych do sieci równolegle, np. *Phase Balancer* [45].

W rozdziale czwartym omówiono układ energoelektroniczny zasobnika energii. Dzięki przyłączeniu zasobnika energii przez przekształtnik energoelektroniczny AC-DC istnieje możliwość redukcji asymetrii napięciowej oraz kompensacji wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia, które są następstwem niesymetrycznego przebiegu prądu o zawartości wyższych harmonicznych. W publikacji [1] przedstawiono efekt współpracy zasobnika energii z odbiorem i źródłem fotowoltaicznym w jednym węźle. Schemat analizowanego układu przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Schemat analizowanego układu z zasobnikiem energii [1]



Rys. 4.11. Przebiegi prądów w poszczególnych fazach (a, b, i c) oraz w przewodzie neutralnym, i_t – sumaryczny prąd odbioru oraz źródła fotowoltaicznego ($i_t = i_{t1} + i_{t2}$), i_s – prąd zasobnika energii, i_q – wypadkowy prąd sieci zasilającej [1]

Na rysunku 4.11 przedstawiono przebiegi prądu dla odbioru i źródła fotowoltaicznego oraz zasobnika energii. Zadaniem zasobnika energii w tym przypadku jest kompensacja niesymetrii obciążenia oraz wyższych harmonicznych prądu (na który składał się przebieg prądu odbioru oraz przebieg prądu źródła fotowoltaicznego) . Na rys. 4.11 prądy i_{a_t}, i_{b_t}, i_{c_t}, i_{n_t} są przebiegami prądów obciążenia w poszczególnych fazach i przewodzie neutralnym, prący i_{a_s}, i_{b_s}, i_{c_s}, i_{n_s} odpowiadają przebiegom prądów fazowych i w przewodzie neutralnym zasobnika energii, natomiast przebiegi i_{a_q}, i_{b_q}, i_{c_q}, i_{n_q} stanowią sumę prądów odbioru oraz prądów zasobnika energii. Przebiegi prądów i_{a_q}, i_{b_q}, i_{c_q} są symetryczne, w wyniku których wartość prądu w przewodzie neutralnym i_{n_q} jest bliska zeru.

4. 6. Współpraca zasobników energii z odnawialnymi źródłami energii

Współpraca zasobników energii z OZE jest najczęstszym ich zastosowaniem. Oprócz omówionej wcześniej możliwości regulacji napięcia, współpraca zasobników z OZE niesie ze sobą dodatkowe korzyści i zastosowania:

- Ograniczenie odwrotnego przepływu mocy w sieciach promieniowych z dużą liczbą OZE, m. in. przez transformator zasilający [46]. Przepływem odwrotnym określany jest przepływ prądu w sieci, którego kierunek skierowany jest do stacji zasilającej daną sieć
- "Przesunięcie" produkcji energii elektrycznej na okresy szczytowe, dzięki temu można zmaksymalizować wytwarzanie energii elektrycznej przez źródła odnawialne [47].
- Zmniejszenie wpływu stochastycznej zmienności mocy OZE i zwiększenie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego sieci [1], [47]–[50].
- Zmniejszenie błędów wynikających z niedokładnych prognoz pogody [51], [52].

Interesujący przykład funkcji celu (wykorzystanej do optymalizacji lokalizacji i parametrów zasobników energii) został przedstawiony w publikacji [50], w którym założono minimalizację kosztów produkcji energii przez OZE i kosztów samego magazynowania energii w zasobnikach. Omawiana funkcja celu ma postać (4.17).

$$F_1 = min\left[\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{Ng}\left(c_{0_i} + c_{1_i}P_{G_i}^{t} + c_{2_i}(P_{G_i}^{t})^2\right) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{Ns}\left(c_{d_j}P_{d_j}^{t} + c_{ch_j}P_{ch_j}^{t}\right)\right] \qquad (4.17)$$

gdzie:

c_{oi}, c_{1i}, c_{2i} – współczynniki kosztów generacji w węźle *i*,

$P_{G_i}^t$ – generacja mocy czynnej w węźle *i*, w chwili *t*,

c_{dj}, c_{chj} – współczynniki kosztowe ładowania i rozładowania zasobnika energii w węźle *j*,

$P_{d_j}^t$ – moc czynna rozładowania zasobnika energii w węźle *j*, w chwili *t*,

$P_{ch_j}^t$ – moc czynna ładowania zasobnika energii w węźle *j*, w chwili *t*,

Ng – liczba węzłów z generacją mocy,

Ns – liczba zasobników energii.

t – kolejna, dyskretna chwila czasowa zmienności obciążenia sieci.

4. 7. Zasilanie awaryjne

Zasobniki energii można wykorzystać jako źródła interwencyjne do zasilania awaryjnego. Należy przy tym uwzględnić takie kryteria, jak: pewność zasilania odbiorców priorytetowych, wskaźniki niezawodności zasilania SAIDI i SAIFI, ewentualnie pomoc w odbudowie systemu, tj. możliwość zasilenia małych jednostek wytwórczych. Z punktu widzenia pracy sieci dystrybucyjnej zasilenie całej sieci z ZE stanowi pewnego rodzaju problem, gdyż energia zgromadzona w zasobniku energii nie pozwala na długą jego pracę i tym samym długą pracę sieci. Może on zniwelować jedynie krótkie i średnie przerwy w zasilaniu, tj. do kilku / kilkudziesięciu minut. Innym rozwiązaniem jest sterowanie łącznikami w sieci, tak aby zasilić tylko ważnych odbiorców, np. szpitale, czy inne jednostki użyteczności publicznej. Ponieważ głównym stanem pracy dla źródeł awaryjnych jest stan oczekiwania podczas pełnego naładowania, najlepiej sprawdzają się do tego celu zasobniki o niskim współczynniku samorozładowania [54]. W pracy [55] celem optymalizacji było zapewnienie ciągłości zasilenia dla strategicznych odbiorców, tj. szpitale, przepompownie, itp.

4. 8. Eliminacja przeciążenia elementów przesyłowych

Kolejnym kryterium doboru zasobników energii może być eliminacja przeciążeń elementów sieci.

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną w sytuacji niedoinwestowania infrastruktury sieciowej skutkuje wzrostem strat mocy i niejednokrotnie znacznym przeciążeniem jej elementów. Instalacja zasobników energii może stanowić

alternatywę dla modernizacji sieci. Właściwy dobór mocy i lokalizacji zasobników energii pozwala uniknąć lub odroczyć przebudowę sieci, a także zlikwidować przeciążenia elementów przesyłowych. W celu doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii wykorzystuje się następujące kryteria:

- Zmniejszenie strat w sieci dystrybucyjnej. Instalacja zasobnika energii pozwala na lokalne zużycie zgromadzonej energii bez konieczności jej przesyłania. Istotą tego kryterium jest takie umieszczenie zasobników energii, aby w wyniku rozpływu mocy w sieci uzyskać jak najmniejsze straty. Wskaźnikiem jakościowym są straty energii, które bezpośrednio można przeliczyć na korzyści finansowe dla Operatora [25], [33]–[35], [40], [56]–[59].
- zwiększenie przepustowości ciągów przesyłowych – wyeliminowanie najbardziej obciążonych lub przeciążonych elementów przesyłowych w sieciach [22], [60].

4. 9. Praca programowa

Kryterium optymalizacyjne w tym przypadku opiera się na wykorzystaniu okresowej zmienności cen energii. Wiąże się ona z zakupem energii po niższej cenie (ładowaniem zasobnika), w czasie doliny obciążenia, a sprzedażą energii (rozładowywanie zasobnika) po wyższej cenie, czyli w czasie szczytu obciążenia [22], [36], [40], [58]. Optymalizacja wielkości zasobnika jest uwarunkowana różnicą cen, a lokalizacja powinna być tak dobrana, aby nie wprowadzać negatywnego wpływu na jakość energii elektrycznej.

Przykładowa funkcja celu mającą na uwadze zmienność cen energii w ciągu doby / roku oraz uwzględniająca koszt inwestycji w instalację zasobników energii jest przedstawiona w [36] i ma następującą postać opisaną wzorem (4.18). Istotne w tym przypadku jest, aby cena zasobnika energii nie przekraczała zysku związanego z obrotem energią elektryczną.

$$F = max\left\{\sum_{k=1}^{K}\left[\sum_{d=1}^{365}\sum_{h=1}^{24}\left(Ch_{\mathrm{h,d}}\cdot P_{\mathrm{h,d}}^{\mathrm{k}}\right)-\frac{C_{\mathrm{ESS}}^{\mathrm{k}}}{T_{\mathrm{ESS}}}\right]\right\} \tag{4.18}$$

gdzie:

C_{ESS} – koszt inwestycji *k*-tego zasobnika energii,

T_{ESS} – przewidywany czas użytkowania zasobników energii, wyrażony w latach,

$C_{\mathrm{h,d}}$ – cena energii elektrycznej w godzinie *h*, w dniu *d*,

$P_{\mathrm{h,d}}^{\mathrm{k}}$ – moc k-tego zasobnik energii elektrycznej w godzinie *h*, w dniu *d*,

K – liczba zasobników energii,

h – dana godzina obciążenia z zakresu doby,

d – dany dzień roku.

5. METODY WYBORU LOKALIZACJI ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

Lokalizacja zasobników energii w sieci dystrybucyjnej jest problemem rozważanym w wielu publikacjach. Lokalizacja zasobników energii w sieci elektroenergetycznej w zależności od przyjętych kryteriów jest często zagadnieniem wielowymiarowym. W niniejszym rozdziale pracy omówione zostaną metody stosowane do lokalizacji i parametryzacji zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych.

Metody analityczne – (*ang. Analytical Methods* – AM), są to metody, które nie wykorzystują narzędzi optymalizacyjnych. W publikacji [51] moc i energia zasobnika jest określana analitycznie celem zminimalizowania błędów prognozy generacji mocy przez źródła odnawialne. Najczęściej ze względu na złożoność problemu jakim może być lokalizacja zasobników energii w sieci elektroenergetycznej, metody analityczne wykorzystywane są jedynie do określenia wielkości parametrów zasobników energii, a nie lokalizacji [61], [62]–[64]. Istnieje bowiem ryzyko, że w procesie optymalizacji skomplikowanego zagadnienia (jak np. optymalizacja lokalizacji zasobników energii w sieci) metoda analitycznych osiągnie rozwiązanie dla optimum lokalnego, nie osiągając optimum globalnego.

Programowanie Matematyczne – (*ang. Mathematical Programing* – MP), to wykorzystanie modeli matematycznych, w szczególności modeli optymalizacyjnych, w celu ułatwienia podejmowania decyzji. Metoda ta pozwala znaleźć optymalne rozwiązanie dla uproszczonych modeli. W celu wskazania lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii w sieci elektroenergetycznej wykorzystywane są następujące przypadki programowania matematycznego:

- **Programowanie Liniowe** – (*ang. Linear Programming* – LP). Jest to najbardziej efektywna metoda poszukiwania globalnego maksimum, gdzie model i ograniczenia są liniowe. W pracy [65] wykorzystano metodę LP, gdzie liczba i wielkość zasobników energii jest optymalizowana przy wykorzystaniu kryterium zachowania napięcia we właściwym przedziale w węzłach w sieci elektroenergetycznej. W publikacji [66] w procesie optymalizacji zastosowano kryterium kosztowe, którego komponenty zostały określone w sposób liniowy. Programowanie liniowe całkowitoliczbowe (*ang.*

Mix-Integer Linear Programming) zostało zastosowane w celu doboru wielkości i lokalizacji zasobników energii w pracach [60], [67].

- **Programowanie Półokreślone** – (*ang. Semidefine Programming* – SDP) – jest jedną z metod optymalizacji wypukłej (funkcja określona przez użytkownika, którą użytkownik chce zminimalizować lub zmaksymalizować) na przecięciu stożka dodatnich macierzy półokreślonych z przestrzenią afiniczną, tj. widmem. SDP wykorzystano w pracy [22] w celu odpowiedniego zlokalizowania zasobników energii w sieci w sytuacji, kiedy znane są nakłady przeznaczone na instalację zasobników energii. Innym przykładem zastosowania tej metody jest publikacja [58]. W pozycji [47] zastosowano Programowanie Półokreślone z Liczbami Całkowitymi (*ang. Mix-Integer Semidefine Programming*).
- **Programowanie Stożka Drugiego Rzędu** – (*ang. Second-Order Cone Programming* – SOCP) – to optymalizacja wypukła, w którym funkcja liniowa jest zminimalizowana na przecięciu afinicznej liniowej rozmaitości z iloczynem kartezjańskim stożków drugiego rzędu. Metodę tę wykorzystano w pracy [20] w celu znalezienia lokalizacji i wielkości zasobników energii, gdzie celem było zapewnienie w sieci elektroenergetycznej wymaganego poziomu napięcia, zmniejszenie strat oraz kosztów związanych z zakupem energii z zewnętrznej sieci, przy jak najniższym nakładzie inwestycyjnym dla zasobników energii. Przykłady zastosowania metody SOCP znajdują się w także w pracach [68], [69].
- **Programowanie Dynamiczne** – (*ang. Dynamic Programming* – DP), polega na uproszczeniu skomplikowanego problemu poprzez rozbicie go na prostsze problemy cząstkowe względem kilku parametrów. Jeśli problemy podrzędne mogą być rekursywnie zagnieżdżone w większych problemach, tak aby można było zastosować metody programowania dynamicznego, to istnieje zależność między wartością nadrzędnego problemu, a wartościami pod-problemów. Metoda ta została wykorzystana w celu minimalizacji kosztów pracy sieci oraz kosztów inwestycji w zasobniki energii w pracy [70].
- **Programowanie Stochastyczne** – (*ang. Stochastic Programming* – SP). W dziedzinie optymalizacji matematycznej programowanie stochastyczne jest ramą do modelowania problemów optymalizacyjnych, które wiążą się z niepewnością. Celem jest znalezienie rozwiązania, które jest możliwe dla

wszystkich lub prawie wszystkich możliwych przypadków danych i maksymalizuje funkcje decyzji i zmiennych losowych. Metoda SP jest użyta do określenia lokalizacji i wielkości zasobników energii w sieci elektroenergetycznej w pracy [71].

Metoda wyczerpującego poszukiwania – (*ang. Exhaustive Search* – ES). Metoda ta stosowana jest dla przypadków problemów dyskretnych. Dyskretnym problemem może być lokalizacja zasobników energii w sieci elektroenergetycznej. Rozwiązanie poszukiwane jest w całej dziedzinie rozwiązań. Niestety jej przeszukanie jest czasochłonne, gdyż sprawdzana jest każda kombinacja rozwiązania. Taka metoda sprawdza się tylko w przypadkach, w których dziedzina rozwiązań problemu jest niewielka. W publikacji [34] sprawdzono wszystkie możliwości lokalizacji i doboru mocy zasobnika w celu uzyskania odpowiedniego poziomu napięcia w sieci przy zastosowaniu jak najmniejszego zasobnika. Przeszukiwanie zakładało instalację tylko jednego zasobnika energii.

Metody Heurystyczne – (*ang. Heuristic Methods* – HM). Metody te wykorzystują naśladowanie zjawisk występujących w naturze, tj. przystosowanie się populacji do środowiska, znajdywanie pożywienia przez roje osobników w celu znalezienia rozwiązania optymalnego. Nie gwarantują znalezienia globalnego optymalnego rozwiązania, ale pozwalają na szybsze znalezienie rozwiązania zbliżonego do optymalnego w całej przeszukiwanej przestrzeni. Ponadto, nie istnieje tu ryzyko, jak w przypadku metod analitycznych – "zatrzymania się" metody na lokalnym optimum. Stosowane metody heurystyczne do zagadnień związanych z lokalizacją zasobników energii w sieci to m. in.:

- **Algorytmy genetyczne** (*ang. Genetic Algorithms* GA) [25], [53], [72], NSGAII (*ang. Non-Dominated Genetic Algorithm*) w celu optymalizacji wielokryterialnej jest użyty w pracy [73];
- **Metoda Roju Cząstek** (*ang. Particle Swarm Optimization* – PSO) – [35], [40];
- **Sztuczna Kolonia Pszczół** (*ang. Artificial Bee Colony* – ABC) – [74];
- **Algorytm Nietoperza** (*ang. Bat Algorithm* – BA) – [75], [76];
- M**etoda Symulowanego Wyżarzania** (*ang. Simulated Annealing* – SA) – probabilistyczna technika przybliżania globalnego optimum danej funkcji. Jest ona często używana, gdy przestrzeń wyszukiwania jest dyskretna [77];

- **Praktyczne Algorytmy Heurystyczne** (*ang. Practical Heuristic Algorithms* – PHA). Algorytmy te stanowią niekiedy symbiozę różnych metod heurystycznych, np. w pracy [41] połączona została metoda wykorzystująca Algorytmy Genetyczne, z metodą Roju Cząstek.

Metody klastrowania (*ang. Clustering Methods* – CM) – które służą do identyfikacji grup podobnych obiektów w wielowymiarowych zestawach danych. Stanowią one uzupełnienie innych metod poprzez zawężenie dziedziny poszukiwań. Metoda klastrowania została zastosowana do lokalizacji zasobników energii w pracy [23].

Metoda ekspercka pozwala określić przybliżone rozwiązanie, w którym rozważane jest dane kryterium lokalizacji oraz dostępna jest wiedza na temat pracy sieci. Dla kryteriów tych można zaliczyć następujące zasady ogólne [19]:

- Kryterium utrzymania napięcia na wymaganym poziomie,
  - ✓ lokalizacja zasobników energii w węzłach, gdzie występuje najniższe napięcie,
  - ✓ lokalizacja zasobników energii w węzłach, które są daleko od miejsca zasilania sieci (impedancja na drodze: węzeł zasilający – węzeł końcowy jest jedną z największych),
  - ✓ lokalizacja zasobników energii w węzłach, do których przyłączone są duże odbiory.
- Kryterium maksymalizacji produkcji energii ze źródeł odnawialnych. Wymaga się tu lokalizacji zasobnika energii w niewielkiej odległości, w rozumieniu wartości impedancji, od źródła energii elektrycznej.
- Kryterium odciążenia elementów przesyłowych sieci – gdy elementy sieci przeciążone są okresowo, najczęściej w czasie szczytu obciążenia. W celu ich odciążenia, można zastosować zasobnik energii umieszczony na końcu elementu przesyłowego, w kontekście przepływu mocy.

Metoda ekspercka i inne wymienione powyżej, w przypadku kryterium napięciowego mogą bazować na macierzy czułości napięciowej określonej dla poszczególnych węzłów w sieci [33], [50], [78], [32]. W procesie doboru zasobników energii wykorzystywana jest także macierz strat w poszczególnych elementach sieci, która także dostarcza informacji dotyczących cech analizowanej sieci [35].

Tematyka lokalizacji i parametryzacji zasobników energii w sieci elektroenergetycznej jest zagadnieniem złożonym, zwłaszcza gdy analizie podlegają rozległe sieci dystrybucyjne. W takim przypadku metody analityczne mogą być niewystarczające w celu rozwiązania zagadnienia doboru lokalizacji i wielkości zasobników energii. Metody eksperckie mogą zawęzić dziedzinę rozwiązań, ale nie gwarantują uzyskania najlepszego wyniku. Programowanie matematyczne bazuje na uproszczonych modelach, które nie zawsze odzwierciedlają w pełni rzeczywistość, zwłaszcza gdy optymalizowane zmienne są nieliniowe. Zastosowanie metod heurystycznych jest efektywnym rozwiązaniem, które można zastosować do lokalizacji zasobników energii w sieci elektroenergetycznej. Zastosowanie tych metod nie jest skomplikowane, nie wymaga się uproszczenia modelu, rozwiązanie poszukiwane jest w całej dziedzinie, a czas poszukiwania rozwiązania przez algorytmy oparte na metodach heurystycznych jest czasem akceptowalnym. Mając na uwadze powyższe, do opracowania algorytmu wyboru lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii w sieci wykorzystano algorytm genetyczny.

6. ALORYTM GENETYCZNY OKREŚLANIA LOKALIZACJI ZASOBNIKÓW ENERGII

6. 1. Wprowadzenie do zagadnień związanych z wykorzystaniem i zastosowaniem algorytmów genetycznych

Metody heurystyczne w porównaniu z metodami analitycznymi pozwalają na szybsze znalezienie rozwiązania. Możliwe jednak jest, że dokładność znalezienia globalnego ekstremem będzie mniejsza, niż dla metod analitycznych. Zastosowanie metod heurystycznych jest korzystne w celu znalezienia rozwiązania przybliżonego w akceptowalnym czasie. W sytuacji, gdy rozpatrywane jest złożone zagadnienie, którego funkcja celu charakteryzuje się licznymi ekstremami lokalnymi, istnieje dodatkowe ryzyko, że metody analityczne utkną w ekstremum lokalnym. W związku z tym, że lokalizacja zasobników energii w sieci dystrybucyjnej jest zagadnieniem wielowymiarowym, w celu znalezienia rozwiązania zagadnienia użyto metody heurystycznej, której działanie opiera się o algorytm genetyczny. Omawiany algorytm genetyczny został opracowany w programie rozpływowym Power Factory, w języku DPL *(ang. DigSilent Programming Language)*.

Algorytmy genetyczne opierają się na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczeniu. W ich działaniu obowiązuje reguła, że osobniki najlepiej przystosowane (których funkcja celu osiąga najwyższe wartości) mają największe szanse na przeżycie i udział w tworzeniu kolejnego pokolenia. Pomimo tego, że nowe pokolenie tworzone jest z wykorzystaniem przypadkowości, wyselekcjonowanie najlepszych osobników powoduje, że kolejne pokolenia osiągają wyższe przystosowanie do środowiska (osiągają wyższe wartości funkcji przystosowania – funkcji celu). Pomimo elementu losowości, algorytmy genetyczne nie sprowadzają się do przypadkowego błądzenia. Bazują one na doświadczeniu wcześniejszych osobników populacji do określenia kolejnego obszaru poszukiwań, gdzie istnieje prawdopodobieństwo osiągnięcia wyższej wartości przystosowania.

W związku z tym, że w dalszej części pracy do opisu działania algorytmu genetycznego wykorzystywane są pojęcia ściśle związane z daną dziedziną, poniżej podane zostały definicje pojęć używanych w dalszej części pracy.

- Genotyp – struktura – zespół chromosomów danego osobnika. Genotyp może być także osobnikiem populacji.

- Fenotyp – zestaw cech określanych przez genotyp, definiuje jednostkowe rozwiązanie w przestrzeni rozwiązań problemu.
- Chromosom – ciąg kodowy.
- Gen – pojedynczy element w chromosomie.
- Allel – wariant cechy.
- Locus – pozycja.
- Osobnik – pojedynczy członek populacji.
- Populacja – zbiór osobników o określonej ilości. Każdy z osobników posiada swój określony chromosom.
- Generacja – numer kolejnego pokolenia.
- Selekcja – odrzucenie części populacji, która ma niski współczynnik przystosowania.
- Mutacja – zmiana jednego lub więcej genów w chromosomie.
- Krzyżowanie – tworzenie potomka w nowej generacji na zasadzie krzyżowania się części chromosomów z dwóch osobników.
- Reprodukcja – tworzenie nowej populacji [79].

Ogólna zasada działania algorytmu genetycznego jest następująca:

1. W sposób losowy generowana jest populacja, w której każdemu genowi każdego osobnika przypisany jest przypadkowy allel.
2. Ocena przystosowania osobników w populacji poprzez obliczenie wartość funkcji celu dla każdego osobnika.
3. Sprawdzenie warunku zatrzymania algorytmu, np. warunkiem zatrzymania może być osiągnięcie maksymalnej liczby generacji. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, następuje selekcja osobników najbardziej przystosowanych. Jeżeli warunek jest spełniony, następuje przejście do punktu nr 7.
4. Zastosowanie operatorów genetycznych tj. mutacji i krzyżowania w procesie tworzenia nowych osobników, w którym największy udział mają osobniki najlepiej przystosowane.
5. Utworzenie nowej populacji, w której najczęściej nowe osobniki zastępują osobniki najmniej przystosowane. Wyróżniamy tutaj trzy rodzaje sukcesji: z całkowitym zastępowaniem, z częściowym zastępowaniem, z elityzmem.

6. Powrót do punktu nr 2.
7. Jeżeli warunek zatrzymania algorytmu jest spełniony, wybierany jest osobnik o najlepszym przystosowaniu, a algorytm ulega zatrzymaniu [79], [80].

6. 2. Opis algorytmu genetycznego wykorzystanego do określenia lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej

Opracowany algorytm genetyczny służący do wyboru lokalizacji i typu zasobnika energii został w pierwszej kolejności wykorzystany do lokalizacji zasobników energii w sieci SN. Badana sieć SN jest siecią symetryczną, w której duże wartości mocy odbiorów powodują widoczne spadki napięcia w sieci. Lokalizacja zasobników energii opiera się o maksymalizację funkcji celu *F* (w dalszej części pracy opisana wzorem 6.5), na której wartość negatywnie wpływają (pomniejszają jej wartość) koszty związane z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia w sieci oraz za koszty związane z instalacją zasobników energii. Osobniki najlepiej przystosowane osiągają najwyższe wartości funkcji celu. Optymalizacja jest przeprowadzona na bazie dobowej zmienności obciążenia, gdzie zamodelowano zmianę mocy odbiorów co godzinę, stąd $T = 24$.

Przyjęto, że populacja $\boldsymbol{P}$ składa się z k_{max} osobników (*k* jest numerem kolejnego osobnika populacji). Każdy osobnik składa się z jednego chromosomu o *n*-genach. Macierz reprezentująca populację $\boldsymbol{P}$ opisano wzorem (7.1).

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} i_{1,1} & \dots & i_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{k_max,1} & \dots & i_{k_max,n} \end{bmatrix} \tag{6.1}$$

Wartość genu *i* odpowiada konkretnemu węzłowi sieci, w którym jest możliwość przyłączenia zasobnika energii. Wartości jakie mogą być przypisane genom, są liczbami całkowitymi naturalnymi i odpowiadają zdefiniowanemu typu zasobnika energii. W tab. 6.1 przedstawiono przykładowy zbiór wartości jakie mogą przyjmować poszczególne geny oraz odpowiadające im allele. Na rysunku 6.1 przedstawiono przykładową strukturę chromosomu osobnika.

W1	W2	W3	W4	W5	W6
1	6	0	0	6	3

Rys. 6.1. Przykładowa struktura chromosomu osobnika

Tabela 6.1. Przykładowe przyjmowane wartości genów i odpowiadające mi allele [81]

Nr zasobnika energii [przykładowe możliwe przyjmowane wartości dla pojedynczego genu]	Moc P_{N_ZE} [kW]	Pojemność C_{ZE} [Ah]	Koszt C [€]
0	Brak zasobnika energii	Brak zasobnika energii	Brak
1	22,08	415	4610
2	46,22	683	7297
3	74,74	1104	10394
4	142,51	2106	19561
5	238,25	3520	32402
6	328,94	4860	41746
7	465,65	6748	60734
8	526,33	7778	68423

Analizując strukturę przykładowego chromosomu osobnika przedstawionego na rys. 6.1 można stwierdzić, że w tym przypadku przewidziana jest możliwość instalacji zasobnika energii w sześciu węzłach (w1, w2, w3, w4, w5 i w6). Dla danego osobnika do węzła w1 przypisany jest zasobnik energii o mocy 22,08 kW (zgodnie z tab. 7.1), do węzła w2 – 328,94 kW, do węzła w3 i w4 nie jest przypisany żaden zasobnik energii, w węźle w5, moc zasobnika energii wynosi również 328,94 kW, a w węźle w6 – 74,74 kW.

Funkcja celu F (funkcja przystosowania) obliczana jest dla każdego osobnika z populacji (6.2):

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_k \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

Wartość funkcji celu wyznaczana jest na podstawie obliczeń rozpływowych obliczanych dla dyskretnych chwil czasu $t = <0, T>$. Można ją przedstawić w postaci sumy funkcji cząstkowych F_t obliczanych po każdym rozpływie mocy (6.3):

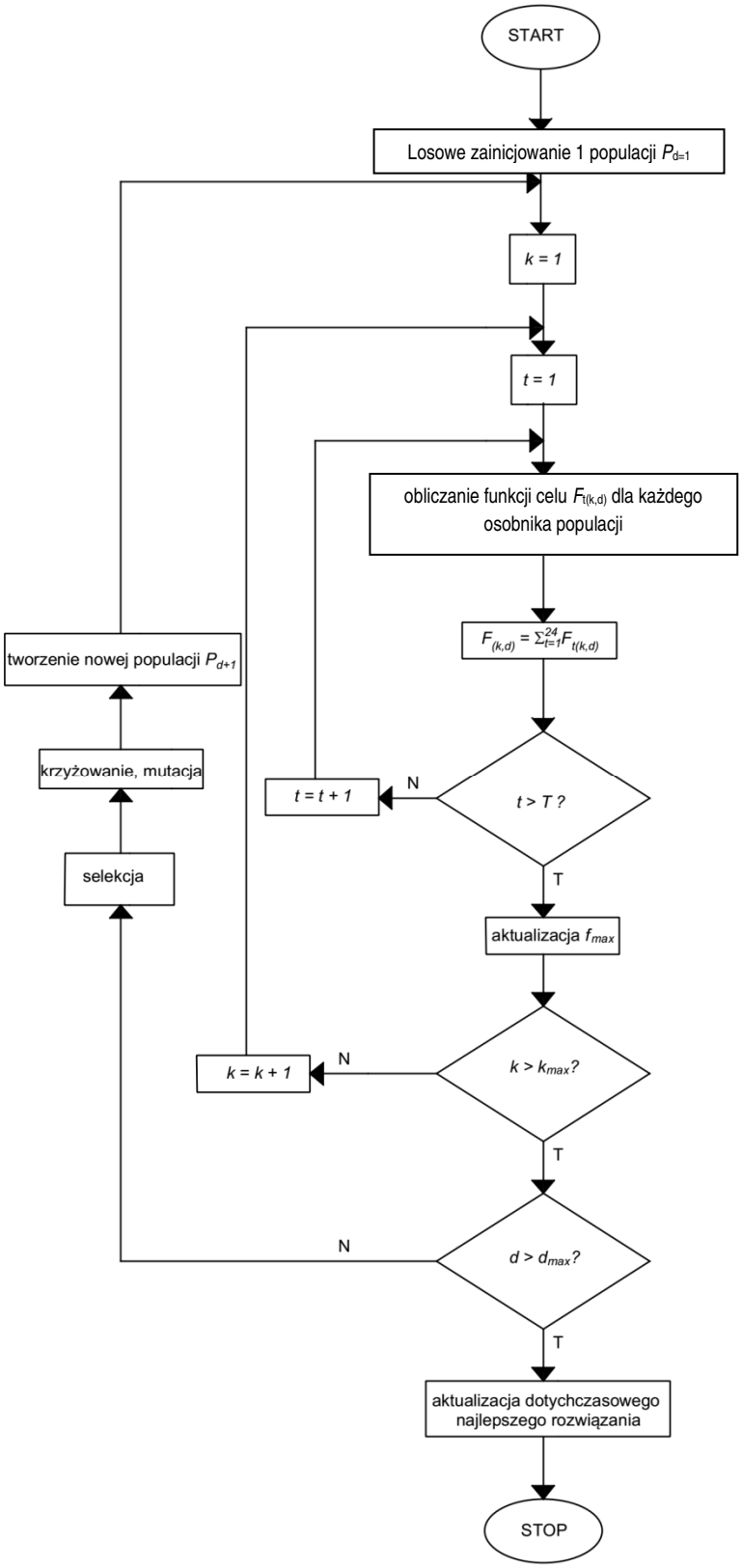
$$F_{\mathrm{k}} = \sum_{t=1}^{T} F_{\mathrm{k_t}} \tag{6.3}$$

Selekcja przeprowadzana jest przy użyciu tzw. metody ruletki, w wyniku której następuje przypadkowy wybór osobników z uwzględnieniem wartości ich funkcji przystosowania. Osobniki charakteryzujące się najwyższą funkcją przystosowania mają największe szanse na współudział w tworzeniu nowego pokolenia. Nowe osobniki są tworzone z wykorzystaniem operatorów genetycznych takich jak: krzyżowanie i mutacja. Sukcesja jest częściowa, tzn. po dokonaniu sortowania odrzucone są osobniki o najniższym stopniu przystosowania. Stopień przystosowania danego osobnika określona jest przez wartość funkcji F_k. Warunkiem zatrzymania działania algorytmu jest osiągnięcie maksymalnej liczby generacji d_{max}. Najlepszy osobnik, którego funkcja przystosowania osiągnęła najwyższą wartość f_{max} wybierany jest ze wszystkich populacji, występujących w całym okresie reprodukcji (6.4):

$$f_{\max} = max \begin{bmatrix} f_{1,1} & \dots & f_{k_max,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{1,d_max} & \dots & f_{k_max,d_max} \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

Po wyborze najlepszego osobnika, wartości genów w jego chromosomie są przypisywane ostatecznemu rozwiązaniu.

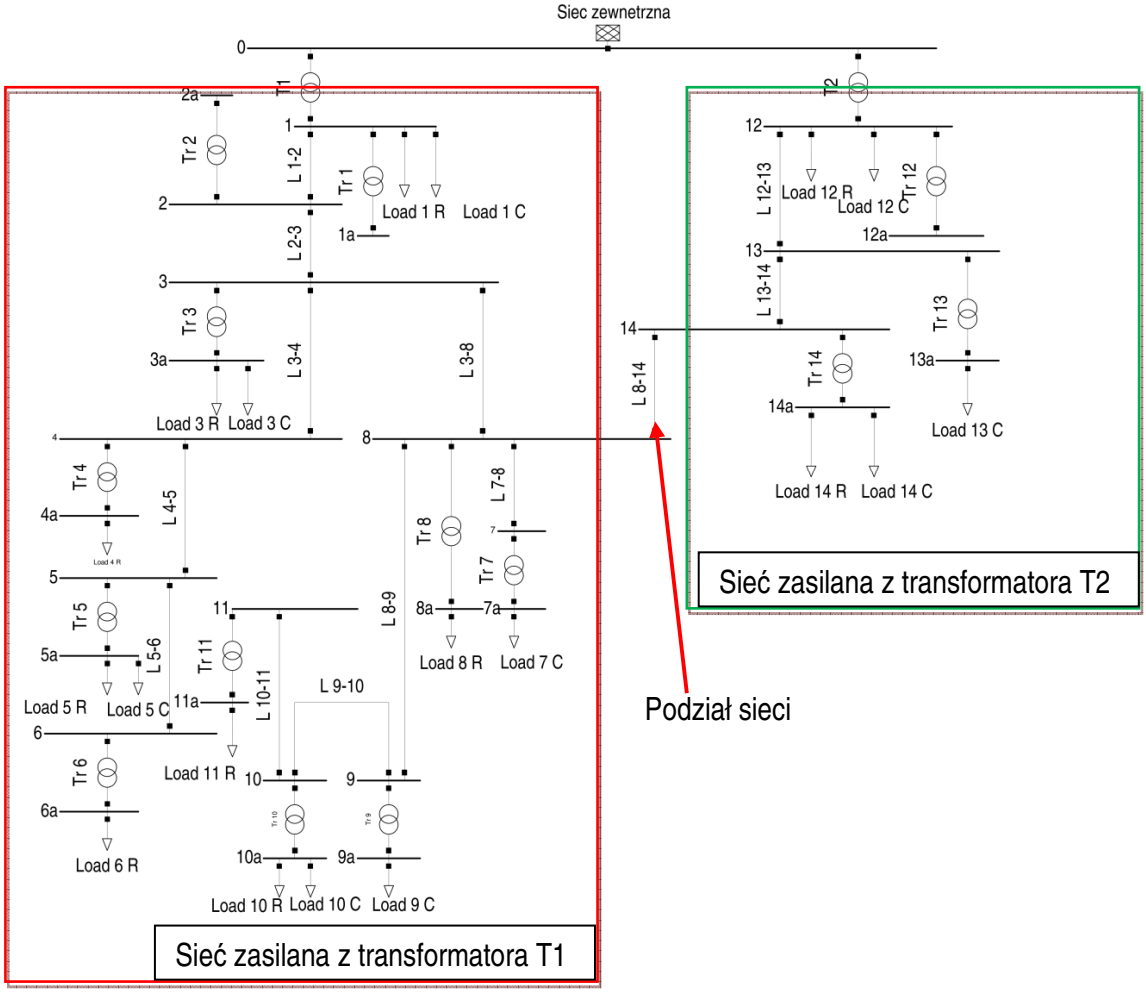
Schemat blokowy działania opisanego Algorytmu Genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci przedstawiono na rys. 6.2.



Rys. 6.2. Schemat blokowy algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej

6. 3. Analiza pracy sieci SN z wykorzystaniem opracowanego algorytmu lokalizacyjnego

Weryfikacja działania algorytmu genetycznego wykorzystanego do lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej została przeprowadzona na testowej sieci SN. Sieć SN zasilają dwa transformatory WN/SN - T1 i T2. W sieci występują podziały, dzięki którym sieć pracuje promieniowo. W przypadku awaryjnej pracy sieci, odbiory są zasilane z jednego transformatora. W analizowanym przypadku z transformatora T1. Wówczas występują problemy napięciowe. Sieć składa się z 14 węzłów SN. Założono, że zasobniki energii mogą być instalowane w każdym węźle po stronie nn, w wydzielonym polu rozdzielnicy nn, znajdującej się na stacji transformatorowej SN/nn. Dodatkowo założono, że koszt instalacji zasobnika energii w węźle 1a i 10a z przyczyn zewnętrznych, związanych z przebudową istniejącej infrastruktury zabudowy jest 3x większy niż w pozostałych węzłach. Okres analizy wynosi jedną dobę. Schemat analizowanej sieci przedstawiono jest na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Schemat analizowanej sieci SN

W związku z tym, że analizowana sieć charakteryzuje się współczynnikiem $R/X << 1{,}0$, założono że kryterium regulacji napięcia jest kryterium dostarczania mocy biernej.

Celem funkcji przystosowania w tym przypadku jest uzyskanie jak najmniejszych odchyleń napięcia w węzłach odbiorczych, przy jednoczesnym zminimalizowaniu kosztu związanego z instalacją zasobników energii (ich odpowiednia lokalizacja w sieci może przełożyć się na potrzebę zainstalowania mniejszej sumarycznej mocy i liczby urządzeń). W ten sposób w skład funkcji celu F wchodzą dwa niezależne składniki, które są sprowadzone do jednego wymiaru – kosztów. Pierwszy składnik W_{UT} (zależność 6.6) związany jest z minimalizacją kosztów związanych z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia, drugi K z sumarycznym kosztem zainstalowanych zasobników energii (koszt danego typu zasobnika energii jest przedstawiony w tab. 6.1), co opisuje zależność (6.5).

$$F = \sum_{t=1}^{T}\left(C - \sum_{n=1}^{N} W_{\mathrm{UT_t}}\right) - \frac{K}{t_{\mathrm{p}}} \tag{6.5}$$

gdzie:

t_{p} – okres eksploatacji zasobników energii – w analizie przyjęto przewidywany okres eksploatacji zasobników energii równy 5 lat (czyli $t_{\mathrm{p}} = 365 \cdot 5$),

n – kolejna węzeł w sieci,

N – Ilość węzłów w sieci,

K – całkowity koszt zasobników energii,

W_{UT} – koszt związany w niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia w sieci.

T – liczba scenariuszy obciążenia.

W krajowym systemie elektroenergetycznym koszty związane z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia podzielone są na trzy przedziały. Gdy wartość napięcia mieści się w wymaganym przedziale U_{minA} i U_{maxA} koszt niedotrzymania jest równy zero. Gdy napięcie mieści się w przedziale $<U_{\mathrm{minB}}; U_{\mathrm{minA}}>$ lub $<U_{\mathrm{maxA}}; U_{\mathrm{maxB}}>$ koszty opisane są wzorem 6.6. Wzór 6.7 jest używany w przypadku przekroczenia wartości napięcia U_{minB} lub U_{maxB} [82], [83].

$$W_{\mathrm{UT}} = \begin{cases} \left(\frac{\Delta U}{\Delta U^*}\right)^2 \cdot A_{\mathrm{t}} \cdot C_{\mathrm{t}} & , gdy\ U \in < U_{minB}, U_{minA} > \cup < U_{maxA}, U_{maxB} > \\ A_{\mathrm{t}} \cdot C + b_{\mathrm{rT}} \cdot t_{\mathrm{r}} & , gdy\ U \in < 0\ , U_{minB} > \cup < U_{maxB,}\ \infty > \end{cases} \tag{6.6}$$

$$\Delta U^* = (U_{minA} - U_{minB})/U_n \tag{6.7}$$

gdzie:

ΔU – odchyłka napięcia od wartości znamionowej,

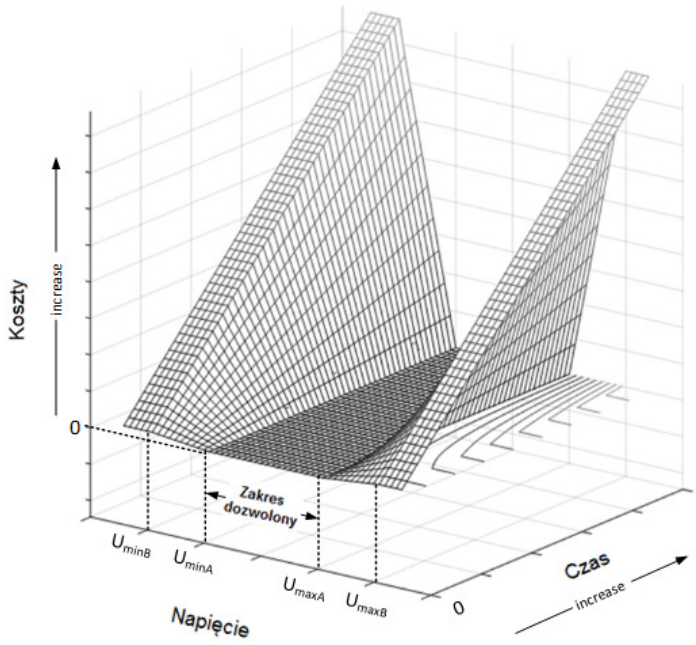
A_t – energia elektryczna [MWh] pobierana w danym węźle podczas analizowanego okresu,

C – średnia cena energii elektrycznej. Do obliczeń została przyjęta średnia cena za rok 2016: 171,14 [zł/MWh],

b_{rt} – dodatkowa opłata za niedotrzymanie wymaganego poziomu napięcia. W 2016 r. optała wynosiła: 10,00 [PLN/h],

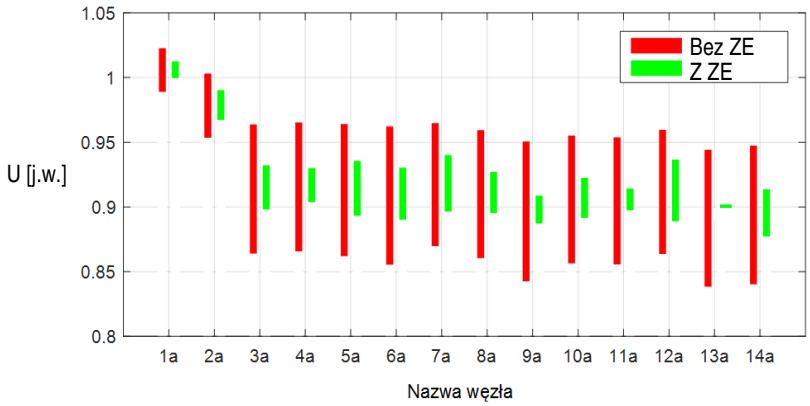
t_r – czas trwania niedotrzymania napięcia.

Graficzna interpretacja komponenetu funcji celu związanego z wartością napięcia w węźle została przedstawiona na rys. 6.4. Jeżeli wartość napięcia U w danym węźle mieści się w zakresie dopuszczlanym tzn. $<U_{minA}, U_{maxA}>$ koszty związane z niedotrzymaniem wymaganej wartości napięcia są równe zeru. Jeżeli wartość napięcia U w danym węźle znajduje się w zakresie $<U_{minB}, U_{minA}>$ lub $<U_{maxA}, U_{maxB}>$ to wartość poniesionych kosztów zależy zarówno od wartości odchyłki napięcia od wartości dopuszczalnej U_{minA}, bądź U_{maxA} oraz od czasu jej trwania. Natomiast jeżeli wartość napięcia U wychodzi poza zakres U_{minB} lub U_{maxB} nie ma znaczenia już wartość napięcia U – koszt jest stały, ale istotny wpływ na wartość kosztów ma czas trwania takiego poziomu napięcia.

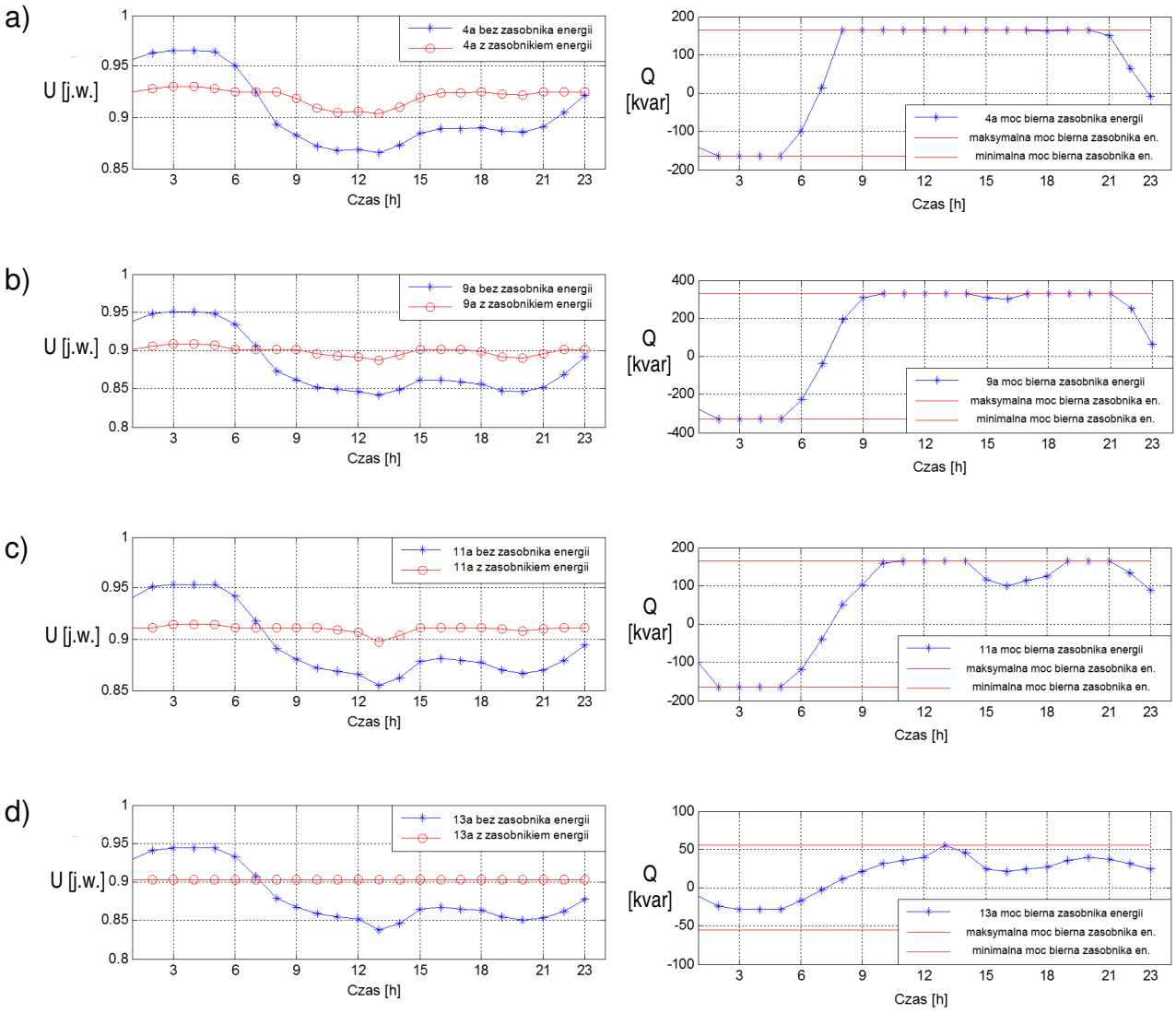


Rys. 6.4. Graficzna interpretacja kosztu związanego z niedotrzymaniem napięcia [4]

Na rys. 6.5 i 6.6 przedstawiono poziomy napięć w wybranych węzłach w sieci dystrybucyjnej przed i po zainstalowaniu w niej zasobników energii oraz wartości mocy biernej wprowadzanej przez wybrane zasobniki energii do sieci. Zasobniki energii działają z kryterium dostarczania mocy biernej (ze względu na współczynnik R/X sieci), przy uwzględnieniu ograniczenia związanego z minimalną lub maksymalną mocą pozorną zasobników energii.



Rys. 6.5. Minimalny i maksymalny poziom napięcia w węzłach analizowanej sieci



Rys. 6.6. Dobowa zmienność napięcia w wybranych węzłach sieci i moc bierna dostarczana lub pobierana przez zasobnik energii zlokalizowany w danym węźle, a) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 4a, b) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 9a, c) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 11a, d) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 13a.

W celu regulacji napięcia w sieci SN zastosowano kryterium mocy biernej z uwagi na charakterystykę sieci, której współczynnik *R/X* wynosił (*R/X* << 1,0). Wprowadzanie mocy biernej przez zasobniki energii jest możliwe, ale powinno to stanowić dodatkową funkcjonalność poza pobieraniem / dostarczaniem mocy czynnej. Typowo do sterowania mocą bierną służą inne urządzenia, tj. filtry aktywne, czy kondensatory.

W celu weryfikacji działania algorytmu genetycznego pod kątem możliwości wprowadzania mocy czynnej wykonano kolejną analizę. Założenia dotyczące liczby i parametrów zasobników energii są takie same jak w poprzedniej analizie. Funkcja celu *F* także nie została zmieniona. Analizę przeprowadzono dla dwóch sieci o różnej wartości współczynnika *R/X*, gdzie $R/X_1 < R/X_2$. Schemat sieci przyjęty do badań odpowiada schematowi sieci na rys. 6.2. Zmianie uległy jedynie parametry elementów sieci (linie napowietrzne zostały zastąpione liniami kablowymi). W celu porównania wpływu zmiany poboru mocy czynnej, jak i biernej w sieci 1 oraz w sieci 2, w analizie zastosowano dwa rodzaje regulacji dla zasobników energii:

- P_{crit} – w którym zasobniki energii mogły dostarczać tylko moc czynną,
- Q_{crit} – w którym zasobniki energii mogły dostarczać tylko moc bierną.

W ten sposób otrzymano następujące warianty analizy:

1. Dla sieci 1 o R/X_1 z kryterium regulacji zasobników energii P_{crit},
2. Dla sieci 1 o R/X_1 z kryterium regulacji zasobników energii Q_{crit},
3. Dla sieci 2 o R/X_2 z kryterium regulacji zasobników energii P_{crit},
4. Dla sieci 2 o R/X_2 z kryterium regulacji zasobników energii Q_{crit}.

Należy zaznaczyć, że w przypadku zastosowania regulacji $P_{crit.}$ należało uwzględnić pojemność zasobnika energii i stan naładowania zasobnika energii. Wprowadzało to dodatkowe ograniczenie w procesie decyzyjnym, w porównaniu do przypadku dla regulacji Q_{crit}.

Macierz czułości napięciowej w poszczególnych węzłach dla wprowadzenia mocy czynnej / mocy biernej dla każdej z sieci została przedstawiona na rys. 6.8. Macierz czułości została obliczona zgodnie ze wzorami (6.8) i (6.9).

$$\frac{\partial U_{\mathrm{i,j}}}{\partial P_{\mathrm{j}}} = \frac{U_{\mathrm{i,j}}\left(\partial P_{\mathrm{j}}\right) - U_{0\mathrm{i}}}{U_{0\mathrm{i}}} \tag{6.8}$$

$$\frac{\partial U_{\mathrm{i,j}}}{\partial Q_{\mathrm{j}}} = \frac{U_{\mathrm{i,j}}\left(\partial Q_{\mathrm{j}}\right) - U_{0\mathrm{i}}}{U_{0\mathrm{i}}} \tag{6.9}$$

gdzie:

U_{0i} – napięcie w danym węźle w sieci,

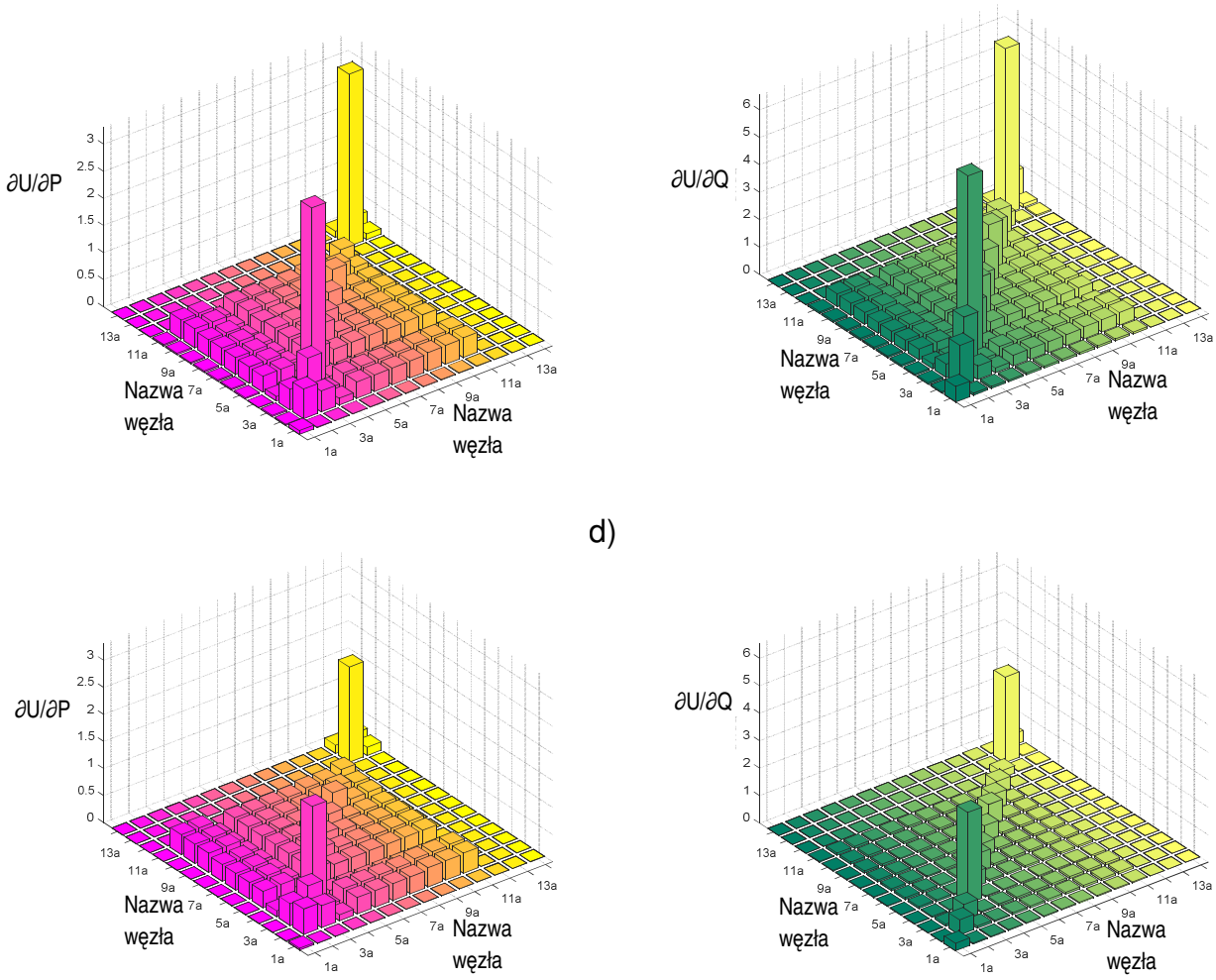
$U_{i,j}$ – napięcie w węźle i po wprowadzeniu jednostkowej mocy czynnej ∂P_j lub ∂Q_j w węźle *j*.

∂P_j – jednostkowa moc czynna wprowadzona w danym węźle *j* równa 0,1 MW,

∂Q_j – jednostkowa moc czynna wprowadz ona w danym węźle *j* równa

0,1 Mvar.

a) b)

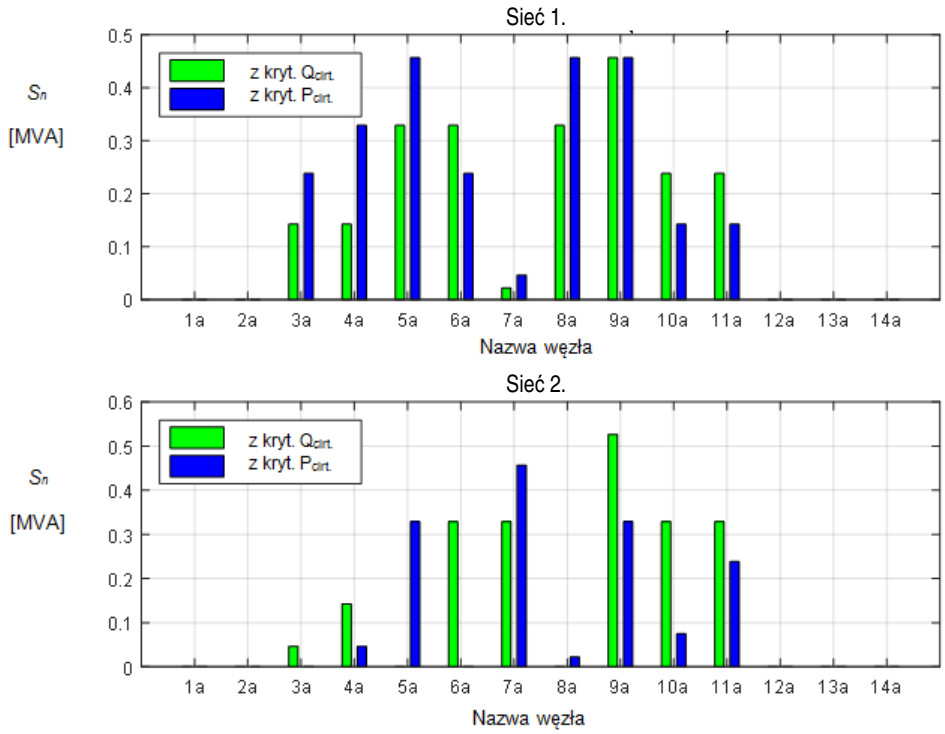


Rys. 6.7. Macierz czułości napięciowej a) $\partial U/\mathrm{d}P$ dla sieci o R/X_1, b) $\partial U/\mathrm{d}Q$ dla sieci o R/X_1, c) $\partial U/\mathrm{d}P$ dla sieci o R/X_2, d) $\partial U/\mathrm{d}Q$ dla sieci o R/X_2.

Sumaryczna moc zasobników energii S_{sum} zainstalowanych w sieci dla każdego z przypadków wynosi:

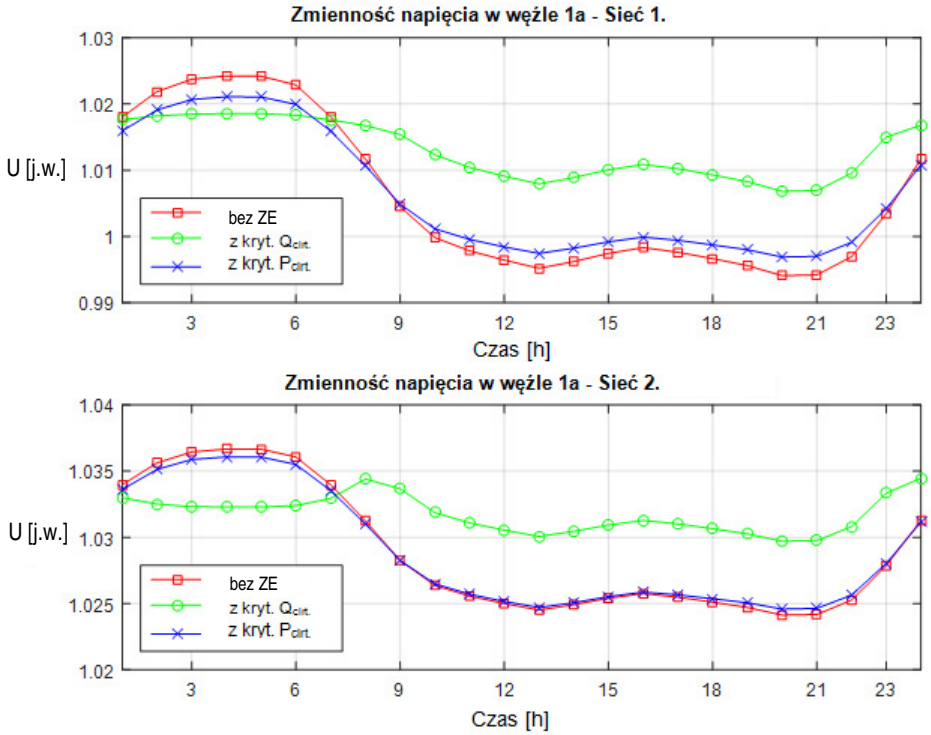
1. Wariant 1: $S_{\mathrm{sum}} = 2506{,}63$ kVA,
2. Wariant 2: $S_{\mathrm{sum}} = 2227{,}07$ kVA,
3. Wariant 3: $S_{\mathrm{sum}} = 1495{,}83$ kVA,
4. Wariant 4: $S_{\mathrm{sum}} = 2030{,}82$ kVA.

Na rysunku 6.8 przedstawiono przypisanie odpowiedniej mocy zasobników energii do poszczególnych węzłów w sieci, dla omawianych wariantów.

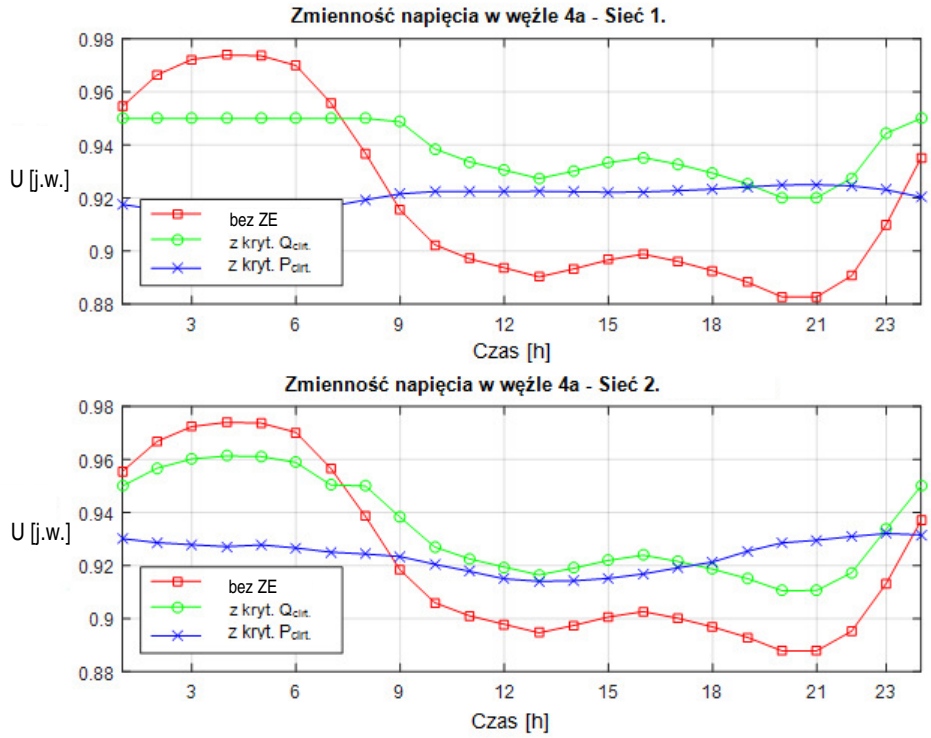


Rys. 6.8. Przypisane mocy znamionowej zasobników energii przez algorytm lokalizacyjny dla dwóch rodzajów regulacji $P_{crit.}$ i $Q_{crit.}$, dla dwóch sieci różniących się współczynnikiem *R/X*

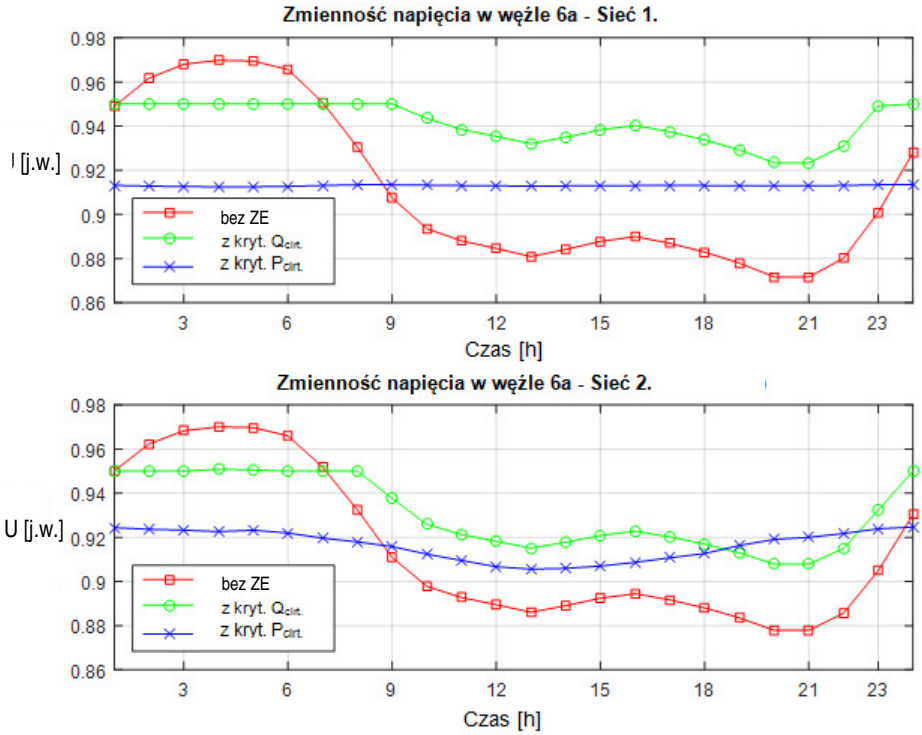
Na rysunkach 6.9 ÷ 6.12 przedstawiono zmienność napięcia w wybranych węzłach obu analizowanych sieci. Na każdym z wykresów przedstawiono krzywe obrazujące zmienność napięcia w danym węźle, dla wariantu kiedy nie ma w sieci zasobników energii, dla wariantu kiedy lokalizacja nastąpiła z kryterium regulacji zasobników energii P_{crit} oraz Q_{crit}.



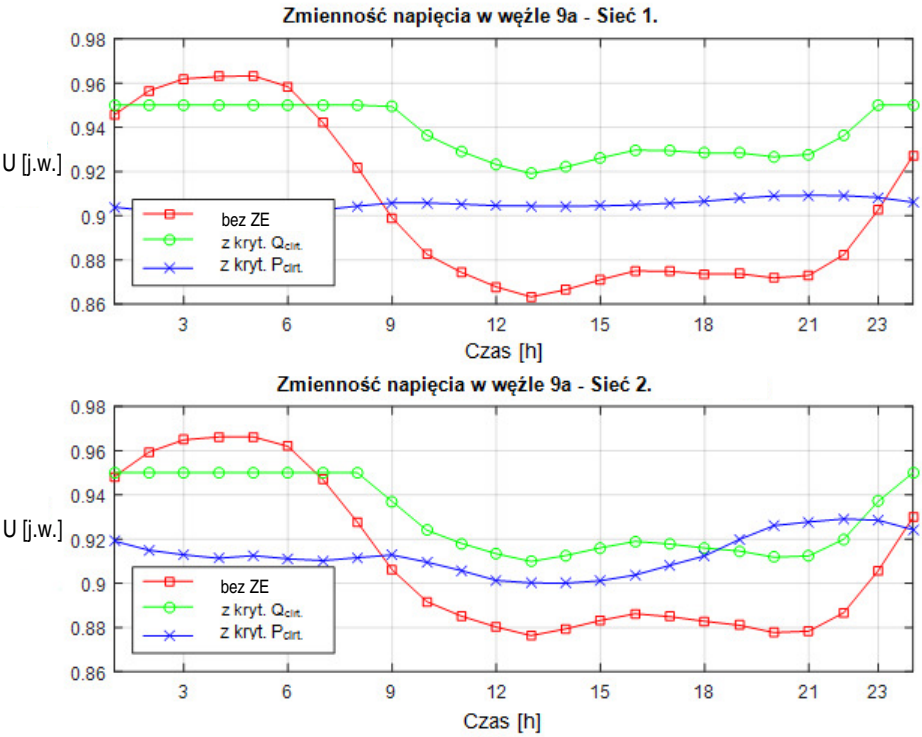
Rys. 6.9. Zmienność napięcia w węźle nr 1a dla sieci nr 1 i 2



Rys. 6.10. Zmienność napięcia w węźle nr 4a dla sieci nr 1 i 2



Rys. 6.11. Zmienność napięcia w węźle nr 6a dla sieci nr 1 i 2



Rys. 6.12. Zmienność napięcia w węźle nr 9a dla sieci nr 1 i 2

Na podstawie porównania wartości napięć w wybranych węzłach, których dobowe zmienności są przedstawione na rys. 6.9 ÷ 6.12, zaobserwowano

następujące zależności. Dla sieci nr 1 ($R/X_1 < R/X_2$) wymagany poziom napięcia w węzłach można było osiągnąć instalując mniejszą ilość zasobników energii (pod względem sumy ich mocy znamionowych) – 2506,63 kVA dla sterowania poziomem napięcia z wykorzystaniem dostarczania/odbierania mocy biernej, niż dla sterowania poziomem napięcia związanego z dostarczaniem/odbieraniem mocy czynnej P_{crit} – 2227,07 kVA. Dla sieci nr 2 wymagany poziom napięcia w węzłach można było osiągnąć instalując mniejszą ilość zasobników energii dla sterowania P_{crit} – 1495,85 kVA (dla Q_{crit} – 2030,82 kVA). Wiąże się to z tym, że większą efektywność w regulacji napięcia dla sieci nr 1 uzyskano stosując sterowanie mocą bierną zasobników energii $Q_{crit.}$, a dla sieci nr 2 stosując sterowanie mocą czynną zasobników energii P_{crit}. Powyższe zależności potwierdzone są także przez macierze czułości napięciowej przedstawione na rys. 6.7. Macierz czułości napięciowej przedstawia zmianę napięcia w poszczególnych węzłach w sieci na skutek wprowadzenia jednostkowej mocy czynnej lub biernej w kolejnych węzłach. Porównując przypadki a i b przedstawione na rys. 6.7 stwierdzono, że dla sieci nr 1 większy wpływ na poziom napięcia w sieci ma moc bierna. Dla sieci nr 2 macierz czułości napięciowej została zobrazowana na rys. 6.7 przypadek c i d. Sieć nr 2 charakteryzuje się tym, że w niej istotniejsza z punktu sterowania poziomem napięcia w sieci jest moc czynna. Zwłaszcza widoczny w tym przypadku jest wpływ wprowadzenia jednostkowej mocy czynnej na poziom napięcia w węźle w którym została ona wprowadzona, jak i w węzłach sąsiednich. Wpływ mocy biernej w sieci nr 2 na poziom napięcia w węzłach sąsiednich jest znikomy.

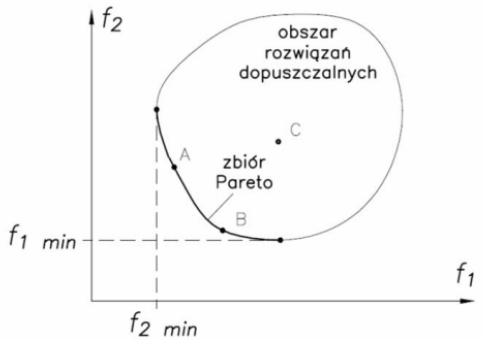
Z analizy wyników badań wynika, że wykorzystanie możliwości wprowadzania mocy biernej przez zasobniki energii do sieci może przynieść wymierne korzyści pod względem regulacji napięcia w sieci. Z tego względu warto wziąć pod uwagę zarówno kryterium wprowadzania mocy czynnej jak i biernej do regulacji napięcia w sieci. Oba rodzaje regulacji stanowią element algorytmu działania regulatora zasobnika energii przedstawionego w dalszej części rozprawy. W związku z tym, że docelowo analizowane są sieci nn (współczynnik $R/X_{nn} >> 1{,}0$), w których występują zakłócenia związane z nadmiernym obciążeniem sieci lub wprowadzania mocy przez generację rozproszoną, kryterium nadrzędnym dla sieci nn jest P_{crit} (kryterium mocy czynnej*).* Dopiero, gdy kończą się możliwości wprowadzania mocy czynnej (np. ze względu na stan naładowania zasobnika energii) brana jest pod uwagę możliwość wymiany mocy biernej.

7. FUNKCJA CELU ALGORYTMU LOKALIZACYJNEGO I JEJ KOMPONENTY

7. 1. Polioptymalizacja – wprowadzenie

Dobór lokalizacji i parametrów zasobników energii w sieci elektroenergetycznej jest zagadnieniem wielokryterialnym, ponieważ optymalizowane są przynajmniej dwie niezależne, przeciwstawne funkcje: np. liczba i wielkość zasobników (tj. moc znamionowa, pojemność) co przekłada się na koszt inwestycji oraz funkcja definiująca korzyści. Funkcja odpowiadająca kosztom powinna być jak najmniejsza, a potencjalny zysk jaki możemy osiągnąć w zależności od wybranego kryterium (stabilizacja napięć, ograniczenie strat, itp.) powinien być maksymalizowany.

Wyróżnia się optymalizację wielokryterialną niezdominowaną i zdominowaną. W procesie optymalizacji niezdominowanej (paraoptymalnej) znajduje się zbiór rozwiązań, w których istnieje zasada, że znalezienie rozwiązania lepszego z uwagi na jedno kryterium f_1 (rys. 7.1) nie jest możliwe bez pogarszania innego kryterium f_2 (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Zbiór Pareto dla zadania minimalizacji [84]

Rozwiązanie zdominowane dla X (X oraz Y stanowi częściową dziedzinę rozwiązań) istnieje, kiedy dla każdej funkcji celu f_i następuje zależność $f_i(x)>f_i(y)$,

Wyróżniamy natomiast następujące metody optymalizacji zdominowanych [85], [86]:

- Metoda ważonych kryteriów (ang. *Weighted Objectives Method*) – nadaje poszczególnym składowym funkcji celu odpowiednie wagi i sprowadza metodę do jednokryterialnej. Metoda ta jest łatwa w stosowaniu i implementacji, jednak mogą pojawić się problemy z doborem wag dla poszczególnych składowych. Przykładem takiej metody jest sprowadzenie wszystkich komponentów funkcji

do wymiaru jednej ogólnej zmiennej, np. kosztów [78], [87] lub mocy [57]. W dalszej części pracy przeliczone zostały wszystkie kryteria do jednej zmiennej, jakim są koszty.

- Metoda optymalizacji hierarchicznej (*ang. Hierarchical Optimization Metod*) – polega na sprowadzeniu wielokryterialnej funkcji celu do jednokryterialnej, która jest optymalizowana kolejno względem następujących w odpowiedniej kolejności kryteriów. W tej metodzie należy w pierwszej kolejności ustawić hierarchię optymalizowania poszczególnych składowych funkcji celu, a następnie ustawiając pewien dopuszczalny margines zmian wartości dla poprzedniego kryterium, optymalizować kolejne. Metoda ta jest wykorzystana w publikacji [19], gdzie poszczególnym kryteriom nadano wagi / hierarchię zgodnie z prawdopodobieństwem konieczności działania według ustalonego kryterium.
- Metoda ograniczonych kryteriów (*ang. Trade-Off Metod*) – w tej metodzie ustalane są poziomy wartości, jakie mogą przyjmować kolejne kryteria, co skutkuje ograniczeniem przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. W pracy [34] uzyskanie napięcia w poszczególnych węzłach analizowanej sieci, którego wartość znajduje się w odpowiednim przedziale, jest kryterium ograniczającym dziedzinę rozwiązań optymalizacji dotyczącej doboru lokalizacji i wielkości zasobnika.
- Metoda kryterium globalnego (*ang. Global Criterion Method*) – metoda ta zakłada poszukiwanie rozwiązania przybliżonego *F(X*)* dla sformułowania kryterium dla optymalizacji jednokryterialnej o postaci:

$$\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{M}} \left(\frac{f_{\mathrm{i}}(X^*) - f_{\mathrm{i}}(X)}{f_{\mathrm{i}}(X^*)} \right)^{\mathrm{P}} \rightarrow MIN \tag{8.1}$$

gdzie:

$f_{\mathrm{i}}(X^*)$ – rozwiązanie przybliżone,

$f_{\mathrm{i}}(X)$ – rozwiązanie poszukiwane,

M – liczba kryteriów,

P – stała przyjmująca wartości z zakresu <1,2>.

Metoda ta została zastosowana w pracy [40], optymalizowana była lokalizacja i wielkość zasobników pod kątem: wyrównywania obciążeń, utrzymywania

odpowiedniego poziomu napięcia w sieci oraz możliwości zmagazynowania mocy czynnej dostarczonej do sieci przez odnawialne źródła energii.

- Metody funkcji odległości (*ang. Method of Distance Functions*) – opiera się o podobne działanie jak metoda kryterium globalnego, gdzie początkowo poszukiwane jest rozwiązanie przybliżone, za to w drugiej części minimalizuje się funkcję o postaci:

$$\sum_{i=1}^{M}\left[\left(\frac{f_i(X^*)-f_i(X)}{f_i(X^*)}\right)^P\right]^{\frac{1}{P}} \rightarrow MIN \tag{7.2}$$

gdzie:

$f_{\mathrm{i}}(X^*)$ – rozwiązanie przybliżone,

$f_{\mathrm{i}}(X)$ – rozwiązanie poszukiwane,

M – liczba kryteriów,

P – stała przyjmująca wartości z zakresu <2, ∞>.

- Metoda programowania celów (*ang. Goal Programming Method*) – w tej metodzie poszczególne kryteria traktowane są jako cele, które trzeba osiągnąć (których wartości muszą zmieścić się w ustalonym przedziale).
- Algorytm VEGA (*ang. Schaffer's Vector Evaluated Genetic Algorithm*) – algorytm który wykorzystuje metody heurystyczne przeszukiwania dziedziny rozwiązań. Jego działanie polega na wyborze najlepszych osobników z *k-tej* liczby zbiorów (*k* jest również ilością kryteriów), w oparciu o kryterium *K*. Następnie, wybrane osobniki w populacji tymczasowej są poddawane procesom mutacji i krzyżowania, po czym ponownie dzielone są na *k* zbiorów, gdzie następuje ewolucja populacji w każdym zbiorze według kryterium *K.*
- Algorytm HLGA (*ang. Hajela and Lin's Weighting-based Genetic Algorithm*) – każdy osobnik ma zakodowane wagi dla poszczególnych kryteriów, które są różne dla poszczególnych osobników.
- Algorytm FFGA (*ang. Fonseca and Fleming's Multiobjective Genetic Algorithm*) – Bazuje ona na nadawaniu rang osobnikom, które później determinują wartość ich przystosowania. Rangi są nadawane w taki sposób, że z populacji bazowej wybierane są osobniki niezdominowane i przypisywana jest im ranga (np. o wartości "1"). Z kolejnych osobników wybieramy znowu te które są niezdominowane i nadajemy im kolejną rangę równą (np. o wartości "2"). Postępujemy tak do póki nie nadamy rang wszystkim osobnikom.

- Algorytm NPGA (*ang. Niched Pareto Gentic Algorithm*) – bazuje na technice opartej na dominacji z selekcją turniejową, w której najmniej przystosowane osobniki są odrzucane.
- Algorytm NSGA (*ang. Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) – metoda ta skupia się na podzieleniu osobników w podpopulacje, następnie ze względu na nadane im rangi, następnie korzystając z metody niszowej zapewnia równomierne pokrycie zbioru rozwiązań. Metoda niszowa obniża funkcję przystosowania dla osobników bardzo podobnych (za wyjątkiem jednego), co wpływa na tempo zbieżności. W pracy [73] zastosowano metodę NSGA II w celu znalezienie rozwiązania dla trzech osobnych celów: maksymalizacji dochodu z obrotu energią na rynku energii, minimalizacji strat w sieci dystrybucyjnej oraz maksymalizacji dochodu z generacji energii przez źródła odnawialne.

7. 2. Wielokryterialna funkcja celu algorytmu lokalizacyjnego

Z praktyki związanej z eksploatacją sieci dystrybucyjnej wynika, że obecnie w sieciach SN i nn głównymi problemami statycznymi są problemy związane z niedotrzymaniem wymaganej wartości napięcia oraz problemy z przeciążeniem elementów przesyłowych. Te wymagania zostały uwzględnione jako składowe funkcji celu w dalszych badaniach. Dodatkowym elementem składowym funkcji celu jest ograniczenie strat mocy czynnej w sieci. Wymagania te powinny być spełnione przy jak najniższym koszcie związanym z instalacją zasobników energii.

Celem optymalizacji jest zmaksymalizowanie wartości funkcji celu opisanej poniższym wzorem (7.3):

$$F = C - \sum_{\mathrm{t}=1}^{\mathrm{T}} (p_1 + p_3 + p_4) - \mathrm{p}_2 \tag{7.3}$$

gdzie:

p_1 – składowa funkcji celu odpowiedzialna za koszt niedotrzymania wymaganego poziomu napięcia w sieci [PLN],

p_2 – składowa funkcji celu odpowiedzialna za koszt instalacji zasobników energii w sieci [PLN],

p_3 – składowa funkcji celu odpowiedzialna za straty mocy w sieci [PLN],

p_4 – składowa funkcji celu odpowiedzialna za koszt związany

z przeciążeniem elementów przesyłowych sieci [PLN],

C – stała wykorzystana, aby funkcja przyjmowała wartości dodatnie.

7. 2. 1. Składowa funkcji celu związana z poziomem napięcia w sieci elektroenergetycznej

Nadrzędną składową funkcji celu wykorzystaną w niniejszej pracy jest poziom napięcia w węzłach w sieci. Składowa ta jest sprowadzona do kosztów, które związane są z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia w sieci (w wyniku wysokiego obciążenia sieci – przypadek kiedy napięcie jest poniżej dolnego zakresu lub generacji mocy w głębi sieci – przypadek w którym napięcie jest powyżej dopuszczalnego zakresu). Koszt niedotrzymania wymaganego poziomu napięcia w poszczególnych węzłach w sieci jest związany z poborem mocy w tych węzłach. Oznacza to, że w węźle w którym nie ma poboru mocy koszt niedotrzymania poziomu napięcia jest zerowy. Zależność ta została opisana wzorami (6.6) oraz (6.7).

Składowa funkcji celu odpowiedzialna za poziom napięcia w badanej sieci pozostaje niezmienna - taka jak w przypadku poprzednich analiz, określona ogólnym wzorem (7.4):

$$p_1 = \sum_{n=1}^{N} W_{\mathrm{UT}} \tag{7.4}$$

gdzie:

W_{UT} – koszt związany z niedotrzymaniem napięcia w węźle n,

N – liczba węzłów w sieci.

7. 2. 2. Koszt instalacji zasobników energii

Koszt zasobników energii jest związany z wyborem odpowiedniego typu zasobnika energii. W tabeli 7.1. zestawiono koszty zasobników energii przewidzianych do pracy w sieci nn.

Tabela 7.1. Parametry techniczne oraz koszt zasobników energii wykorzystanych w analizie pracy sieci nn [88]

Nr zasobnika	Moc [kW]	Pojemność [kWh]	Koszt [PLN]
1	4,0	7,5	33 020
2	4,8	9,0	37 540
3	5,6	10,5	41 665
4	6,4	12,0	45 770
5	8,2	13,5	49 670
6	9,0	14,0	53 370

Koszt związany z instalacją zasobników energii jest związany z wyborem mocy i pojemności zasobników energii oraz ich miejsca zainstalowania. W związku z tym, że analiza pracy sieci obejmuje 1 dobę, koszt instalacji zasobnika w danym węźle jest podzielony przez przewidywany okres eksploatacji zasobnika energii (dla nowoczesnych baterii litowo-jonowych średni przewidywany czas eksploatacji to ok. 10 lat, tj. t_p = 365 * 10). Sumaryczny koszt instalacji zasobników energii w sieci obejmuje sumę kosztów wszystkich urządzeń przeznaczonych do magazynowania energii w N węzłach.

$$p_2 = \sum_{n=1}^{N} \frac{K + w_n}{t_p} \tag{7.5}$$

gdzie:

W_n – koszt instalacji zasobnika w węźle n,

K – koszt danego typu zasobnika energii,

t_p – czas eksploatacji zasobnika energii w odniesieniu do czasu trwania analizy.

7. 2. 3. Straty energii w sieci elektroenergetycznej

Straty mocy czynnej w sieci elektroenergetycznej ΔP poprzez pomnożenie przez cenę energii elektrycznej C_t oraz czas t można wprost odnieść do kosztów. Straty energii obejmują sumaryczne straty enegii w sieci składającej się z L elementów przesyłowych.

$$p_3 = \sum_{l=1}^{L} \Delta P_l \cdot C_{\mathrm{t}} \cdot t \tag{7.6}$$

gdzie:

ΔP_l – straty mocy czynnej w elemencie sieci l,

L – liczba elementów sieci,

t – czas pomiędzy kolejnymi dyskretnymi wartościami obciążenia.

7. 2. 4. Obciążenie elementów przesyłowych

Przekroczenie temperatury dopuszczalnej długotrwale określonej dla danego typu izolacji przewodu elektroenergetycznego powoduje zmniejszenie projektowanej trwałości izolacji według zależności wykładniczej opisanej krzywą Arrheniusa. Zależność ta jest zawarta w składowej p_4, który jest opisany wzorem (7.8) i który ma zastosowanie w przypadku linii elektroenergetycznych.

$$p_4 = \sum_{i=1}^{L} a \tag{7.7}$$

gdzie

$$a = \begin{cases} \dfrac{\left[C_{\mathrm{TP}} \cdot l \cdot \left(1 - 127768e^{-8{,}715 \cdot \frac{L_{\mathrm{obc_i}}}{100\%}}\right)\right] \cdot t_{\mathrm{i}}}{T} & , gdzie\ \left(L_{\mathrm{obc_i}} > 100\%\right) \\ 0 & , gdzie\ \left(L_{\mathrm{obc_i}} < 100\%\right) \end{cases} \tag{7.8}$$

gdzie:

C_{TP} – jednostkowa cena danego typu przewodu [PLN/km],

L – liczba elementów przesyłowych w sieci,

l – długość przewodu [km],

L_{obc} – obciążenie elementu [%],

T – analizowany okres [h],

t_{i} – okres trwania przeciążenia [h],

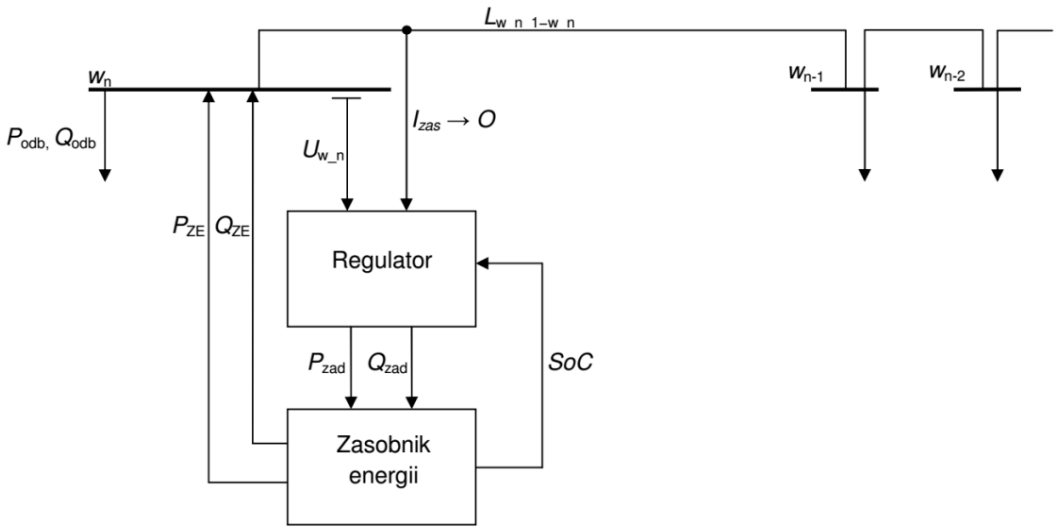
a – zmienna pomocnicza.

Według pracy [89] temperatura graniczna przewodu dopuszczalna długotrwale jest tak dobrana, aby znamionowa trwałość termiczna izolacji wynosiła $20 \div 30$ lat. Dla przewodów o izolacji z polwinitu oszacowano, że 1 h pracy przy przeciążeniu 20% odpowiada 5 h pracy w temperaturze dopuszczalnej długotrwale, zaś 1 h pracy przy przeciążeniu 45% odpowiada 50 h pracy w temperaturze znamionowej [90].

8. STEROWANIE ROZMYTE ZASOBNIKIEM ENERGII

8. 1. Wstęp

Dotychczas nie została przeanalizowana sytuacja, w której zasobnik może dostarczać moc czynną i bierną jednocześnie. W tym celu został opracowany regulator zasobnika energii. Schemat układu regulacji zasobnika energii przedstawiono na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Schemat układu regulacji zasobnika energii

Daną wejściową regulatora zasobnika energii jest wartość napięcia w sieci U_{w_n} (wybrano pomiar napięcia w punkcie przyłączenia zasobnika do sieci, ale również możliwy jest pomiar napięcia wykonany w dowolnym węźle sieci). Kolejną zmienną wejściową jest obciążenie linii zasilającej *O* (wartości obciążenia linii zasilającej zostały przeliczone do jednostek względnych przy uwzględnieniu założonego dobowego profilu obciążenia, możliwy także jest wybór dowolnej linii w sieci – nie koniecznie linii zasilającej). W procesie regulacji brany jest pod uwagę również stan naładowania zasobnia energii *SoC*. Zmiennymi wyjściowymi regulatora zasobnika energii są wartości zadane mocy czynnej i biernej P_{zad} i Q_{zad}. Po otrzymaniu informacji o zadanych wielkościach mocy P_{zad} i Q_{zad} zasobnik energii dostosowuje do nich swoją moc wyjściową P_{ZE} i Q_{ZE}. Model regulatora został opracowany w programie rozpływowym Power Factory, z użyciem wewnętrznego języka programowania DPL.

8. 2. Przegląd rozwiązań stosowanych do regulacji zasobników energii

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione metody regulacji, wykorzystane w procesie sterowania zasobnikiem energii. Dodatkowo zostały omówione ograniczenia, które należy uwzględnić w procesie regulacji.

Wyróżnia się następujące metody regulacji:

- Regulacja prosta (*ang. Simple Controller*)– oparta najczęściej na wykorzystaniu regulatora PID. Działanie regulatora PID odbywa się w pętli sprzężenia zwrotnego, gdzie obliczana jest wartość uchybu. Uchybem nazywana jest różnica pomiędzy wartością zadaną, a jej wartością zmierzoną. Celem regulacji jest minimalizacja wartości uchybu poprzez odpowiednie podawanie sygnału na wejście regulowanego obiektu. W pracy [91], [94] minimalizowano odchyłkę napięcia w węźle w sieci. W publikacji [92] zastosowano regulację PID zasobnika energii współpracującego z farmą wiatrową w celu minimalizacji fluktuacji mocy wyjściowej farmy wiatrowej oraz regulacji częstotliwości w sieci. W pracy [93] regulacja prosta została wykorzystana w celu minimalizacji błędu prognozy generacji.
- Regulacja rozmyta (*ang. Fuzzy Controller*) – naśladuje w pewien sposób ludzkie umiejętności rozwiązywania złożonych problemów w prosty sposób. Związane jest to z tym, że w ludzkich rozumowaniach stosowane są uproszczone modele rzeczywistości oraz brane pod uwagę niezbyt precyzyjne dane w ograniczonej ilości. Taki sposób rozumowania wynika z mniejszych możliwości – w porównaniu z maszyną – percepcji i przetwarzania informacji w czasie rzeczywistym. Sterowanie rozmyte stanowi alternatywę dla sterowania klasycznego, zwłaszcza tam, gdzie nie jest wymagana bezwzględna precyzja, a natomiast liczy się prostota rozwiązania i szybkość działania. Przykłady zastosowania regulacji rozmytej do sterowania zasobnikiem energii podano w pracach [93], [95].
- Z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (*ang. Artificial Neural Network Controller*). Sieci neuronowe składają się z elementów zwanych neuronami, zaprogramowanych tak, aby tworzyły odpowiedź na zewnętrzny sygnał pobudzający. Neuron to podstawowy blok konstrukcji sieci. Jego nazwa pochodzi od biologicznego odpowiednika, ale w tym

przypadku neuron jest modelowany przez mały segment kodu komputerowego, zwany perceptronem. Kilka neuronów zostaje wzajemnie połączonych w sieć, która w procesie treningu uczy się, jak odpowiadać na sygnał pobudzający. Jest to proces iteracyjny – polega na podaniu sygnału pobudzającego, porównaniu odpowiedzi z odniesieniem i dokonaniu korekcji. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość bieżącego "uczenia się" regulatora w kontekście podejmowanych decyzji, nawet jeśli zmianie ulegnie środowisko pracy. Przykład wykorzystania sieci neuronowych do sterowania zasobnikiem energii do współpracy z OZE przedstawiono w pracy [93].

- Przy użyciu Programowania Matematycznego – (*ang. Mathemetical Programming*). W pracy [96] zastosowano metodę Dynamicznego Programowania Stochastycznego (*ang. Stochastic Dynamic Programming*) w celu złagodzenia wahań mocy produkowanej przez elektrownie wiatrową z uwzględnieniem procesu starzenia się zasobnika energii w zależności od liczby wykonanych cykli i głębokości rozładowania, metoda ta została także wykorzystana w [97], [98]. Stochastyczne programowanie dynamiczne jest techniką modelowania i rozwiązywania problemów podejmowania decyzji w warunkach niepewności. Stochastyczne programowanie dynamiczne, ściśle związane z programowaniem stochastycznym i programowaniem dynamicznym, reprezentuje badany problem w postaci równania Bellmana. Celem jest opracowanie polityki określającej optymalne działanie w obliczu niepewności.
- Sterowanie zasobnikiem energii może także być zrealizowane przy użyciu metod heurystycznych, np. w [99] sterowanie pracą sieci zostało zrealizowane przy użyciu NSGA II.

W pracy [103] została przedstawiona propozycja regulatora wykonanego w programie Power Factory, który regulował zadawaną moc czynną i bierną zasobnika energii, gdzie wartości wejściowe były wartościami lokalnymi (zmierzonymi w węźle przyłączenia).

Zarówno dostarczanie mocy czynnej, jak i biernej podlega pewnym ograniczeniom. W przypadku mocy biernej ograniczeniem jest moc pozorna przekształtnika energoelektronicznego przez który zasobnik energii jest podłączony

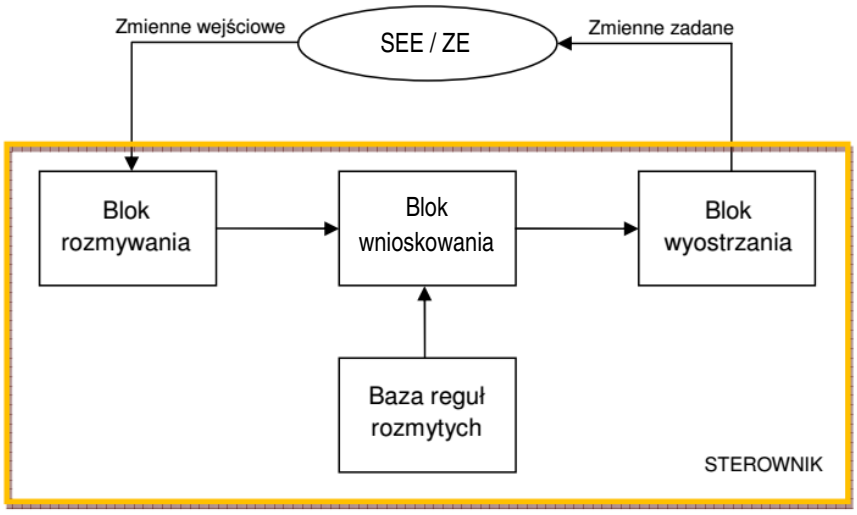
do sieci (rozdział 3.2). W przypadku regulacji mocy czynnej istnieje znacznie więcej ograniczeń. Są one następujące:

- Ograniczenie ze względu na stan naładowania zasobnika energii (*SoC - ang. State of Charge*).
- Ograniczenie ze względu na możliwość dostarczenia maksymalnej mocy czynnej, w tym przypadku decyduje element o mniejszej mocy znamionowej – przekształtnik lub bateria.
- Ograniczenie ze względu na możliwość dostarczenia maksymalnej mocy pozornej.
- Ograniczenie ze względu na osiągnięcie maksymalnej temperatury pracy baterii.
- Ograniczenie ze względu na ilość wykonywanych cykli [104], co przekłada się na dłuższą eksploatację zasobnika energii.

8. 3. Elementy logiki rozmytej - wprowadzenie

W niniejszym rozdziale opisano działanie sterowania rozmytego. Typowy proces sterowania rozmytego danym obiektem składa się z trzech etapów (rys. 8.2), w których biorą udział następujące moduły:

- blok rozmywania,
- baza reguł rozmytych,
- blok wnioskowania,
- blok wyostrzania (rys. 9.2).



Rys. 8.2. Sterownik rozmyty i sterowane nim urządzenie [105]

Każda zmienna wejściowa poddana jest procesowi fuzyfikacji (rozmywania) – której wartość po procesie fuzyfikacji jest określona przez funkcję przynależności μ. Funkcje przynależności liczb rozmytych odpowiadające zmiennym wejściowym i wyjściowym są zazwyczaj funkcjami określonymi parametrycznie (trójkątnymi, trapezoidalnymi, dzwonowymi, itp.). Dobór parametrów tych funkcji odbywa się poprzez proces strojenia. Trafny wybór rozmytego podziału przestrzeni wejściowej i wyjściowej oraz kształtów funkcji przynależności są najważniejszymi decyzjami projektowymi. Zwykle używa się heurystycznej metody prób i błędów dla uzyskania optymalnego podziału oraz subiektywnych decyzji dotyczących kształtów funkcji. Innym sposobem doboru funkcji przynależności jest metoda ekspercka, która wymaga dokładnej znajomości problemu. Poniżej zostaną opisane poszczególne moduły sterowania rozmytego, które zostały przedstawione na rys. 8.2.

Blok rozmywania (*ang. fuzzifier, fuzzification module*) – ma zastosowanie do zastępowania ostrej wartości wejściowej zbiorem rozmytym. Jest to konieczne, ponieważ maszyna wnioskująca działa na zbiorach rozmytych, a nie na ostrych wartościach liczbowych. Przykładowo rozmytą wartością może być określenie "napięcie zbyt wysokie".

Baza reguł (*ang. fuzzy rule base*) – stanowi reprezentację wiedzy eksperta o pożądanej odpowiedzi obiektu dla zaistniałego stanu. Baza ta składa się z rozmytych reguł. Dla potrzeb sterowania wystarczy ograniczyć się do reguł, w których przesłanka jest kombinacją prostych faktów rozmytych, a wniosek składa się z niezależnych stwierdzeń dotyczących wartości różnych zmiennych sterowania.

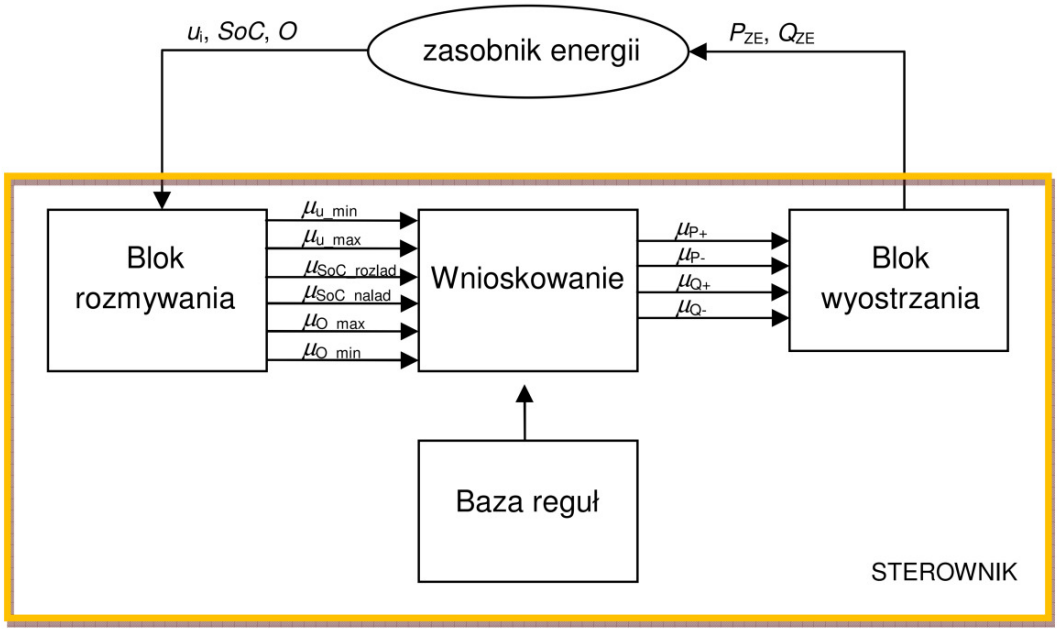
Blok wnioskowania (*ang. inference module*) – głównym modułem operacyjnym jest maszyna wnioskująca. Cała sztuka budowy maszyny wnioskującej polega na trafnym wyborze interpretacji rozmytej implikacji zbiorów rozmytych.

Defuzyfikacja (*ang. deffuzifier, defuzzification module*) – moduł wyostrzania – zastępuje zbiory rozmyte ostrymi wartościami liczbowymi. Defuzyfikacja polega na wyborze maksymalnej wartości szczytowej zbioru. Istnieje wiele metod obliczania ostrej wartości sterowania. Wyróżnia się m. in. metody środka obszaru, metody pierwszego / środkowego / ostatniego maksimum, metody średniej z największej [105].

8. 4. Opis regulatora rozmytego użytego do sterowania zasobnikami energii

8. 4. 1. Wstęp

Do sterowania zasobnikiem energii wykorzystano regulator zrealizowany w oparciu o logikę rozmytą. Danymi wejściowymi dla regulatora są: napięcie w węźle przyłączenia U_i, obciążenie linii zasilającej węzeł O oraz stan naładowania zasobnika energii SoC. Zmienne te ulegają fuzyfikacji zgodnie z charakterystykami opisanymi w kolejnym podrozdziale. Wartości funkcji przynależności określone w procesie rozmywania. Następnie poddane są analizie, która jest przeprowadzona z wykorzystaniem Bazy Reguł w Bloku Wnioskowania. W wyniku wnioskowania określone są rozmyte wartości μ_P i $\mu_{Q,}$ które muszą przejść proces wyostrzania. Dopiero ostre wartości zadane mocy czynnej P_{zad} i mocy biernej Q_{zad} trafiają jako sygnał zadany do zasobnika energii. Działanie regulatora rozmytego jest zobrazowane na rys. 8.3.



Rys. 8.3. Schemat regulatora rozmytego dla zasobnika energii

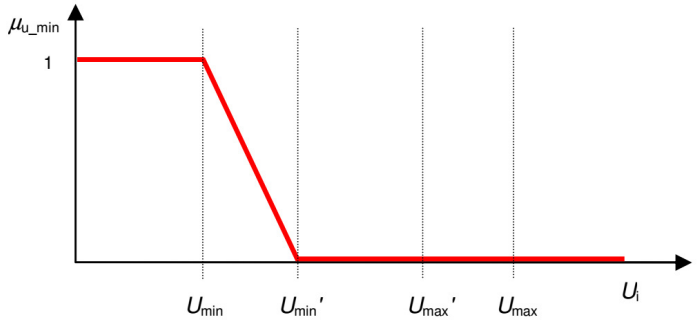
8. 4. 2. Blok rozmywania – opis funkcji przynależności

W bloku rozmywania następuje zamiana wejściowych wartości ostrych na wartości rozmyte przy użyciu funkcji przynależności. Wartości parametrów funkcji przynależności wartości napięcia U_i są zdefiniowane zgodnie z istniejącymi wymaganiami napięciowymi w danej sieci. Wartości parametrów funkcji

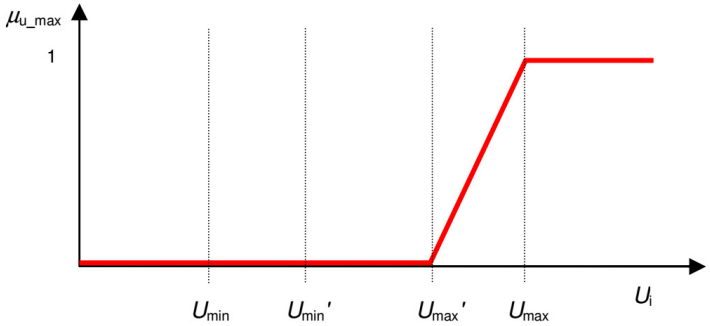
przynależności wartości naładowania zasobnika energii *SoC* oraz obciążenia linii zasilającej *O* są zdefiniowane w procesie optymalizacji, w wyniku strojenia regulatora zasobnika energii.

Funkcje przynależności dla poszczególnych zmiennych wejściowych przyjmują następujące kształty i wartości:

- μ_u - funkcja przynależności dla napięcia U_i [j.w.] w węźle przyłączenia zasobnika energii. Funkcja przynależności dla wartości rozmytych napięcia "zbyt niskiego" została przedstawiona na rys. 8.4, funkcja przynależności dla wartości rozmytych napięcia "zbyt wysokiego" została przedstawiona na rys. 8.5.



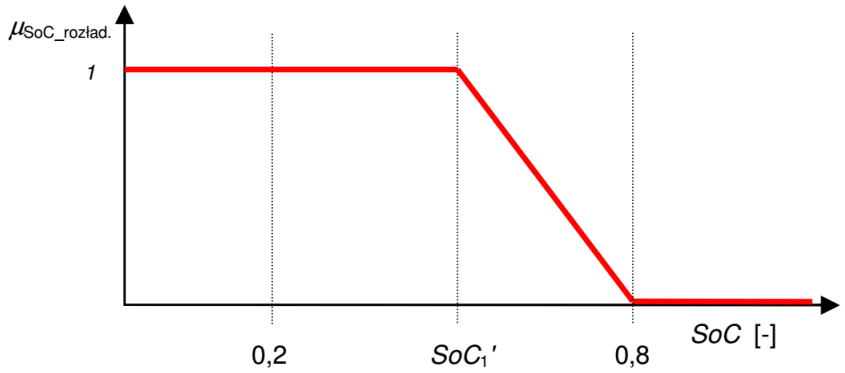
Rys. 8.4. Funkcja przynależności dla napięcia "zbyt niskiego" w węźle *i*



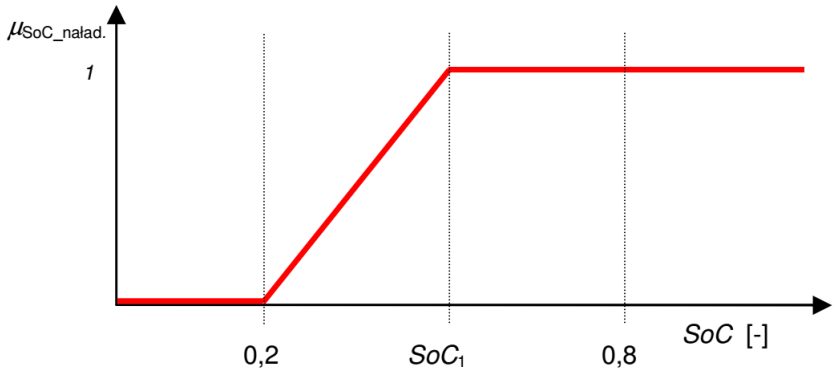
Rys. 8.5. Funkcja przynależności dla napięcia "zbyt wysokiego" w węźle *i*

- μ_{SoC} - funkcja przynależności dla stanu naładowania danego zasobnika energii *SoC* [j.w.] - przyjęte zostało założenie, że zasobnik energii jako bateria elektrochemiczna może pracować w zakresie od 20% do 80% swojej pojemności (SoC_{min} = 0,2, SoC_{max} = 0,8). Funkcja przynależności dla wartości rozmytych stanu naładowania zasobnika określonego jako "rozładowany" została przedstawiona na rys. 8.6, funkcja przynależności dla

stanu naładowania zasobnika określonego "naładowanego" została przedstawiona na rys. 8.7.



Rys. 8.6. Funkcja przynależności dla stanu zasobnika "rozładowany"

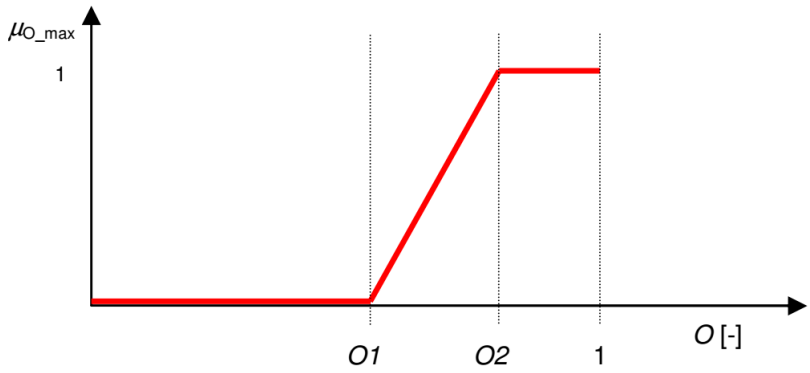


Rys. 8.7. Funkcja przynależności dla stanu zasobnika "naładowany"

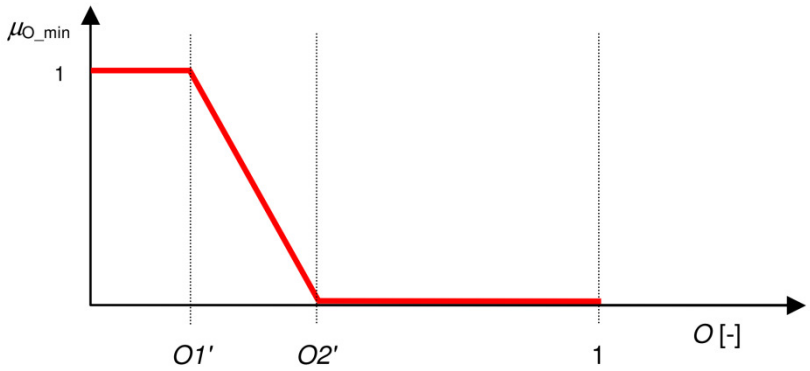
- μ_O - funkcja przynależności dla stanu obciążenia linii *O* [j.w.]. Parametry funkcji przynależności stanu obciążenia linii mogą przyjmować wartości ujemne. Zakres zmienności parametrów O1, O2, O1', O2' wynosił od -1 do 1. Wartość pomiędzy parametrem O2', a O1 wyznacza strefę nieczułości. Wymagane jest zachowanie zależności opisanej wzorem (8.1).

$$O_1' < O_2' < O_1 < O_2 \tag{8.1}$$

Funkcja przynależności dla wartości rozmytych obciążenia linii określonej jako "obciążona" została przedstawiona na rys. 8.8, a funkcja przynależności dla obciążenia linii określonej jako "niedociążona" została przedstawiona na rys. 8.9.

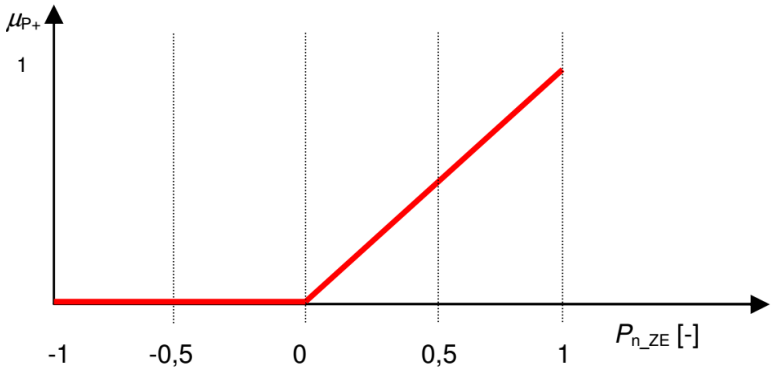


Rys. 8.8. Funkcja przynależności dla stanu linii "obciążona"

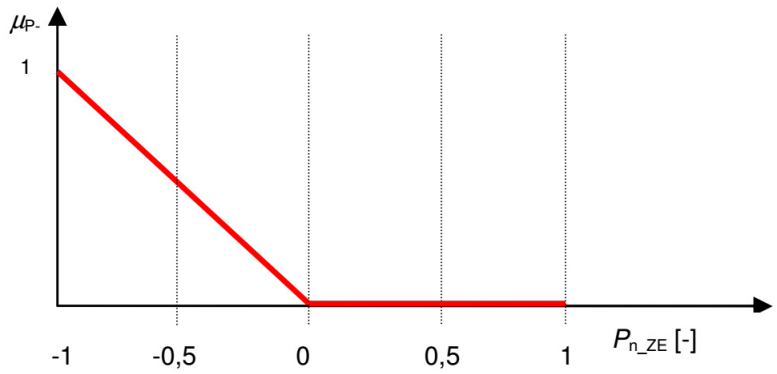


Rys. 8.9. Funkcja przynależności dla stanu linii "niedociążona"

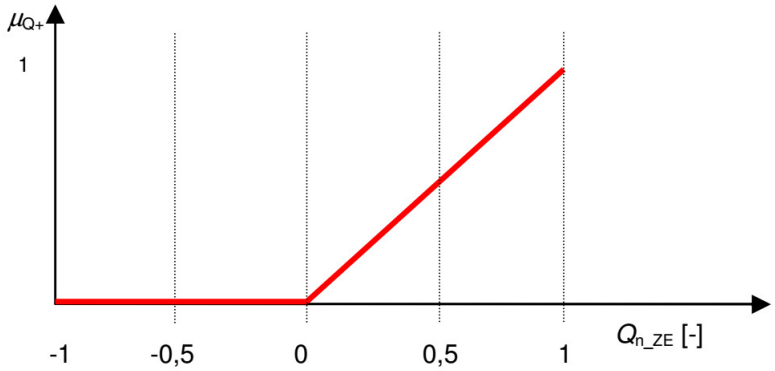
Zmiennymi wyjściowymi regulatora zasobnika energii są: moc czynna i moc bierna. Funkcje przynależności dla tych zmiennych są następujące, opisane na rys. 8.10÷8.13.



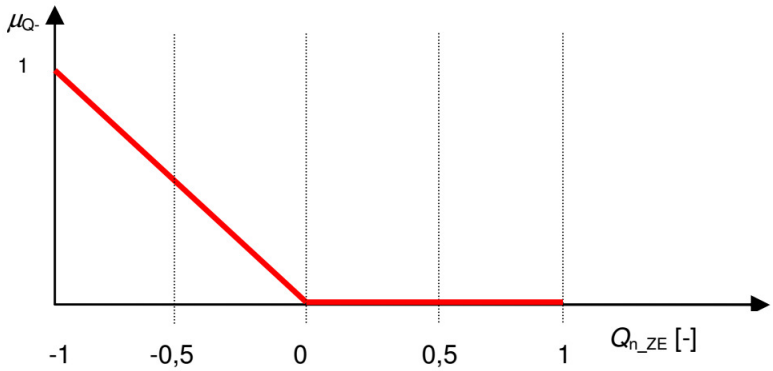
Rys. 8.10. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "dostarczaj moc czynną do sieci"



Rys. 8.11. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc czynną z sieci"



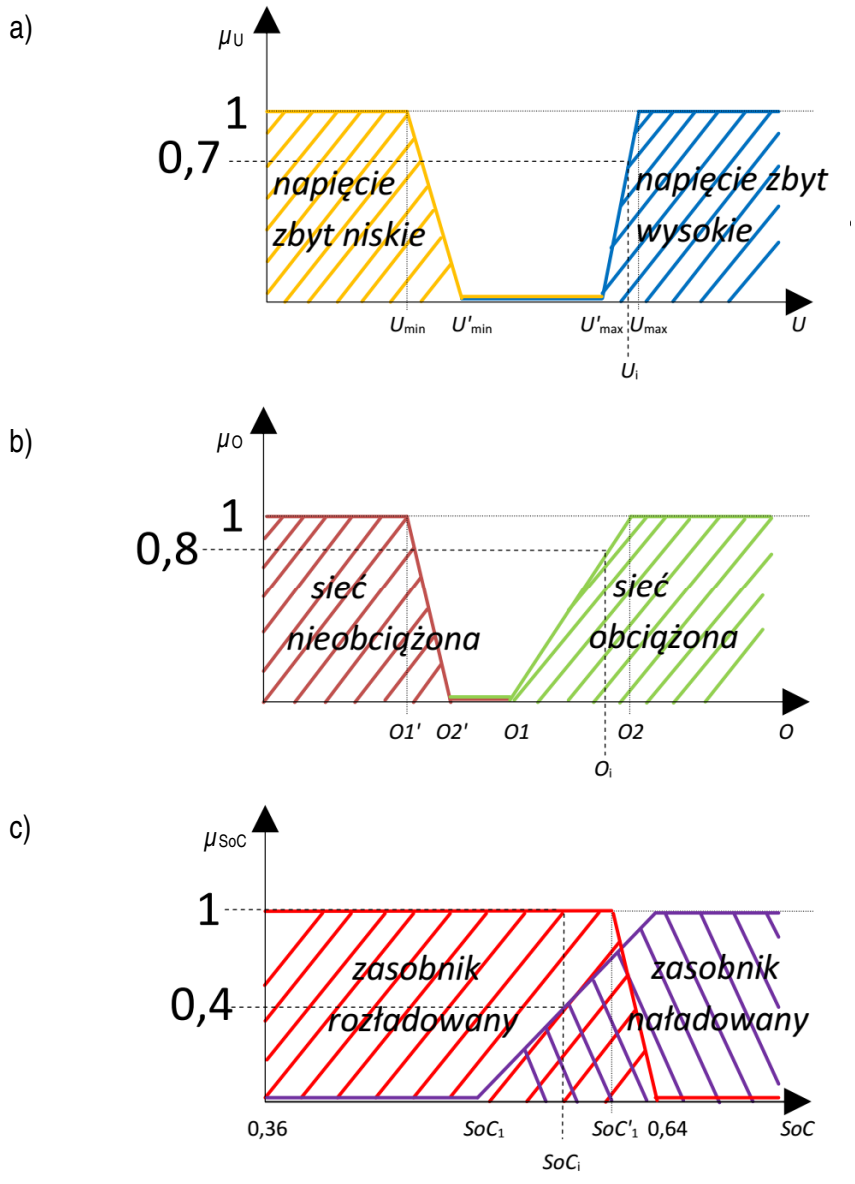
Rys. 8.12. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "dostarczaj moc bierną do sieci"



Rys. 8.13. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc bierną z sieci"

Na rysunku 8.14 przedstawiono przykład rozmywania wartości ostrych napięcia U_i w węźle. Stopień przynależności napięcia U_i do zbioru określonego jako "napięcie zbyt wysokie" osiągnął wartość "0,7", stopień przynależności U_i do zbioru określonego "napięcie zbyt niskie" osiągnął wartość "0". Kolejną wartością ostrą podlegającą procesie fuzyfikacji jest obciążenie sieci (obciążenie linii zasilającej) *O*,

dla której w przedstawionym na rys. 8.14 przykładzie, stopień przynależności do zbioru określonego jako "sieć nieobciążona" osiągnął wartość "0", zaś stopień przynależności do zbioru określonego jako "sieć obciążona" osiągnęła wartość "0,8". Kolejną zmienną wejściową jest stan naładowania zasobnika energii *SoC*, dla stopień przynależności do zbioru określonego jako "zasobnik rozładowany" osiągnął wartość "1", zaś stopień przynależności do zbioru określonego jako "zasobnik naładowany" osiągnął wartość "0,4".



Rys. 8.14. Przykład funkcji przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc bierną z sieci"

8. 4. 3. Blok decyzyjny

Blok decyzyjny składa się z bazy reguł i maszyny wnioskującej. Baza reguł opisuje relacje pomiędzy poszczególnymi zmiennymi wejściowymi i przekłada je na odpowiednie decyzje na wyjściu sterownika. Baza reguł dla regulatora zasobnika energii jest następująca:

1. JEŻELI napięcie jest "zbyt niskie" I zasobnik jest "naładowany" TO "dostarczaj moc czynną do sieci",
2. JEŻELI napięcie jest "zbyt niskie" I zasobnik jest "rozładowany" TO "dostarczaj moc bierną do sieci",
3. JEŻELI napięcie jest "zbyt wysokie" I zasobnik jest "rozładowany" TO "pobieraj moc czynną z sieci",
4. JEŻELI napięcie jest "zbyt wysokie" I zasobnik jest "naładowany" TO "pobieraj moc bierną z sieci",
5. JEŻELI napięcie jest NIE "zbyt wysokie" I zasobnik jest "naładowany" I sieć jest "obciążona" TO "dostarczaj moc czynną do sieci",
6. JEŻELI napięcie jest NIE "zbyt niskie" I zasobnik jest "rozładowany" I sieć jest "niedociążona" TO "pobieraj moc czynną z sieci".

Maszyna wnioskująca działa na zasadzie rozmytej implikacji Mamdaniego dla reguł nr 1÷4, która jest określona dla przykładu reguły nr 1 wzorem (8.2). W rozprawie wybrano implikację Mamdaniego ponieważ, dostarczanie / odbieranie mocy jest zależne w równym stopniu od wartości funkcji przynależności μ_U oraz μ_{SoC}.

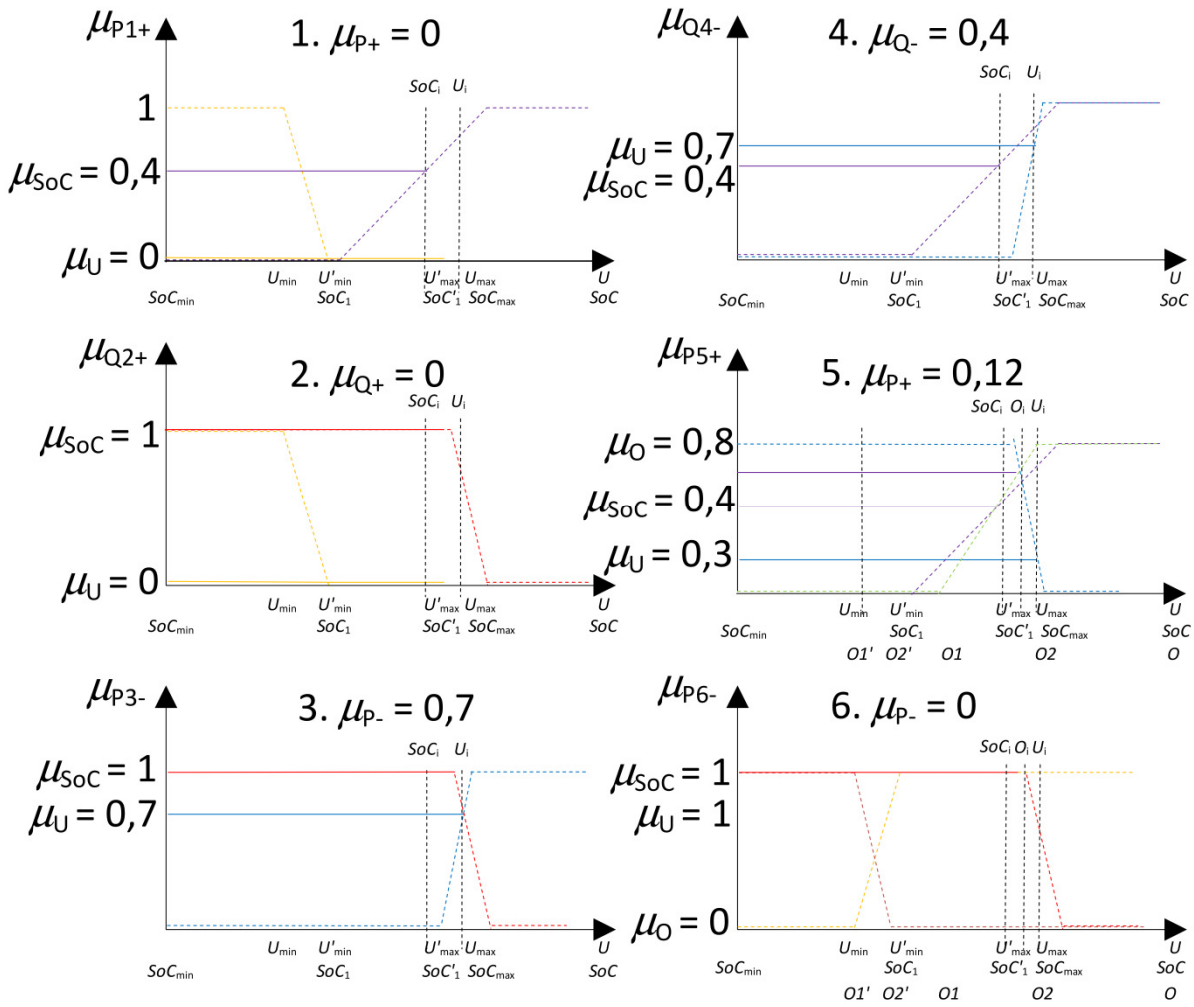
$$\mu_{u_min \rightarrow SoC_nalad}(U_i, SoC) = min(\mu_{u_min}(U_i), \mu_{SoC_nalad}(SoC)) \tag{8.2}$$

Dla reguł nr 5 i 6 użyta jest rozmyta implikacja Larsena opisana wzorem (8.3) dla funkcji przynależności μ_U i μ_{SoC} oraz implikacja Mamdaniego, dla wyniku z implikacji Larsena oraz funkcji przynależności μ_O.

$$\mu_{u_min \rightarrow SoC_nalad}(U_w, SoC) = \mu_{u_min}(U_w) \cdot \mu_{SoC_nalad}(SoC) \tag{8.3}$$

Na rysunku 8.15 została przedstawiona dalsza część omawianego przykładu z rys. 8.14. Zobrazowany został proces wnioskowana, zrealizowany dla wszystkich sześciu reguł. W procesie wnioskowania określono wartości następujących funkcji

przynależności: „dostarczaj moc czynną do sieci” μ_{P+}, „pobieraj moc czynną z sieci” μ_{P-}, „dostarczaj moc bierną do sieci” μ_{Q+} oraz „pobieraj moc bierną z sieci” μ_{Q-}.



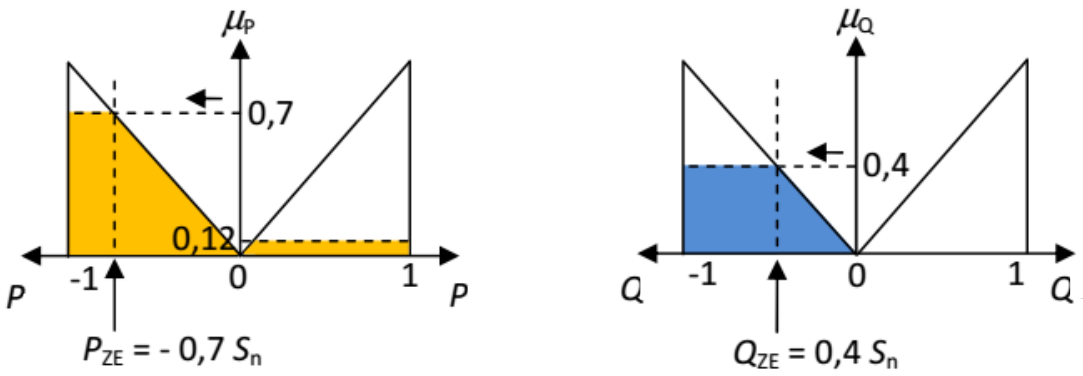
Rys. 8.15. Przykład procesu wnioskowania oraz określania wartości funkcji przynależności μ_P i μ_Q zasobnika energii

Zgodnie z przykładem przedstawionym na rys. 8.15 wartość funkcji przynależności μ_{P+} („dostarczaj moc czynną do sieci”) wynosi 0, ponieważ stopień przynależności wartości napięcia do zbioru „napięcie zbyt niskie” jest równy 0, a dla warunku 1÷4 obowiązuje implikacja Mamdaniego. Analogicznie funkcja przynależności μ_{Q+} („dostarczaj moc bierną do sieci”) także jest równa 0. Funkcja przynależności μ_{P-} („pobieraj moc czynną z sieci”) wynosi 0,7. Stopień przynależności napięcia do zbioru „napięcie zbyt wysokie” wynosi 0,7, a stopień przynależności stanu naładowania zasobnika energii do zbioru „zasobnik rozładowany” wynosi 1. Zgodnie ze wzorem (8.2) wartość funkcji przynależności do zbioru „pobieraj moc czynną z sieci” wynosi 0,7. Analogicznie uzyskano wynik

wartości funkcji przynależności do zbioru „pobieraj moc bierną z sieci", która wynosi 0,4. Z warunku nr 5 i 6, który zakłada ładowanie / rozładowywanie zasobnika energii, kiedy wartość napięcia jest w wymaganym zakresie, a istotny jest aktualny stan naładowania zasobnika energii oraz prognoza obciążenia uzyskano wynik 0,12 przynależności do zbioru „dostarczaj moc czynną do sieci".

8. 4. 4. Blok wyostrzania

W celu wyostrzenia wartości rozmytych (defuzyfikacji) posłużono się metodą pierwszego maksimum, liczonego od osi $P = 0$, $Q = 0$. Ostra wartość P_{ZE} i Q_{ZE} jest wynikiem osiągnięcia maksimum funkcji przynależności μ_P i odpowiednio μ_Q dla najmniejszej bezwzględnej wartości P i Q. Rysunek 8.16 przedstawia ostatni blok rozmytego procesu sterowania – blok wyostrzania, dla omawianego przykładu.



Rys. 8.16. Proces wyostrzania wartości rozmytych

8. 4. 5. Ograniczenia dla układu sterowania zasobnikiem energii

Sterowanie na wyjściu zasobnika energii jest dwuetapowe. W pierwszej kolejności wykonywane jest sterowanie mocy czynnej zasobnika energii, w drugiej kolejności wykonywane jest sterowanie mocą bierną zasobnika energii. Ograniczeniem jest moc pozorna zasobnika energii. Jeżeli suma geometryczna mocy czynnej i biernej zostanie przekroczona, ograniczeniu podlega moc bierna. Spełniona jest zależność (8.4):

$$\text{Jeżeli } \sqrt{(P_{\text{ZE}})^2 + (Q_{\text{ZE}})^2} > S_{\text{n}_{\text{ZE}}} \text{ to } Q_{\text{ZE}} = \sqrt{(S_{\text{n}_{\text{ZE}}})^2 - (P_{\text{ZE}})^2} \tag{8.4}$$

Założono również, że stan naładowania zasobnika energii musi się mieścić w zakresie od 20% do 80% – wzór (8.5).

$$0{,}2 \leq SOC \leq 0{,}8 \tag{8.5}$$

Ograniczenie związane z temperaturą pracy baterii nie wiąże się z tematyką przeprowadzanych badań i zostało pominięte. Dodatkowo założono interwał pomiędzy kolejnymi sterowaniami równy 15 min, z czego wynika, że nie są badane stany szybkozmienne. Ograniczenie związane z liczbą cykli zasobnika energii także nie zostało uwzględnione w analizie.

Opracowany regulator zasobnika energii został opracowany dla sieci symetrycznych 3-fazowych. Rozszerzenie działania regulatora o możliwość sterowania zasobnikiem energii współpracującego z siecią niesymetryczną, a tym samym zwiększenie możliwości regulacji w kontekście redukcji asymetrii obciążenia będzie stanowiło dalszy etap badań naukowych.

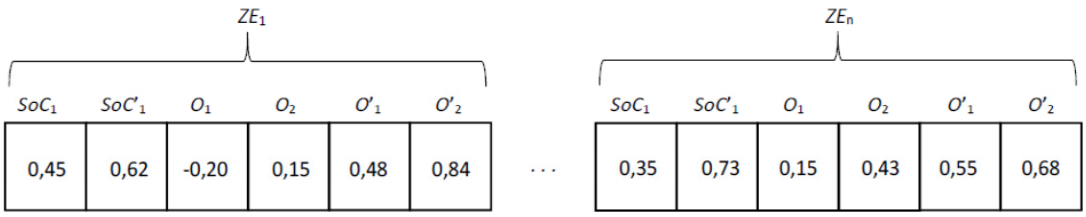
8. 4. 6. Strojenie regulatora zasobnika energii

Strojenie regulatora odbywa się poprzez odpowiedni dobór wartości dla wielkości występujących we wzorach funkcji przynależności (zmiana parametrów liczb rozmytych) lub na zmianie parametrów odniesienia (zbioru liczb rozmytych). W tym przypadku, do określenia odpowiednich parametrów funkcji przynależności, rozważane są następujące przypadki:

- dla funkcji przynależności $\mu_{\text{SoC_ład}}$ i $\mu_{\text{SoC_rozład}}$ dobierane są odpowiednie wartości stałych SoC_1 i SoC_1',
- dla funkcji przynależności $\mu_{\text{O_max}}$ i $\mu_{\text{O_min}}$ dobierane są odpowiednie wartości stałych O_1, O_2, O_1' i O_2',
- dla funkcji przynależności $\mu_{\text{u_min}}$ i $\mu_{\text{u_max}}$ wartości są określone niezależnie, w zależności od wymagań napięciowych stawianych danej sieci.

W celu doboru odpowiednich wartości stałych SoC_1 *i* SoC_1' oraz O_1, O_2, O_1' i O_2' wykorzystano algorytm ewolucyjny. Działanie algorytmu ewolucyjnego, który został wykorzystany do odpowiedniego doboru parametrów regulatorów zasobników energii bazuje na podobnej zasadzie, jak działanie algorytmu genetycznego do doboru konfiguracji zasobników energii w sieci. Różnica polega na tym, że omawiany wcześniej algorytm genetyczny działał na liczbach całkowitych, zaś algorytm

ewolucyjny działa na liczbach rzeczywistych. Strukturę genotypu pojedynczego osobnika przedstawiono na rys. 8.17.



Rys. 8.17. Struktura genotypu pojedynczego osobnika w algorytmie ewolucyjnym

Optymalizacja doboru parametrów regulatorów zasobników energii jest przeprowadzona z wykorzystaniem dobowej zmienności obciążenia (podobnie jak algorytm lokalizacyjny) i zakłada minimalizację odchyłki napięcia we wszystkich węzłach w sieci podczas badanego okresu. Minimalizacja wartość odchyłki napięcia ΔU_i od wartości dopuszczalnych U_{min} i U_{max} stanowi funkcję celu M algorytmu ewolucyjnego. Funkcja celu M jest opisana wzorami (8.6) i (8.7).

$$M = min\left\{\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{i=1}^{N}\Delta U_i\right)\right\} \tag{8.6}$$

$$\Delta U_i = \begin{cases} \Delta U_i = (U_{min} - U_i) & ,gdy\ (U_i < U_{min}) \\ \Delta U_i = (U_i - U_{max}) & ,gdy\ (U_i > U_{max}) \\ \Delta U_i = 0 & ,gdy\ \left((U_i > U_{min}) \wedge\ (U_i < U_{max})\right) \end{cases} \tag{8.7}$$

gdzie:

U_i – wartość napięcia w węźle i,

U_{max} – maksymalne dopuszczalne napięcie w sieci,

U_{min} – minimalne dopuszczalne napięcie w sieci,

ΔU_i – odchyłka napięcia od wartości dopuszczalnej w węźle i,

T – analizowany okres czasu,

M – wartość funkcji celu optymalizacji doboru parametrów regulatora zasobnika energii,

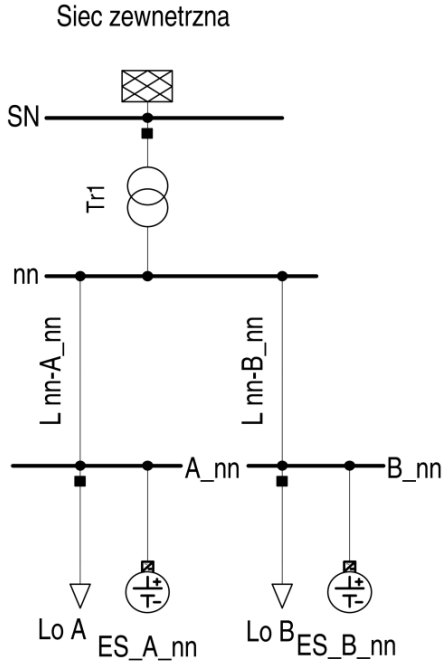
N – liczba węzłów w sieci.

8. 5. Analiza działania regulatora zasobnika energii

8. 5. 1. Struktura modelowanego układu

Analizę działania regulatora rozmytego zasobnika energii przeprowadzono na prostym modelu sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia składającego się z następujących elementów (rys. 8.18):

- dwóch węzłów odbiorczych, w których znajdują się zasobniki energii,
- linii niskiego napięcia: L nn-A_nn - YAKY 4x150 mm^2 o długości 1 km oraz L nn-A_nn - YAKY 4x120 mm^2 o długości 1 km.



Rys. 8.18. Schemat analizowanej sieci nn

W celu przeprowadzenia analizy sterowania zasobnikiem energii zamodelowana została quasi-dynamiczna zmienność mocy z interwałem czasowym równym 15 min, dla okresu analizy wynoszącego 1 dobę. W węźle SN napięcie wynosiło U_n=1,0 przez cały okres analizy. Wartość napięcia na szynach za transformatorem SN/nn tj. po stronie nn, mieściła się z w zakresie (0,99 ÷1,0) U_n. W węźle A_nn występowały zakłócenia napięciowe spowodowane dużym poborem mocy (napięcie poniżej dopuszczalnej granicy). W węźle B_nn pojawiły się problemy z wartością napięcia, które były związane z generacją mocy na końcu obwodu (napięcie osiągało wartości powyżej dopuszczalnej granicy w węźle B_nn). Regulacja napięcia w całej sieci ze względu na występujący w tym samym czasie lokalny wzrost

napięcia na końcu jednego obwodu nn oraz lokalny spadek napięcia na końcu innego obwodu poniżej dopuszczalnej wartości, uniemożliwiał regulację globalną w stacji SN/nn. Przykładem regulacji globalnej jest zmiana zaczepu na transformatorze w stacji zasilającej sieć. Dodatkowo regulacja związana ze zmianą numeru zaczepu transformatora SN/nn jest przeprowadzana w stanie beznapięciowym i z przyczyn technicznych nie mogła zostać wykorzystana w omawianym procesie regulacji sieci. W tym przypadku należało wykorzystać regulację lokalną, którą można zrealizować przy pomocy zasobników energii. Linie zasilające węzły A_nn i B_nn nie były przeciążone, gdyż maksymalne obciążenie linii wynosiło niecałe 41%. W tym przypadku znaczenie miała długość linii (która wynosiła 1 km). Linia nn o długości około 1 km jest linią długą z punktu widzenia eksploatacji sieci nn, przez co występował widoczny spadek / wzrost napięcia na końcach obwodów.

Celem symulacji było jedynie sprawdzenie poprawności działania regulatora zasobnika energii, a nie dobór mocy i pojemności baterii.

Rozważano pracę następujących zasobników energii:

- w węźle A_nn, zasobnik ES_A_nn o mocy 9 kW oraz pojemności 14 kWh,
- w węźle B_nn, zasobnik ES_B_nn o mocy 9 kW oraz pojemności 40 kWh.

W celu wykonania analizy przyjęto następujące założenia:

- Dla funkcji przynależności μ_{u_min} przyjęto następujące wartości stałych: $U_{min} = 0{,}9$, $U'_{min} = 0{,}92$,
- Dla funkcji przynależności μ_{u_max} przyjęto następujące wartości stałych: $U_{max} = 1{,}1$, $U'_{max} = 1{,}08$,
- Wartości stałych SoC_1, SoC_1', O_1, O_2, O_1' i O_2' zostały określone przez algorytm ewolucyjny wykorzystany do doboru parametrów regulatora. W celu weryfikacji poprawności działania regulatora dla danej sieci zawężono wartość dopuszczalnej odchyłki napięcia, która jest równa $\Delta U_i = 8\%$.
- Sprawność cyklu ładowania / rozładowania zasobnika energii wynosi $\eta_{ZE} = 85\%$.
- Pomiar napięcia jako wartości wejściowej do regulatora zasobnika energii był realizowany w węźle przyłączenia zasobnika energii.

- Pomiar obciążenia jako wartości wejściowej do regulatora zasobnika energii był realizowany na podstawie pomiaru obciążenia linii zasilającej węzeł, w którym był przyłączony zasobnik energii.

W wyniku działania algorytmu ewolucyjnego dobrano parametry dla regulatora każdego z zasobników energii, które zostały przedstawione w tab. 8.1.

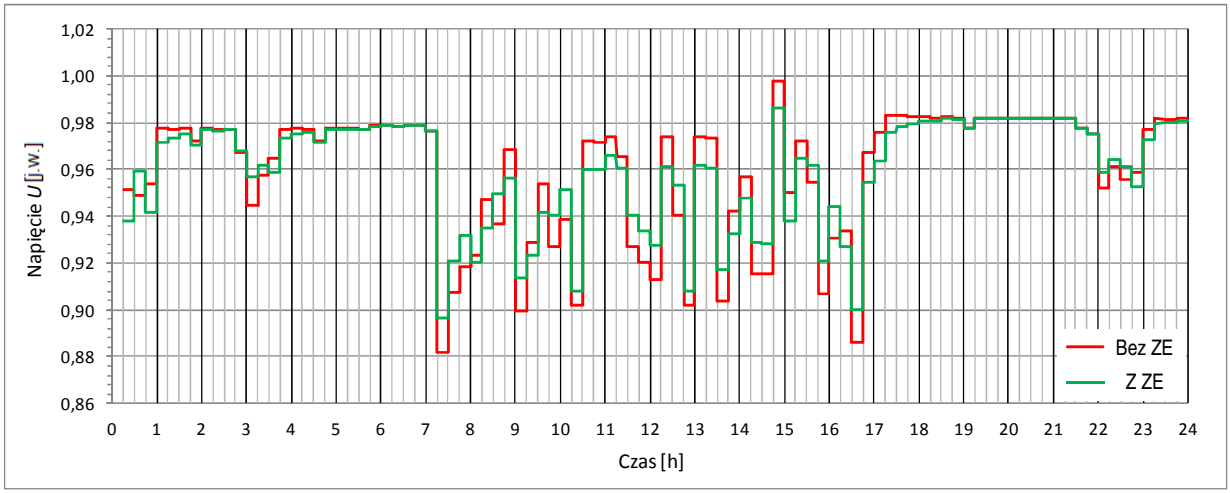
Tabela 8.1. Dobrane parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii

Nazwa zasobnika energii	ES_A_nn	ES_B_nn
SoC_1	0,30	0,35
SoC_1'	0,37	0,57
O_1	0,73	-0,85
O_2	0,74	-0,30
O_1'	0,75	-0,02
O_2'	1,00	0

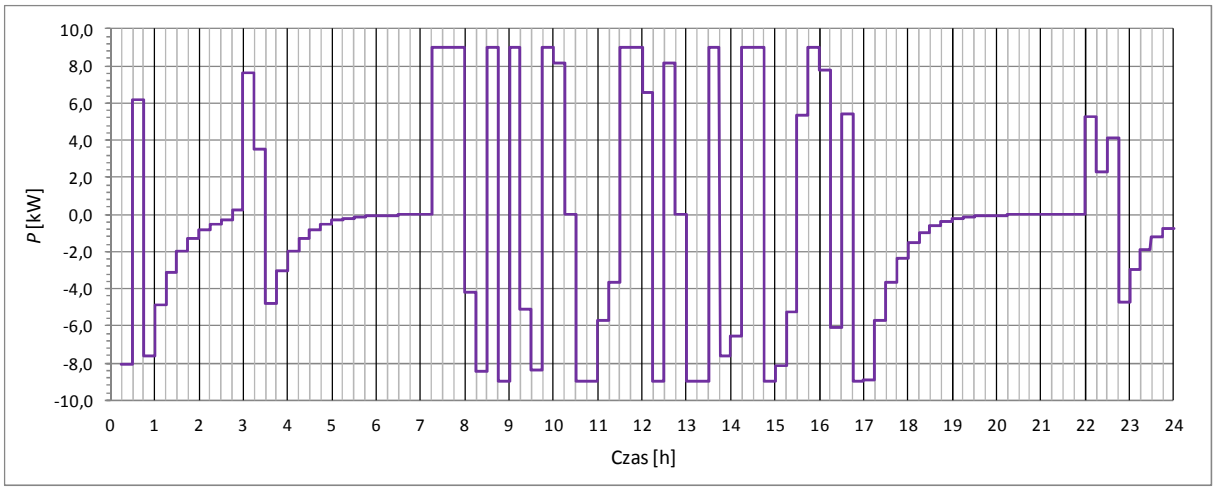
8. 5. 2. Wyniki przeprowadzonej analizy

Na rys. 8.19 ÷ 8.26 przedstawiono wykresy obrazujące dobowe przebiegi następujących zmiennych:

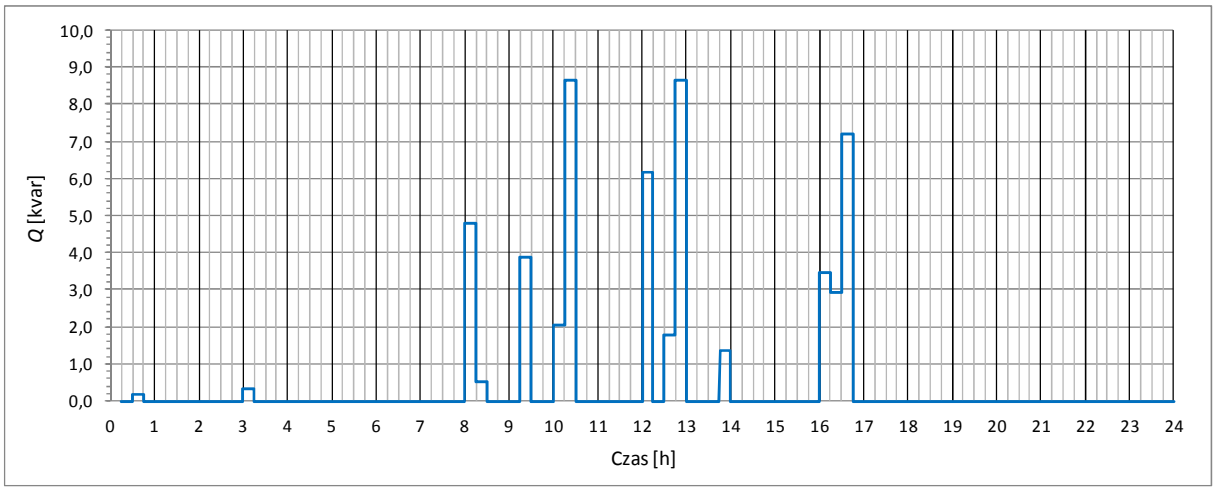
- napięcia U_{nn_A} i U_{nn_B} w węzłach odbiorczych A_nn i B_nn dla przypadków, gdy zasobniki energii współpracują z siecią (na rys. "Z ZE") oraz gdy nie są do sieci przyłączone (na rys. "BEZ ZE"),
- moc czynna i bierna zasobnika energii ES_A_nn oraz ES_B_nn,
- stan naładowania zasobnika energii ES_A_nn oraz ES_B_nn.



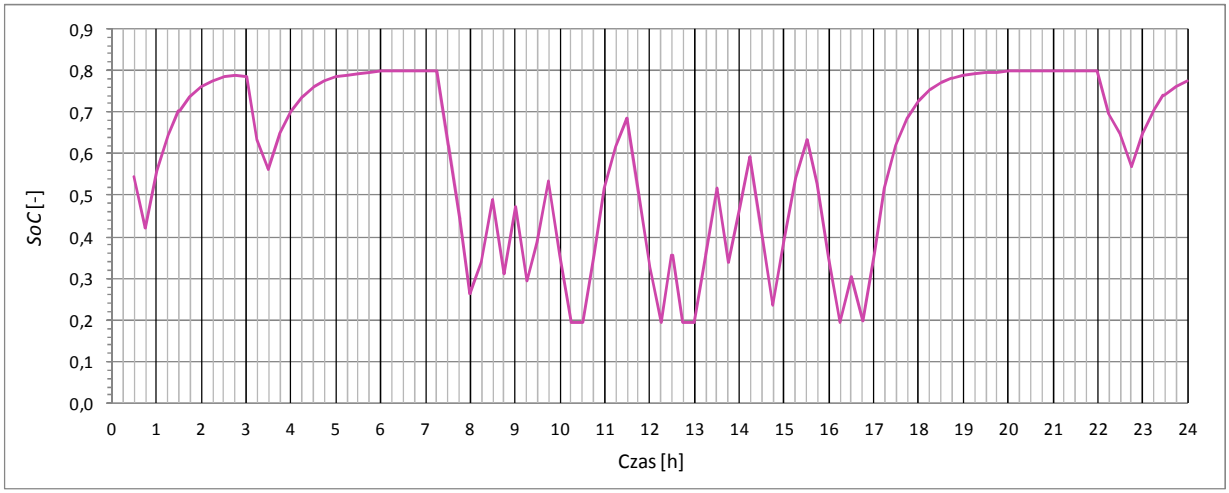
Rys. 8.19. Zmienność napięcia w węźle A_nn



Rys. 8.20. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_A_nn

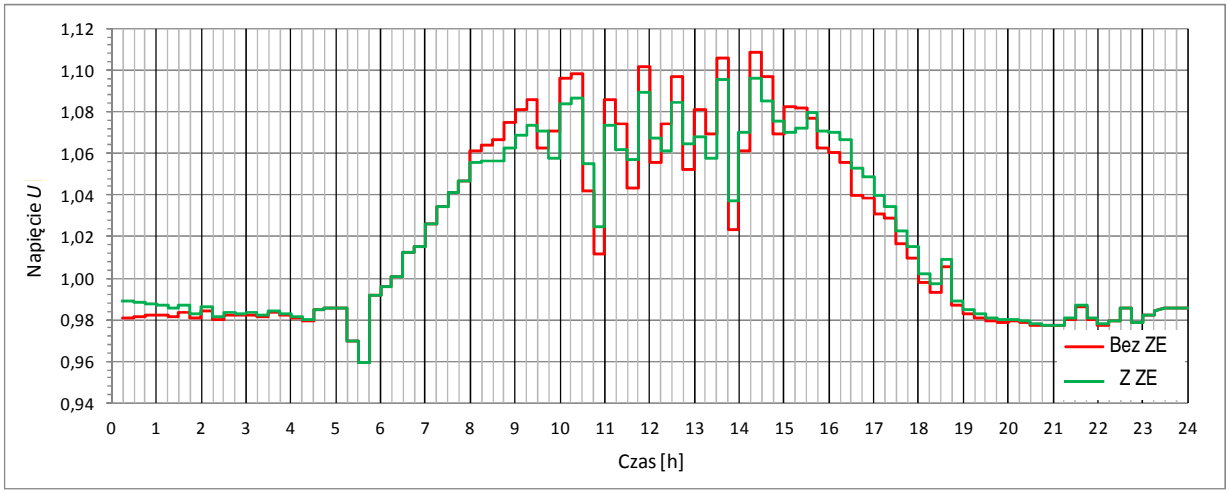


Rys. 8.21. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_A_nn

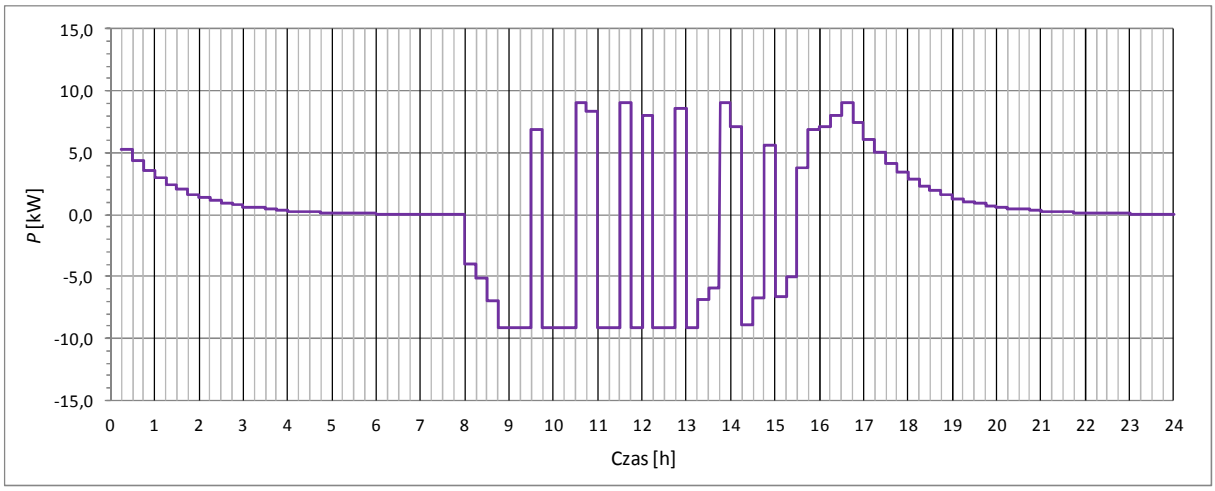


Rys. 8.22. Stan naładowania zasobnika ES_A_nn

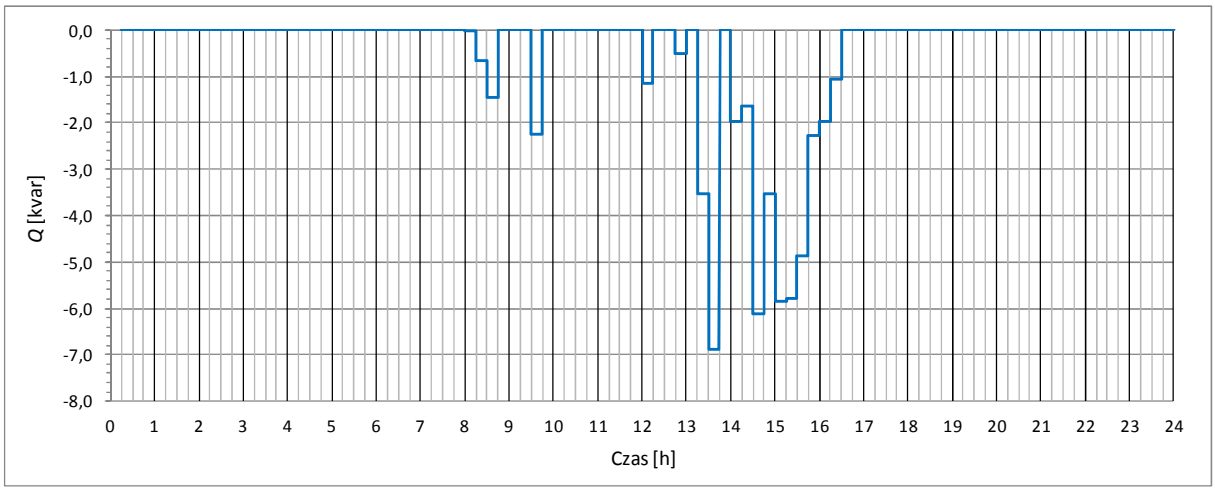
Wyniki przedstawione na rys. 8.19 ÷ 8.22 przedstawiają pracę sieci elektroenergetycznej oraz zasobnika energii przyłączonego do węzła A_nn. W wyniku przepływu prądu związanego z pobieraną mocą przez odbiór Lo A nastąpił spadek napięcia na elementach przesyłowych sieci (linii L_nn-A_nn). W związku z tym, wartość napięcia w węźle A_nn znajdywała się poza dopuszczalnym założonym zakresem ±8% U_n. Spadki napięcia były związane z długością linii nn (1 km). W celu redukcji spadków napięcia wykorzystano zasobnik energii. Ze względu na małą moc zastosowanego zasobnika energii nie jest możliwe całkowite zredukowanie odchyłki napięciowej w węźle A_nn. Najbardziej widoczne jest to o godzinie 7:15-7:30 (rys. 8.19), gdzie zasobnik mimo wprowadzania maksymalnej mocy czynnej, w tym momencie nie jest w stanie zapewnić wymaganego poziomu napięcia (rys. 8.20). Warto zauważyć, że pojemność zastosowanego zasobnika energii wynosi 14 kWh, z czego zakres jego pracy według wcześniejszych założeń musi się mieścić w granicach 20% ÷ 80%. Wobec tego udostępniona pojemność zasobnika wynosi 8,4 kWh. W celu optymalnego wykorzystania mocy i pojemności zasobnika energii, jest on ładowany gdy tylko wartość napięcia jest na odpowiednim poziomie. Jest to związane z 5 i 6 regułą bloku reguł rozmytych regulatora. Dodatkowo, dla przypadku kiedy stan naładowania zasobnika energii *SoC* jest niewielki, regulator zasobnika energii dostarcza moc bierną w celu podwyższenia napięcia. Jest to stan pożądany. Z przedstawionych powyżej przebiegów zmienności napięcia w węźle i stanu naładowania zasobnika można stwierdzić, że regulator zasobnika energii optymalnie dostarcza moc czynną i bierną do sieci.



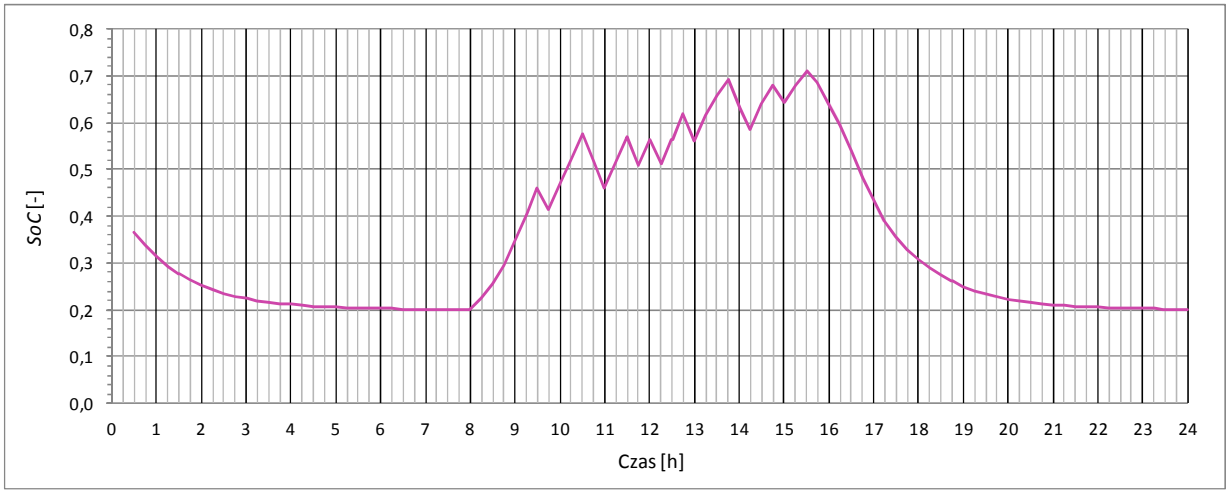
Rys. 8.23. Zmienność napięcia w węźle B_nn – w którym występuje generacja mocy



Rys. 8.24. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_B_nn



Rys. 8.25. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_A_nn



Rys. 8.26. Stan naładowania zasobnika ES_A_nn

Na rys. 8.23÷8.26 przeanalizowano zastosowanie zasobnika energii do regulacji napięcia na końcu obwodu nn w węźle B_nn, w którym występuje generacja mocy przez OZE. Ze względu na dużą impedancję od stacji zasilającej do źródła wytwórczego, również związaną z długością obwodu nn (1 km) występuje lokalny wzrost napięcia w węźle B_nn, którego wartość przekracza górną dopuszczalną granicę. Aby obniżyć wartość napięcia w węźle B_nn, zasobnik energii w trakcie trwania szczytu generacji pobiera moc czynną i bierną. Przy poziomie generacji nie powodującej "wyjścia" wartości napięcia poza górny dopuszczalny zakres, następuje rozładowanie zasobnika energii w celu zwiększenia udostępnianej pojemności na czas szczytowej generacji. Działanie zasobnika energii jest zatem zoptymalizowane pod względem jego mocy i pojemności.

Dostarczanie mocy czynnej przez zasobnik energii w sytuacji, kiedy napięcie w węźle pomiaru wykracza poza dopuszczalny dolny zakres oraz pobieranie mocy czynnej, gdy napięcie w danym węźle osiąga górną dopuszczalną granicę, potwierdza poprawność działania regulatora. Istotne jest także, że w przypadku wykroczenia wartości napięcia poza górny / dolny dopuszczalny zakres oraz przy niekorzystnym w danej sytuacji *SoC* zasobnika, zasobnik energii pobiera / oddaje moc bierną. Dodatkowo stan naładowania zasobnia energii jest monitorowany w kontekście przewidywanego przyszłego obciążenia sieci. Powyższe potwierdza poprawność działania algorytmu.

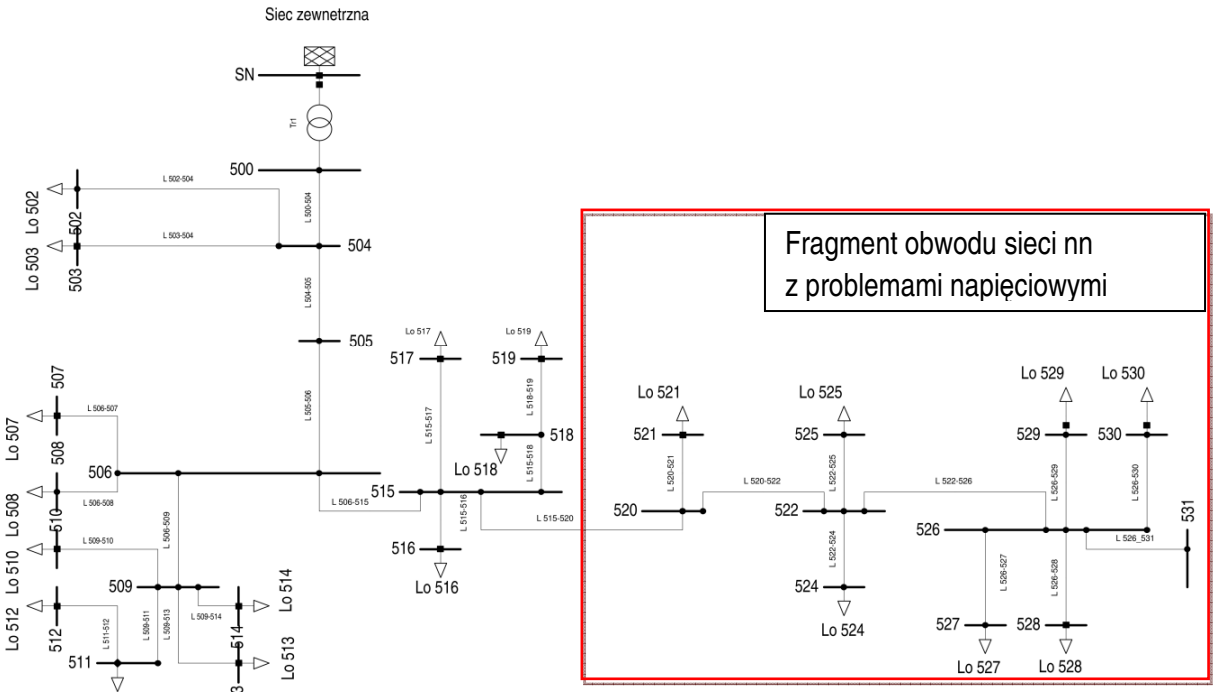
9. ANALIZA PRACY UKŁADU REGULACJI PRZEPROWADZONA NA PRZYKŁADOWYM MODELU SIECI DYSTRYBUCYJNEJ

9. 1. Opis analizowanej sieci nn

Analiza, której wyniki przedstawione są w niniejszym rozdziale podsumowuje wcześniejsze rozważania. Wykorzystano zarówno algorytm lokalizacyjny zasobników energii w sieci jak i zastosowano opracowany regulator zasobnika energii, którego parametry są dobierane przy użyciu algorytmu ewolucyjnego. Do analizy wybrano przykładowy, rzeczywisty fragment sieci nn składający się z 19 węzłów. W sieci zamodelowano generację mocy węzłów z przedziału (3 ÷ 40) kW. Źródła znajdują się na końcu obwodu u 6 odbiorców. Profile obciążenia (A i B) wszystkich odbiorów w analizowanej sieci nn znajdują się w Załączniku 1. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem quasi-dynamicznej zmienności obciążenia. Sieć jest siecią wiejską, gdzie założono, że odległości pomiędzy kolejnymi odbiorcami mogą wynosić nawet do 400 m (wszystkie parametry elementów przesyłowych sieci zostały zamieszczone w Załączniku 1).

W związku z powyższym do analizy przyjęto, sieć trójfazową obciążoną symetrycznie - odchyłka pomiędzy napięciami poszczególnych faz nie przekracza wartości 2%.

Schemat analizowanego obwodu sieci nn jest przedstawiony na rys. 9.1.



Rys. 9.1. Schemat analizowanej sieci nn

W analizie został zbadany wpływ generacji mocy przez OZE na poziomy napięć w poszczególnych węzłach sieci nn oraz na obciążenie elementów przesyłowych sieci.

W celu stabilizacji poziomu napięcia w sieci zaproponowano zastosowanie dostępnych aktualnie na rynku zasobników energii (tab. 7.1).

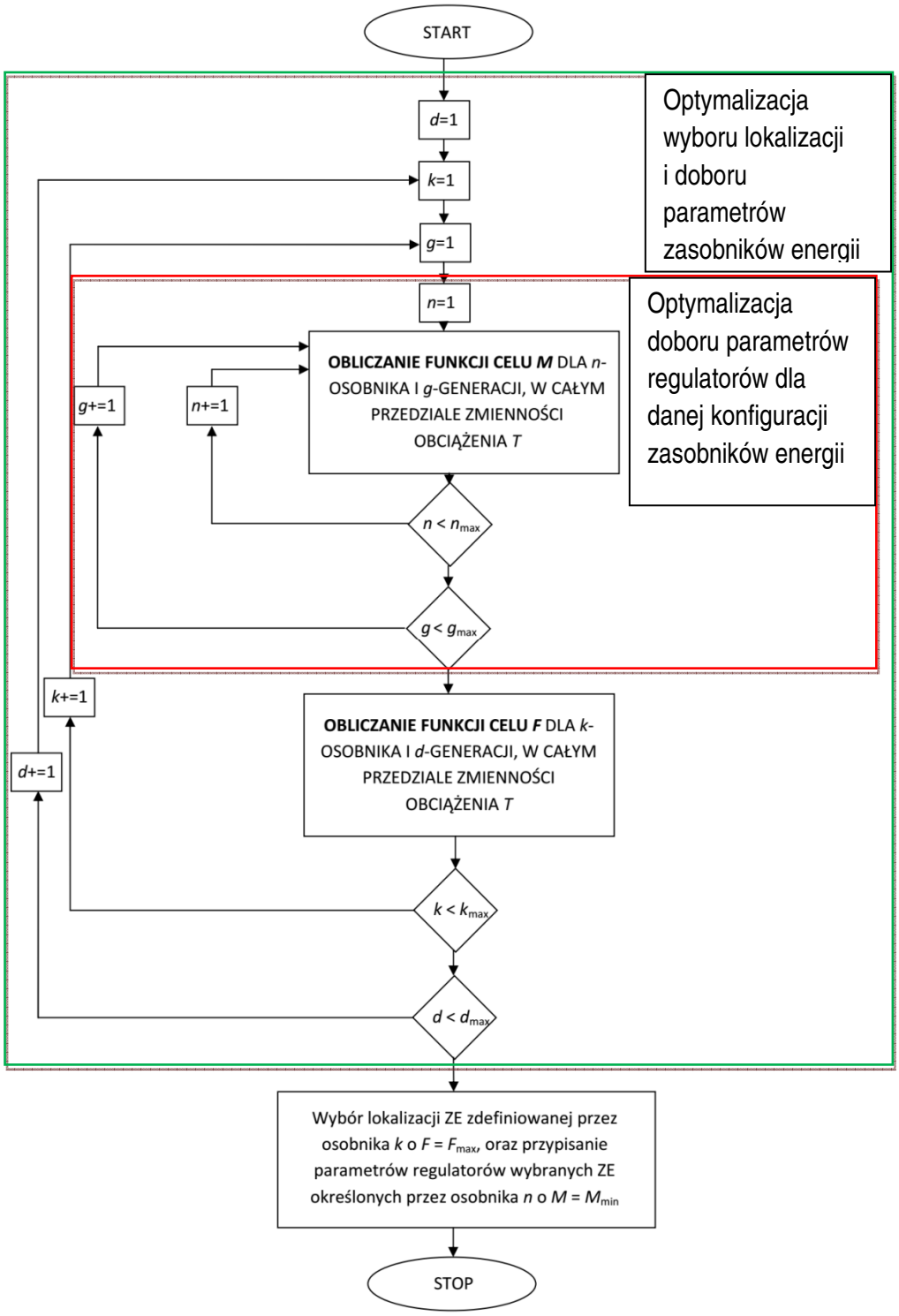
Przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu lokalizacyjnego, który w analizie uwzględniał wszystkie składowe funkcji celu F opisanej wzorem (7.3), określono korzystną konfigurację zasobników energii w sieci nn. Instalację zasobników energii rozważono w każdym węźle sieci.

Pierwsza składowa funkcji celu algorytmu wyboru lokalizacji i doboru parametrów opierała się o zminimalizowanie kosztów związanych z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia w sieci. Założono następujące wymagane wartości napięć, uwzględnionych we wzorach (6.6) i (6.7). Wartości U_{minA} oraz U_{minB} zostały określone zgodnie z wymaganiami określonymi w [83] i przyjmują one następujące wartości: $U_{minA} = 0{,}90$, $U_{minB} = 0{,}80$. Wartość $U_{minB} = 0{,}80$ określa granicę przy której jest jeszcze możliwość wykorzystania energii elektrycznej. Zgodnie z [83] górne wartości U_{maxA} oraz U_{maxB} powinny wynosić odpowiednio: $U_{minA} = 1{,}10$, $U_{minB} = 1{,}20$. Jednakże ze względu na występowanie źródeł energii elektrycznej wartości U_{maxA} oraz U_{maxB} zostały założone w symulacji na poziomie niższym niż wymagane jest to w [83] i wynoszą one odpowiednio: $U_{maxA} = 1{,}08$, $U_{maxB} = 1{,}10$. Celem ustawienia takich wartości jest zapewnianie prosumentom wprowadzenie mocy do sieci przez źródła odnawialne. W przypadku osiągnięcia wartości w węźle równej $1{,}10U_n$ następuje samoczynne odłączenie się instalacji fotowoltaicznej od sieci elektroenergetycznej i uniemożliwienie dostarczenia dalszej mocy. Z punktu widzenia prosumenta napięcie w sieci, które jest równe $1{,}10U_n$ ma tą samą użyteczność jak $1{,}20U_n$.

Kolejnymi składowymi funkcji celu są: minimalizacja kosztów związanych ze stratami energii w sieci nn, redukcja kosztów związanych w przeciążeniem elementów przesyłowych oraz redukcję kosztów związanych z instalacją zasobników energii w sieci elektroenergetycznej (dane dotyczące kosztów zasobników energii przedstawione są w tab. 7.1). Koszt energii elektrycznej w analizie wynosi $C_t = 200$ PLN/MWh, współczynnik $b_t = 10$ PLN/h. Założono, że czas eksploatacji zasobników energii t_p wynosi 10 lat.

Dla każdej analizowanej konfiguracji lokalizacji zasobników energii w badanej sieci nn dobierano inne wartości parametrów regulatorów zasobników energii. Dobór parametrów regulatorów, (na przykładzie analizowanym w rozdziale dziewiątym), został zrealizowany dzięki wykorzystaniu algorytmu ewolucyjnego. Funkcja celu *M* algorytmu ewolucyjnego opisana wzorami (8.6) i (8.7) uwzględniała wartości napięcia we wszystkich węzłach w sieci.

Schemat blokowy algorytmu związany z doborem lokalizacji i parametrów fizycznych zasobnika energii oraz parametrów regulatorów dla poszczególnych zasobników energii przedstawiono na rys. 9.2. Algorytm przedstawiony na rys. 9.2 przedstawia proces optymalizacji wyboru lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii w sieci elektroenergetycznej przy uwzględnieniu doboru optymalnych parametrów regulatorów dla każdej konfiguracji zasobników energii. Optymalizacja doboru optymalnych parametrów regulatorów stanowi część optymalizacji wyboru lokalizacji zasobników energii i doboru ich parametrów. Wynikiem optymalizacji jest wybór konfiguracji zasobników energii w sieci dla której wartość funkcji celu *F* osiągnie wartość najwyższą F_{max} Dla tej konfiguracji zasobników energii w sieci przypisane są wartości parametrów regulatorów zasobników energii określone dla funkcji celu *M*, która osiągnęła wartość minimalną M_{min}.



Rys. 9.2. Schemat blokowy doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii oraz parametrów ich regulatorów, gdzie n_{max} – ilość osobników populacji dla algorytmu ewolucyjnego wykorzystanego do doboru parametrów regulatorów zasobników energii, g_{max} – liczba generacji dla algorytmu ewolucyjnego wykorzystanego do doboru parametrów regulatorów zasobników energii, k_{max} – ilość osobników populacji dla algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci, d_{max} – liczba generacji dla algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci.

9. 2. Wyniki symulacji

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki symulacji dla dwóch różnych profilów obciążenia: A i B. Przedstawione zostały dobowe wykresy poziomów napięcia dla określonych węzłów (głównie dla tych węzłów, w których zaobserwowano problemy napięciowe). Ponadto przedstawiono zmienność mocy czynnej i biernej oraz aktualnego stanu naładowania zasobników energii. Wszystkie wyniki dotyczące przebiegów: napięć, mocy odbiorów, *SoC* zasobników energii oraz mocy czynnej i biernej zasobników energii, dla obu profilów obciążenia, znajdują się w Załączniku 1.

Na wykresach obrazujących wartości napięć w węzłach oraz obciążenie elementów zawarte są przebiegi dla dwóch sytuacji, gdy nie ma w sieci zasobników energii oraz dla sytuacji, gdy w sieci są zainstalowane zasobniki energii (po odpowiednim doborze lokalizacji, parametrów oraz parametrów ich regulatorów).

Analiza zawiera wyniki dla dwóch różnych profilów obciążenia sieci A i B:

a) Wyniki doboru lokalizacji oraz parametrów regulatorów zasobników energii dla profilu A, przedstawiono w tab. 9.1, w tab. 9.2 oraz na rys. 9.3÷9.27.
b) Wyniki doboru lokalizacji oraz parametrów regulatorów zasobników energii dla profilu B, przedstawiono w tab. 9.3, w tab. 9.4 oraz na rys. 9.28÷9.57.

W tabeli 9.1 przedstawiono wynik wyboru lokalizacji oraz parametrów technicznych zasobniki energii dla analizowanej sieci (profil obciążenia: A).

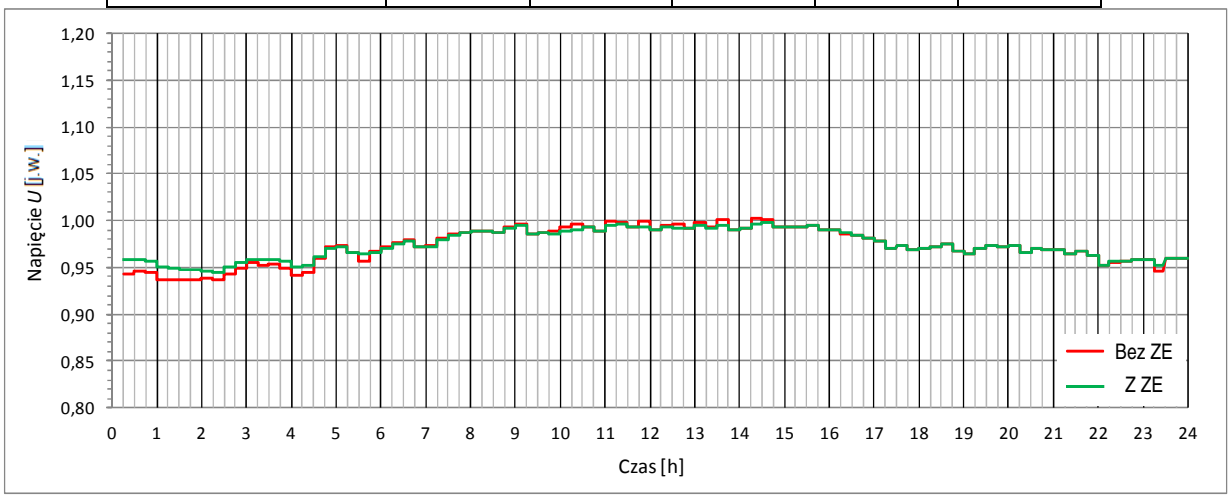
Tabela 9.1. Wynik doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii dla analizowanej sieci nn (profil obciążenia: A)

Nr węzła	522	526	528	529	530
Moc [kW]	4,8	4,8	8,2	6,4	6,4
Pojemność [kWh]	9,0	9,0	13,5	12,0	12,0

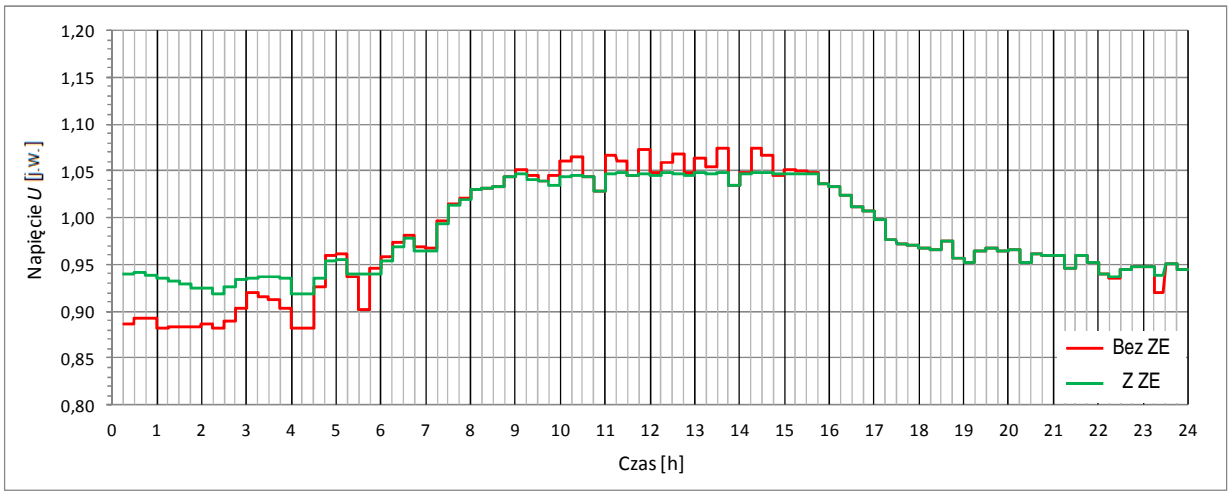
Parametry regulatorów poszczególnych zasobników energii będące wynikiem optymalizacji przedstawiono w tab. 9.2 dla profilu obciążenia A.

Tabela 9.2. Parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii (profil obciążenia: A)

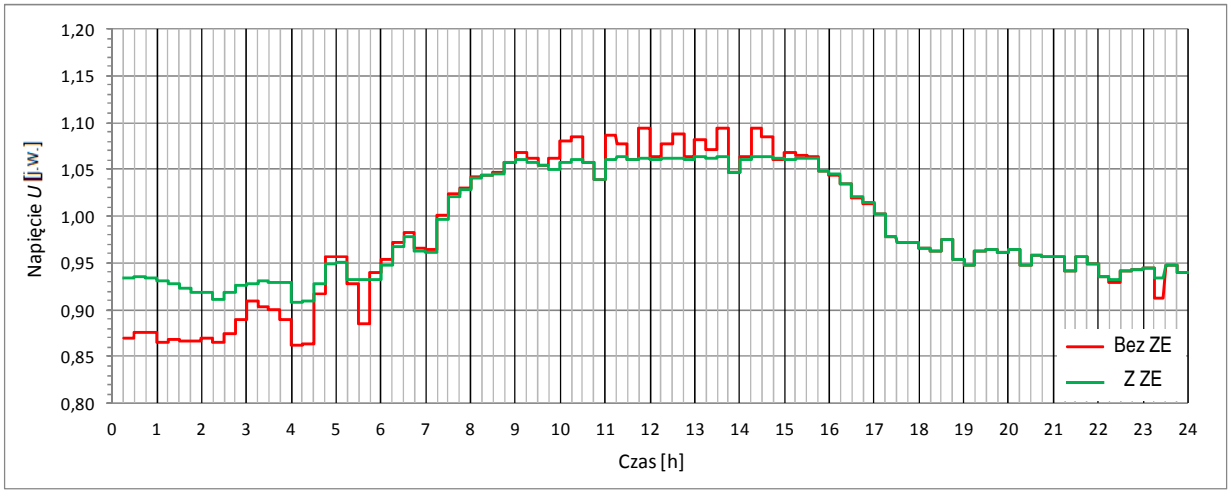
Nazwa zasobnika energii	ES_521	ES_526	ES_528	ES_529	ES_530
SoC_1	0,641	0,685	0,614	0,577	0,522
SoC_1'	0,683	0,700	0,663	0,682	0,651
O_1	0,716	-0,853	-0,308	-0,685	-0,392
O_2	0,856	-0,808	-0,299	-0,169	0,105
O_1'	0,899	0,452	0,667	0,054	0,441
O_2'	0,890	0,474	0,745	0,406	0,560



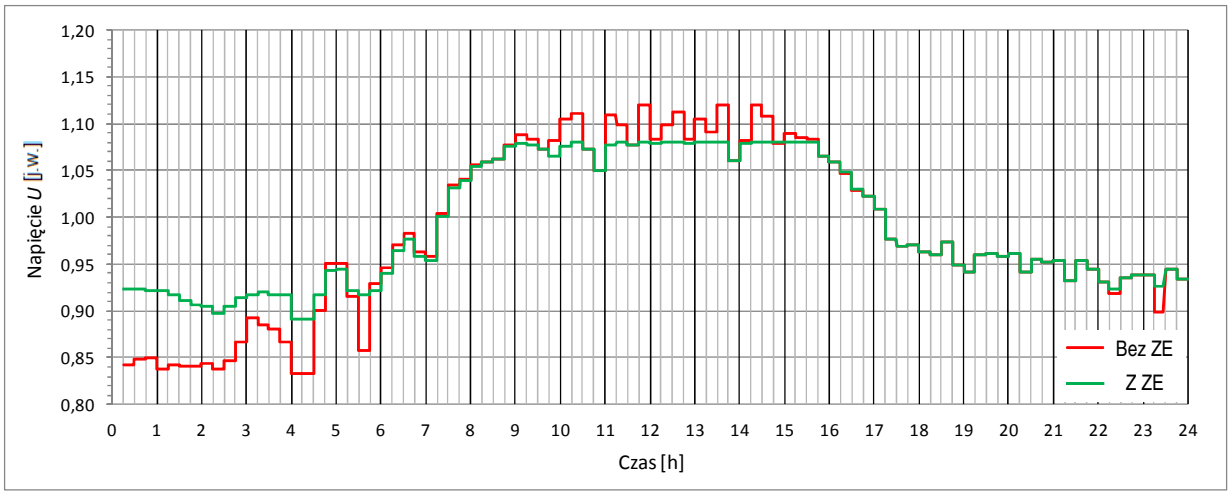
Rys. 9.3. Zmienność napięcia w węźle 515 (profil A)



Rys. 9.4. Zmienność napięcia w węźle 520 (profil A)



Rys. 9.5. Zmienność napięcia w węźle 522 (profil A)

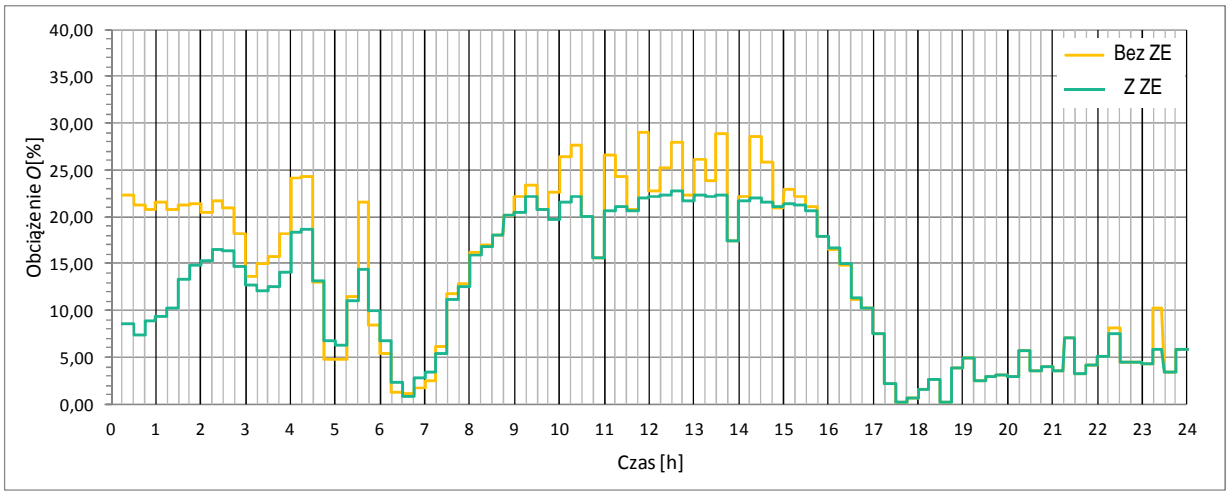


Rys. 9.6. Zmienność napięcia w węźle 526 (profil A)

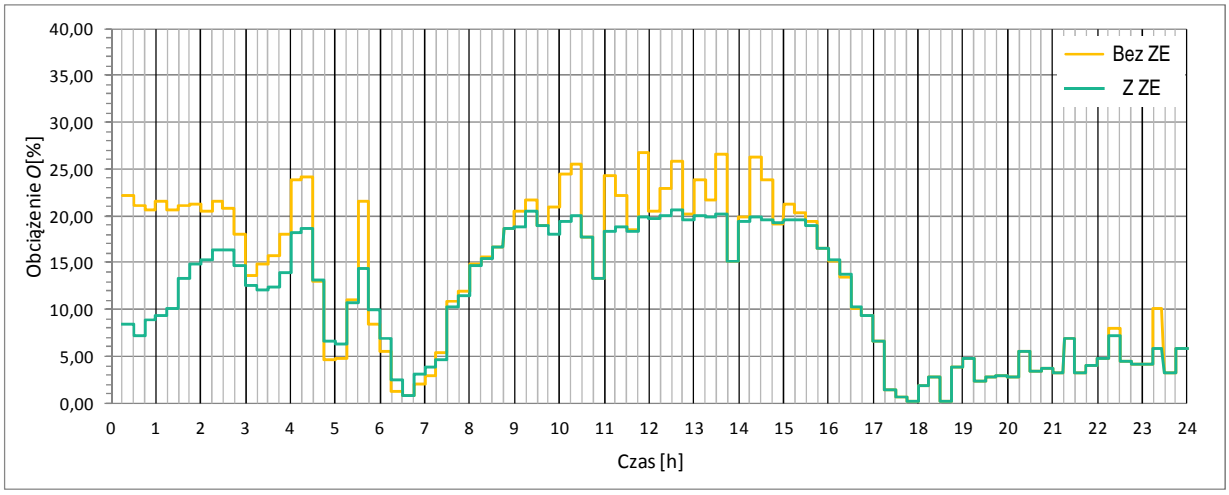
Na rysunku 9.3 przedstawiono zmienność napięcia w węźle 515 (węzeł 515 poprzedza węzeł 520 od strony zasilania). W związku z tym, że już w węźle 515 wpływ generacji oraz działania zasobników jest znikomy, a w dalszej części sieci nie występują problemy napięciowe pominięto zobrazowanie poziomów napięcia dla węzłów znajdujących się bliżej węzła zasilającego. Na rysunku 9.4 przedstawiono zmienność napięcia w węźle 520, który to węzeł jest bardziej oddalony od miejsca zasilania od węzła 515. Z porównania napięć przedstawionych na rys. 9.3 oraz rys. 9.4 wynika, że dodatkowa impedancja sieci elektroenergetycznej (w postaci linii nn 4xAL 70 o dł. 390 m) ma znaczący wpływ na poziom napięcia w węźle 520, w stosunku do węzła 515. Można stwierdzić, że problemy napięciowe będą bardziej widoczne w węzłach, które znajdują się dalej o miejsca zasilania. Zależność tą potwierdza rys. 9.6 na którym jest przedstawiona zmienność napięcia w węźle 522,

który to jest oddalony od węzła 520 od strony zasilania o linie 4xAL 70 o długości 120 m i w węźle 526 (rys. 9.5), który to jest oddalony od węzła 520 od strony zasilania o linie 4xAL 70 o długości 200 m.

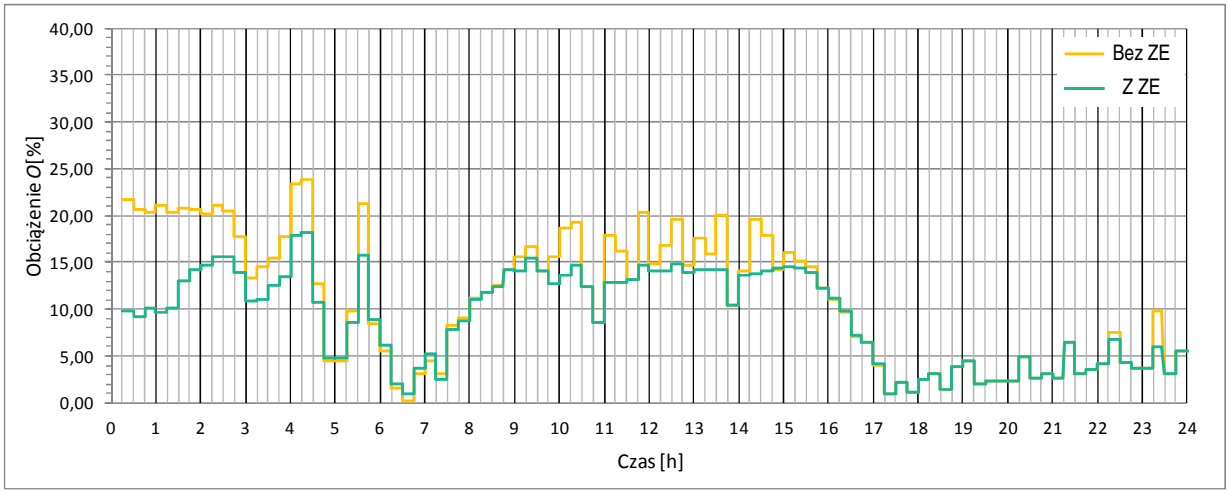
Długości linii pomiędzy węzłami 515, 520 i 526 są typowymi odległościami występującymi w sieci dystrybucyjnej nn – zwłaszcza w sieciach wiejskich. Na rys. 9.7÷9.9 przedstawiono względne (procentowe) obciążenie poszczególnych linii.



Rys. 9.7. Zmienność obciążenia linii 515-520 (profil A)

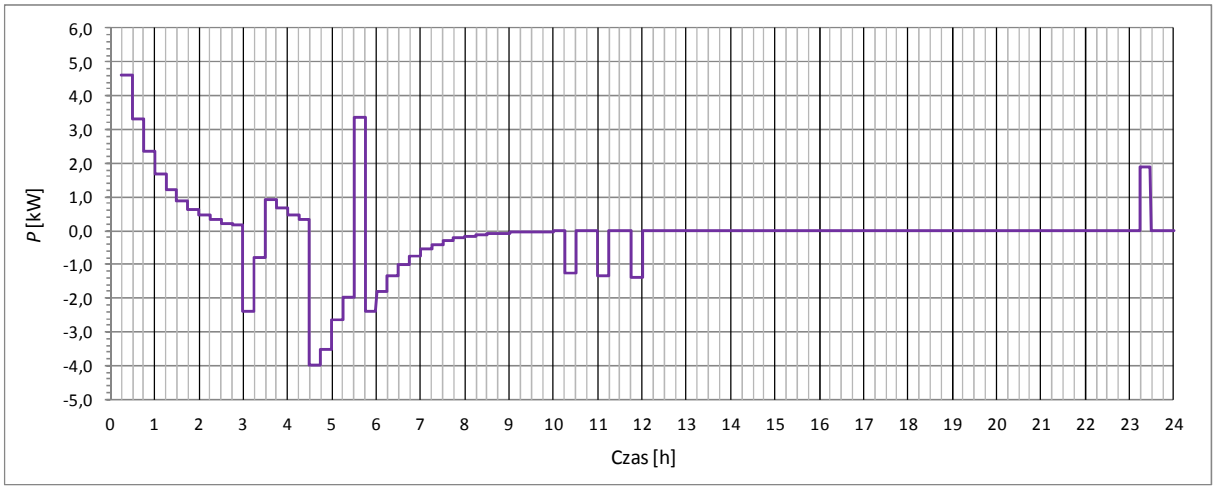


Rys. 9.8. Zmienność obciążenia linii 520-522 (profil A)

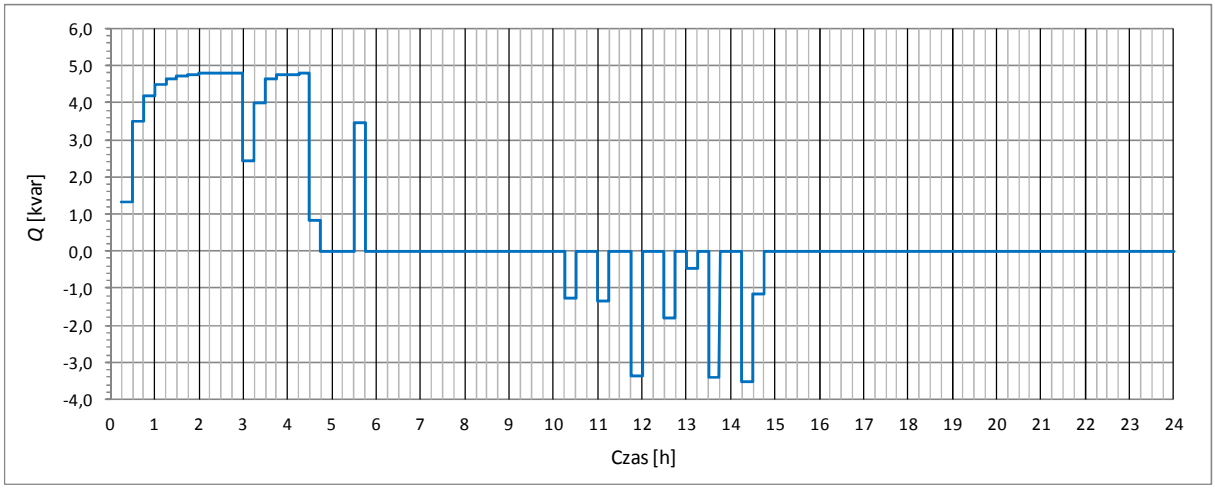


Rys. 9.9. Zmienność odciążenia linii 522-526 (profil A)

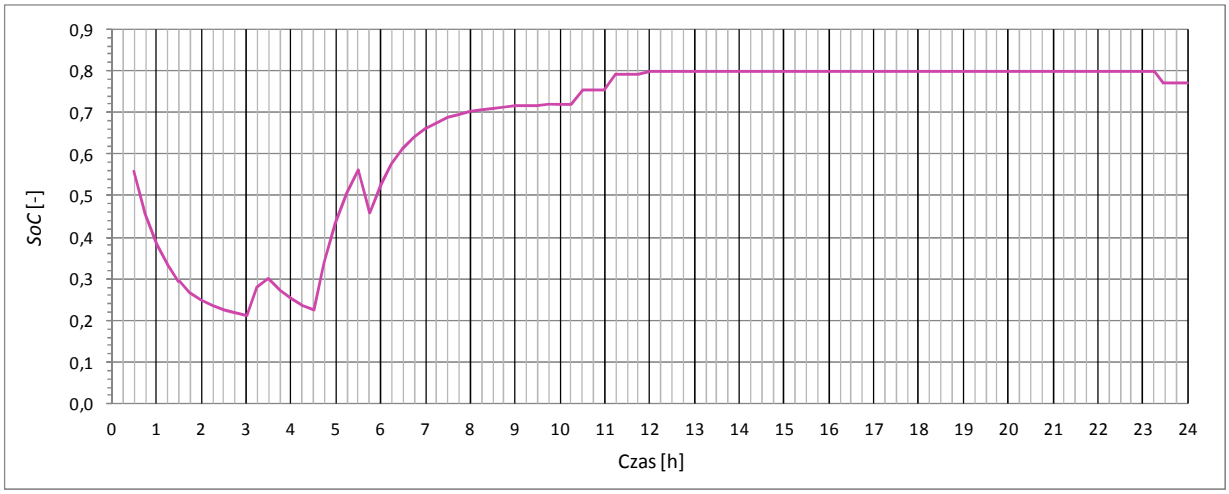
Zmienność obciążenia linii L 515-520, L 520-522 i L 522-526 nie osiąga większej wartości niż 30% obciążalności znamionowej danych linii. Wobec tego problemy napięciowe nie wynikają ze zbyt małej przepustowości linii zasilających, ale ze zbyt długich odcinków i tym samym zbyt dużej impedancji. Problemy napięciowe wiążą się także z tym, że generacja mocy przez wszystkie źródła występuje w tym samym czasie (jest to uwarunkowane porą dnia i warunkami pogodowymi), przez co wyprodukowana energia nie może zostać lokalnie skonsumowana. W dalszej części analizy zostały przedstawione poziomy napięć w węzłach do których są przyłączone zasobniki energii (węzły 522 i 526 są przedstawione na rys. 9.5 i 9.6). Przedstawiona została także praca zasobników energii pod kątem pobierania / dostarczania mocy czynnej i biernej, a także bieżący stan ich naładowania.



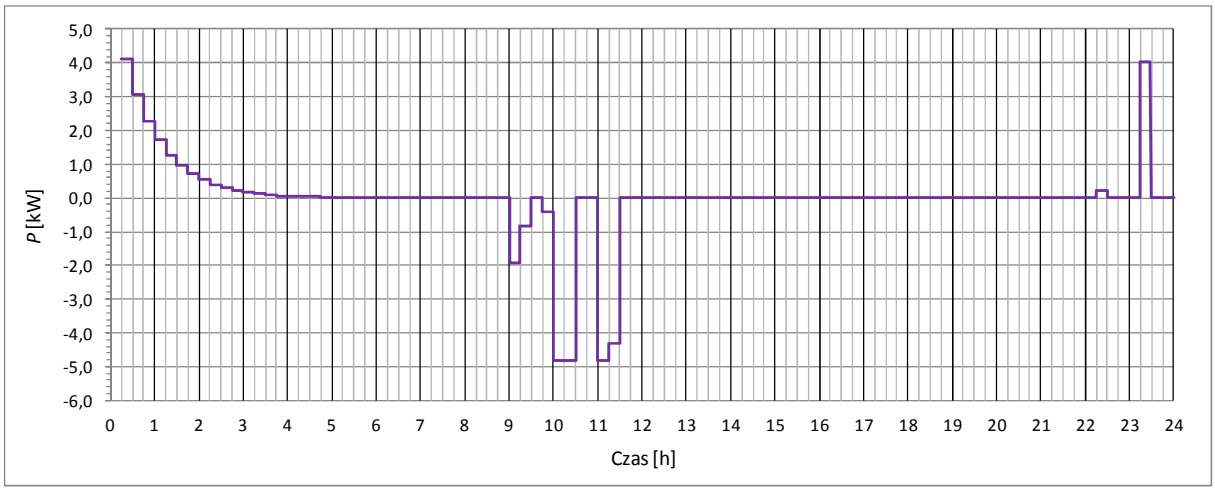
Rys. 9.10. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_522 (profil A)



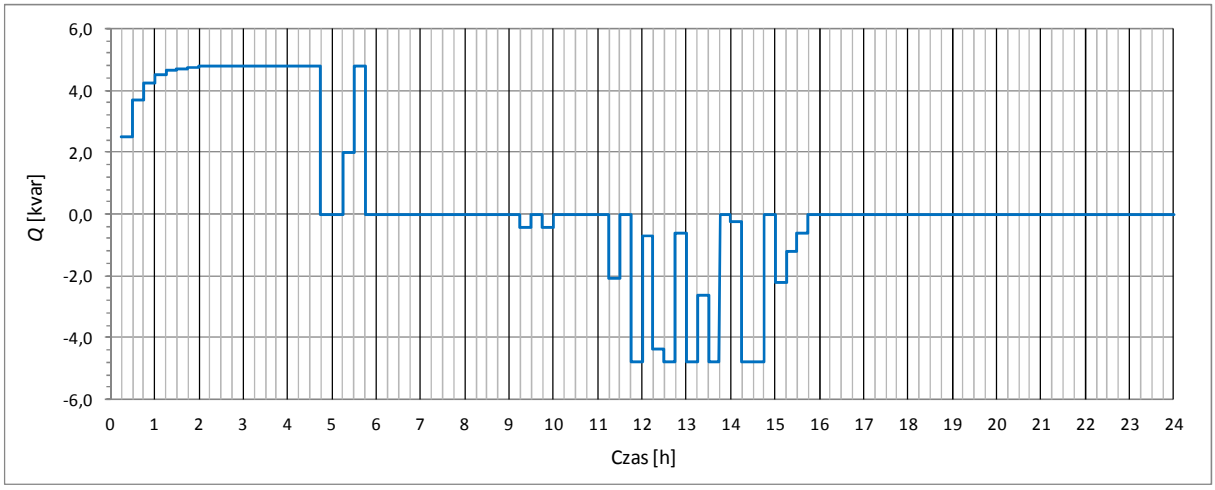
Rys. 9.11. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_522 (profil A)



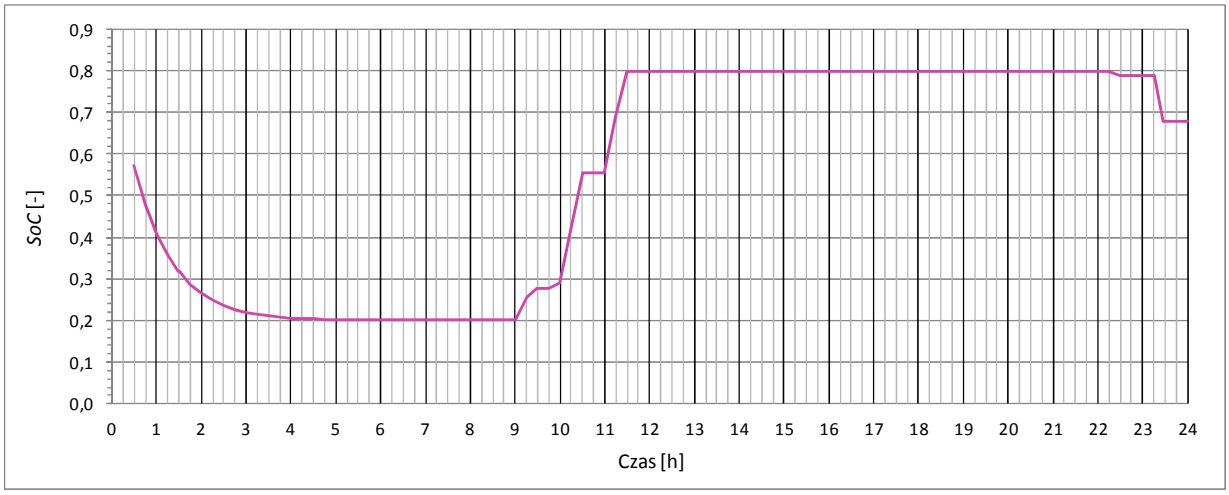
Rys. 9.12. Stan naładowania zasobnika energii ES_522 (profil A)



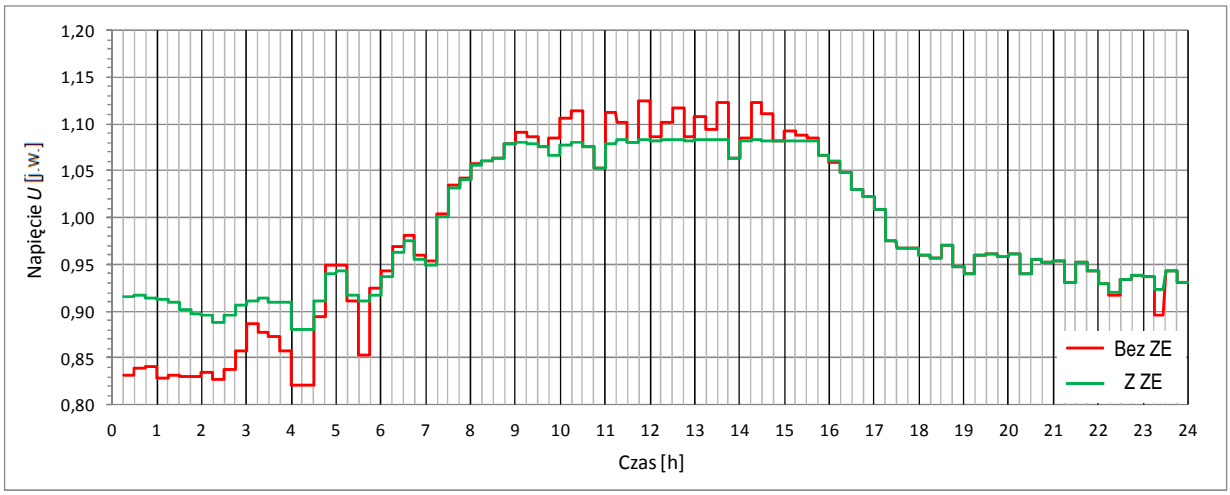
Rys. 9.13. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_526 (profil A)



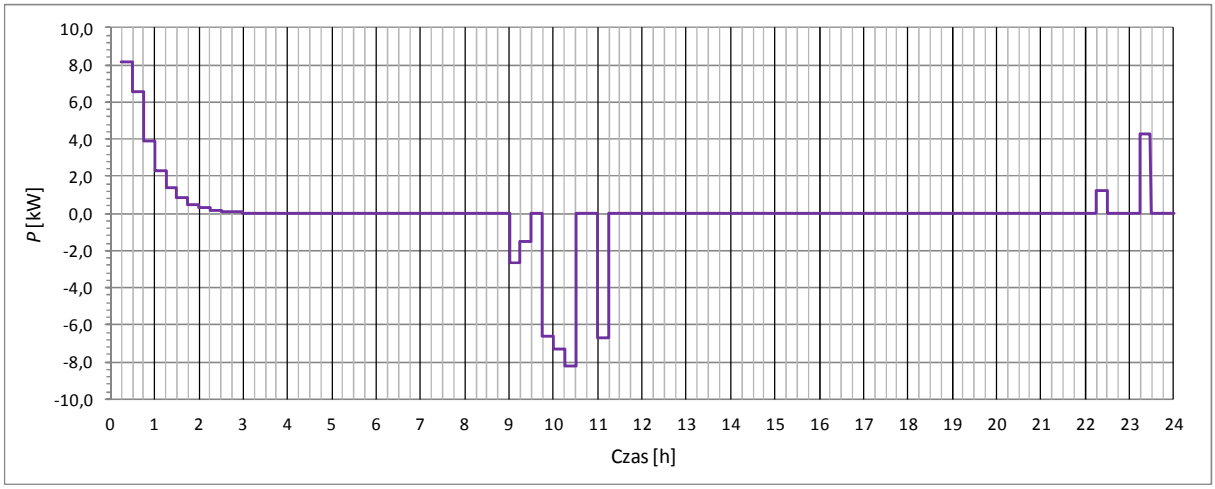
Rys. 9.14. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_526 (profil A)



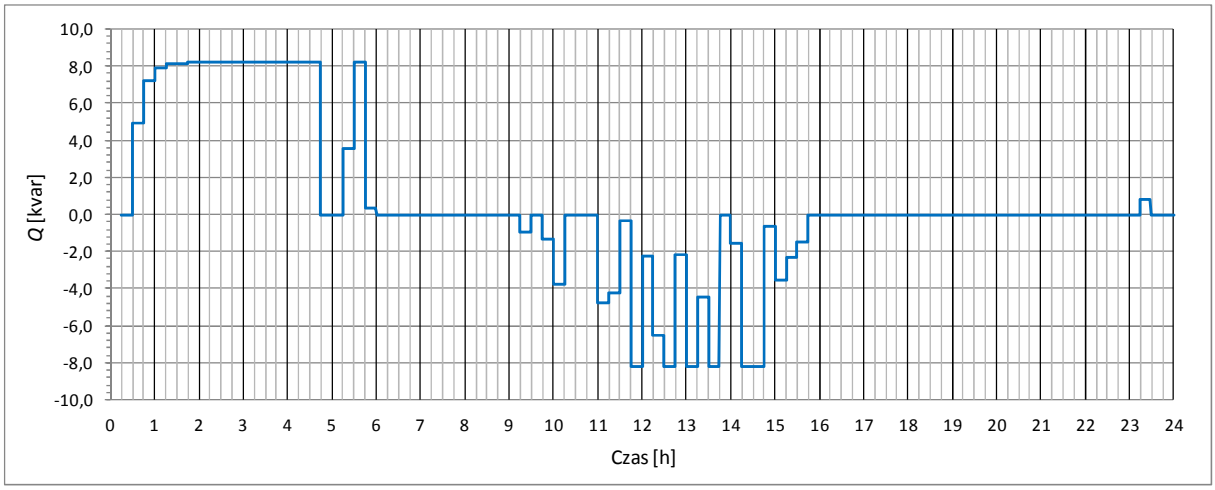
Rys. 9.15. Stan naładowania zasobnika energii ES_526 (profil A)



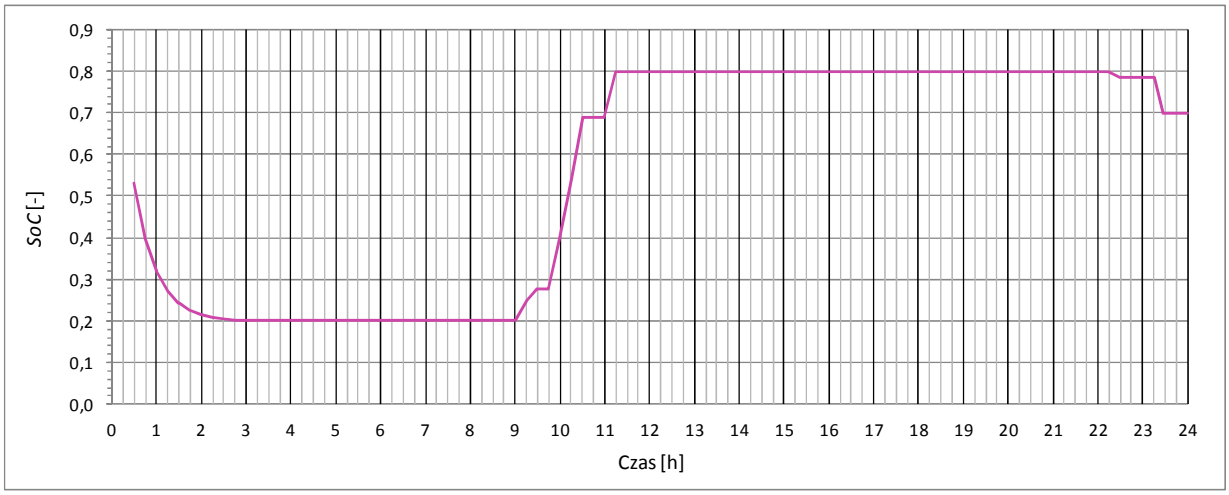
Rys. 9.16. Zmienność napięcia w węźle 528 (profil A)



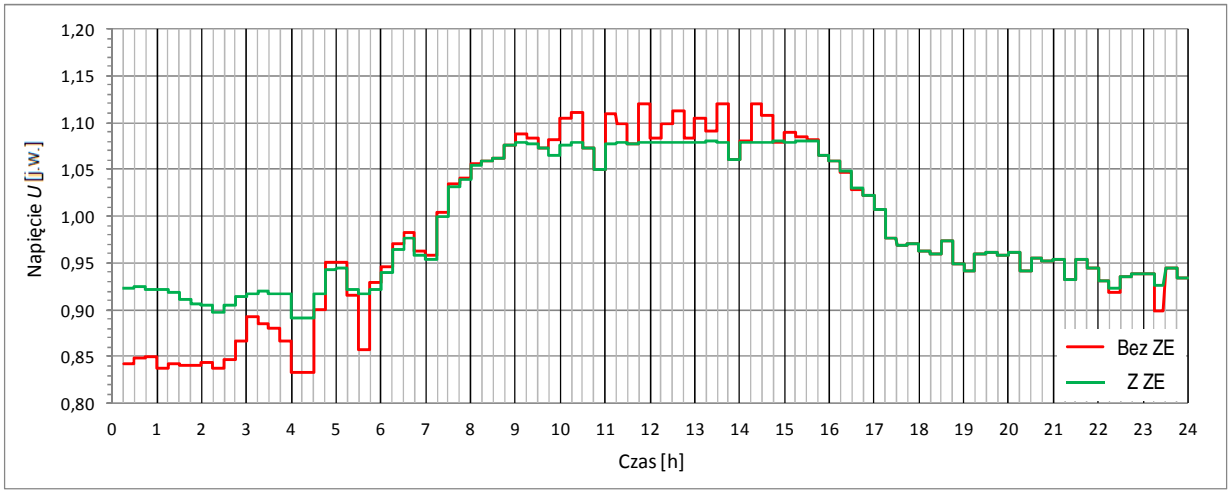
Rys. 9.17. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_528 (profil A)



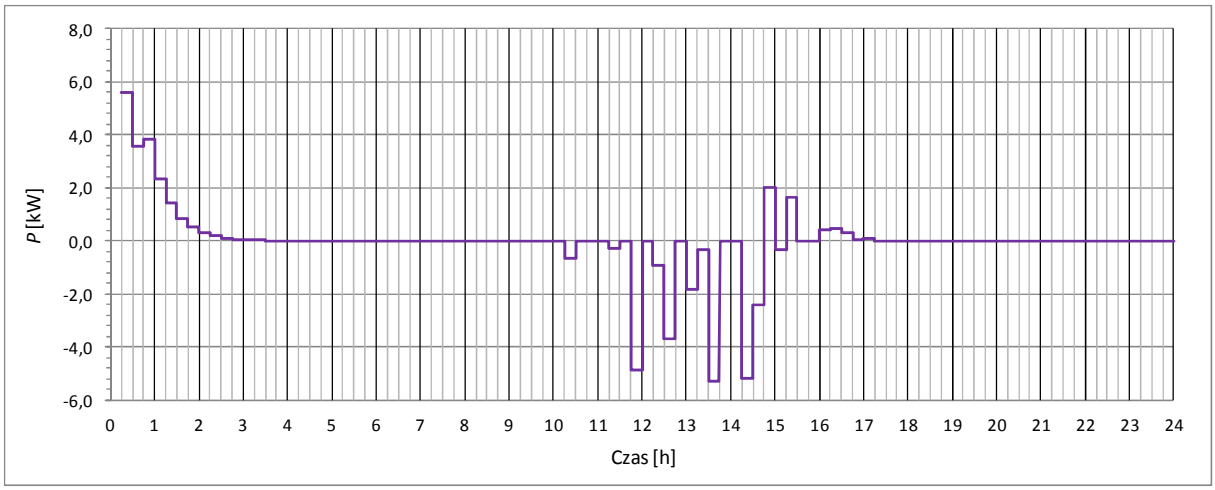
Rys. 9.18. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_528 (profil A)



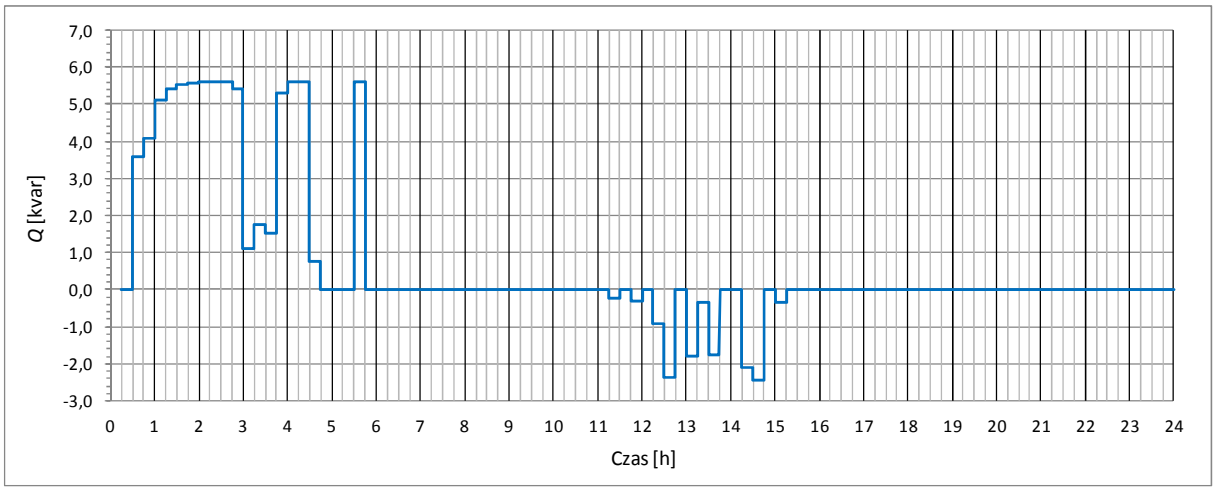
Rys. 9.19. Stan naładowania zasobnika energii ES_528 (profil A)



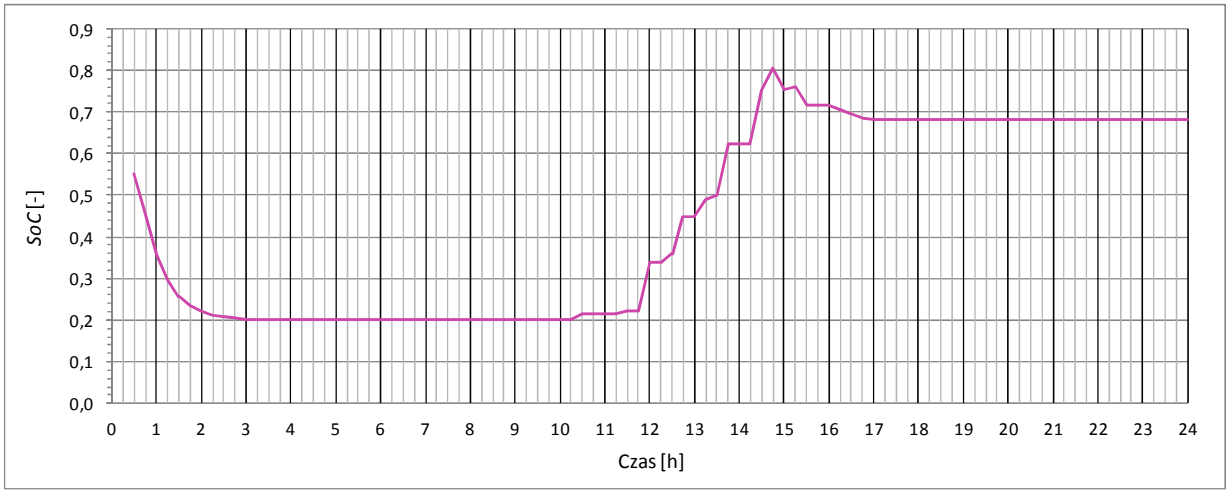
Rys. 9.20. Zmienność napięcia w węźle 529 (profil A)



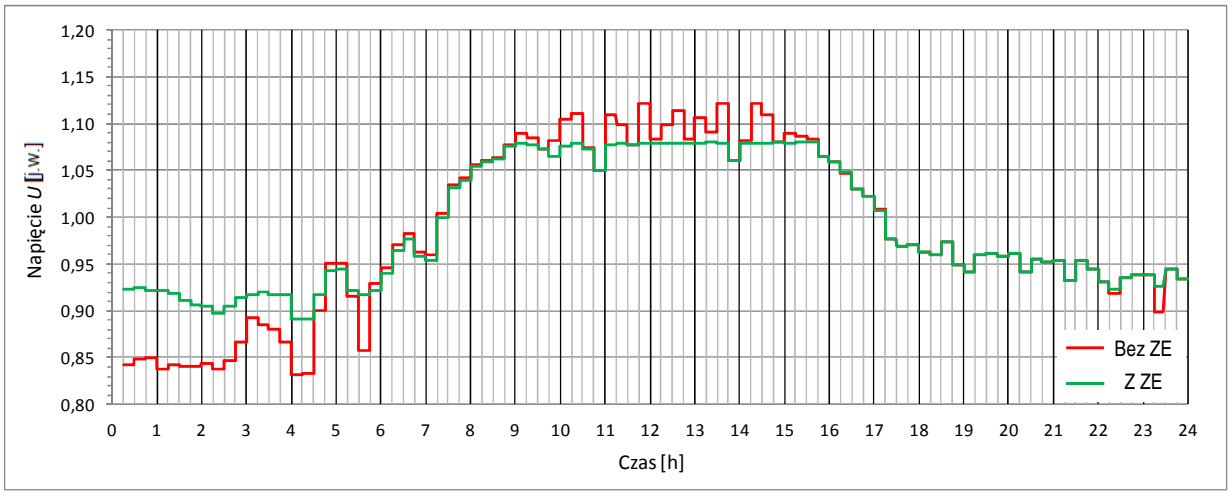
Rys. 9.21. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_529 (profil A)



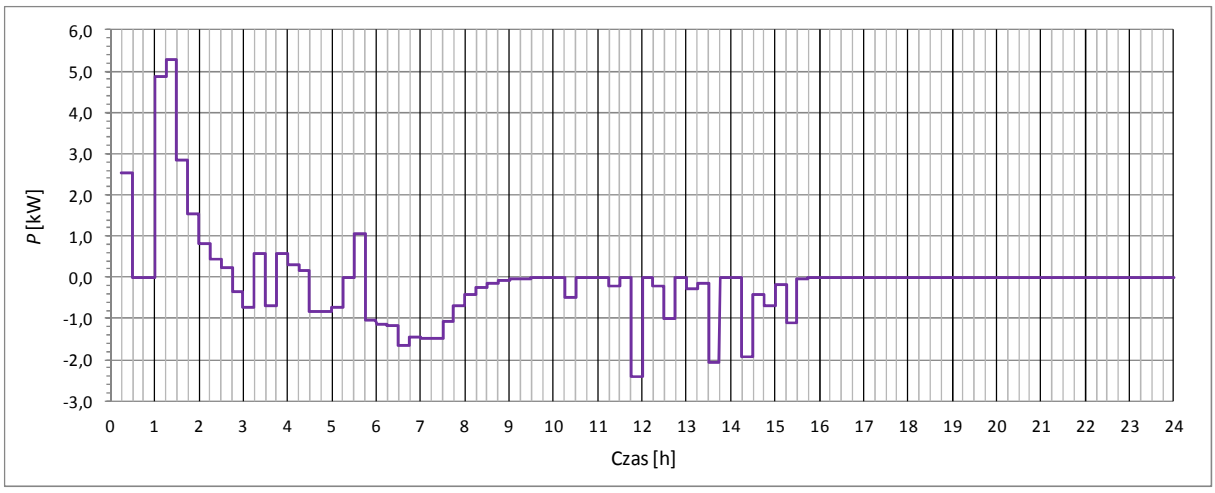
Rys. 9.22. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_529 (profil A)



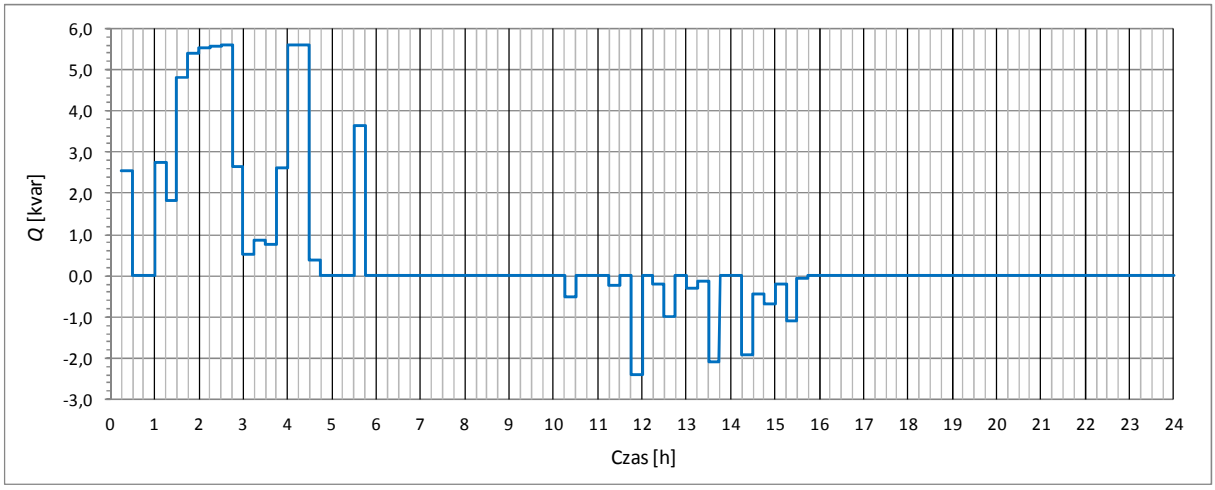
Rys. 9.23. Stan naładowania zasobnika energii ES_529 (profil A)



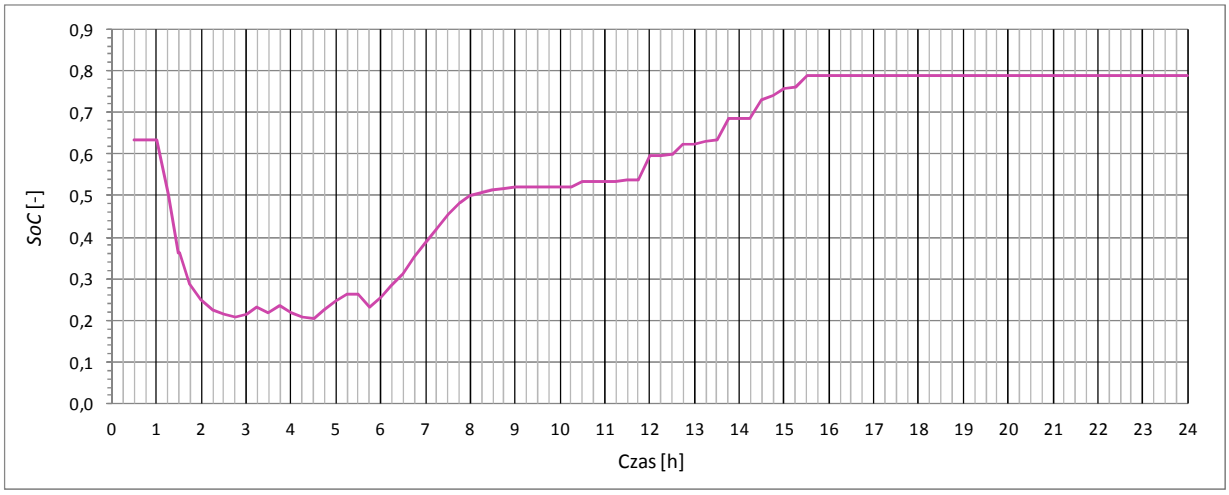
Rys. 9.24. Zmienność napięcia w węźle 530 (profil A)



Rys. 9.25. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_530 (profil A)



Rys. 9.26. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_530 (profil A)



Rys. 9.27. Stan naładowania zasobnika energii ES_530 (profil A)

Zasobniki energii w procesie doboru lokalizacji, zostały przydzielone do węzłów, w których występują problemy napięciowe związane z poborem i generacją mocy. Odpowiednia ich konfiguracja pozwala na zoptymalizowanie poniesionych kosztów na instalację urządzeń w sieci, a także jednocześnie zapewnia uzyskanie akceptowalnego poziomu napięcia w węzłach w analizowanej sieci. Dzięki dobraniu odpowiednich parametrów regulatora dla każdego z zasobnika energii można uzyskać efekt "współpracy" ze sobą zainstalowanych urządzeń. Nie wszystkie urządzenia oddają i pobierają moc czynną w tym samym czasie, a ich działanie jest zoptymalizowane, aby uzyskać jak największą efektywność. Dodatkowo, możliwość dostarczania mocy biernej do sieci przez zasobniki energii powoduje maksymalizację wykorzystania urządzenia.

Poniżej znajdują się wyniki przeprowadzonej symulacji dla profilu obciążenia B.

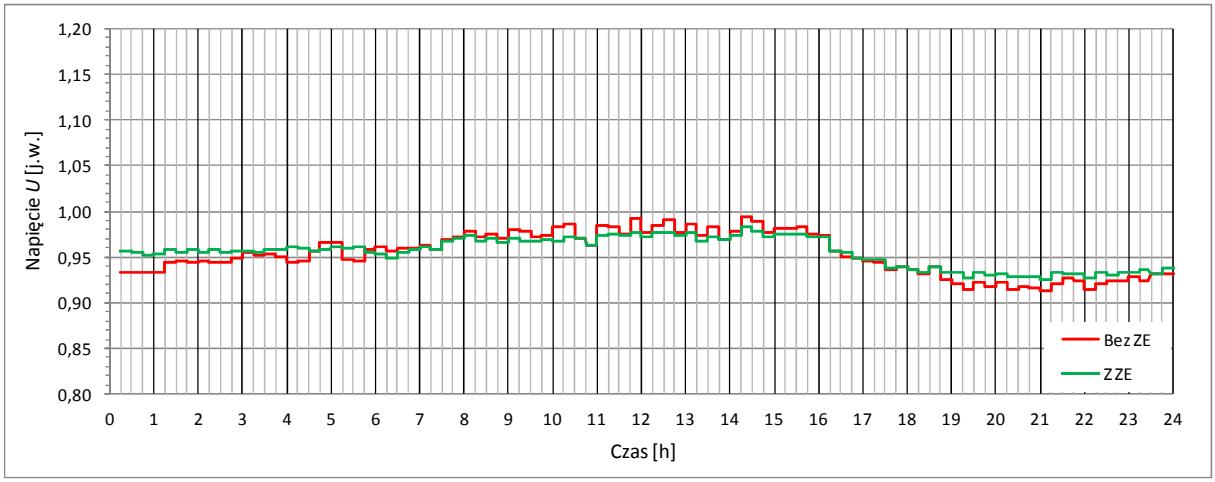
Tabela 9.3. Wynik doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii dla analizowanej sieci nn (profil obciążenia: B)

Nr węzła	520	521	524	525	526	527	528	529
Moc [kW]	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	8,2
Pojemność [kWh]	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	13,5

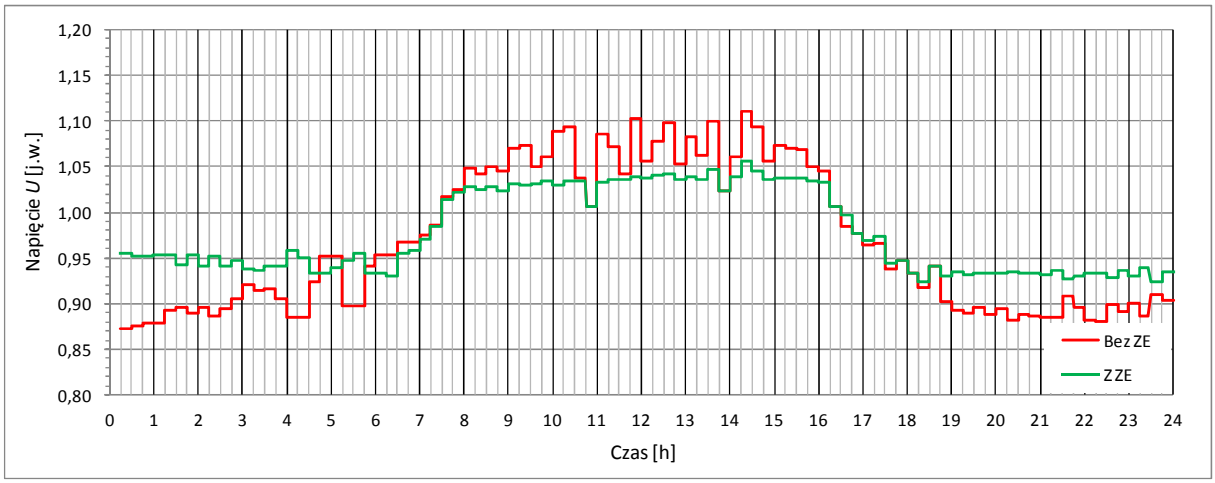
Parametry regulatorów poszczególnych zasobników energii będące wynikiem optymalizacji dla profilu obciążenia B przedstawiono w tab. 9.4.

Tabela 9.4. Parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii (profil obciążenia: B)

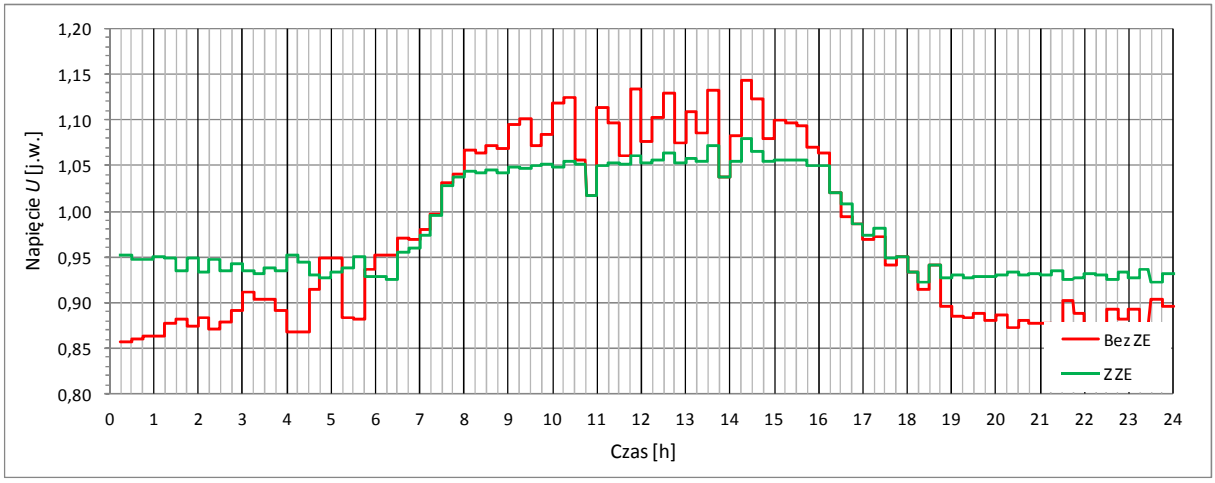
Nazwa zasobnika energii	ES_520	ES_521	ES_524	ES_525	ES_526	ES_527	ES_528	ES_529
SoC_1	0,511	0,592	0,468	0,3	0,491	0,3	0,606	0,3
SoC_1'	0,524	0,600	0,646	0,628	0,491	0,462	0,7	0,3
O_1	0,288	-0,863	0,097	-0,034	0,069	0,758	0,154	-0,052
O_2	0,334	0,393	0,521	0,003	0,118	0,896	0,672	-0,018
O_1'	0,711	0,812	0,527	0,013	0,142	0,924	0,743	0,007
O_2'	0,740	0,915	0,531	0,044	0,148	0,924	0,758	0,319



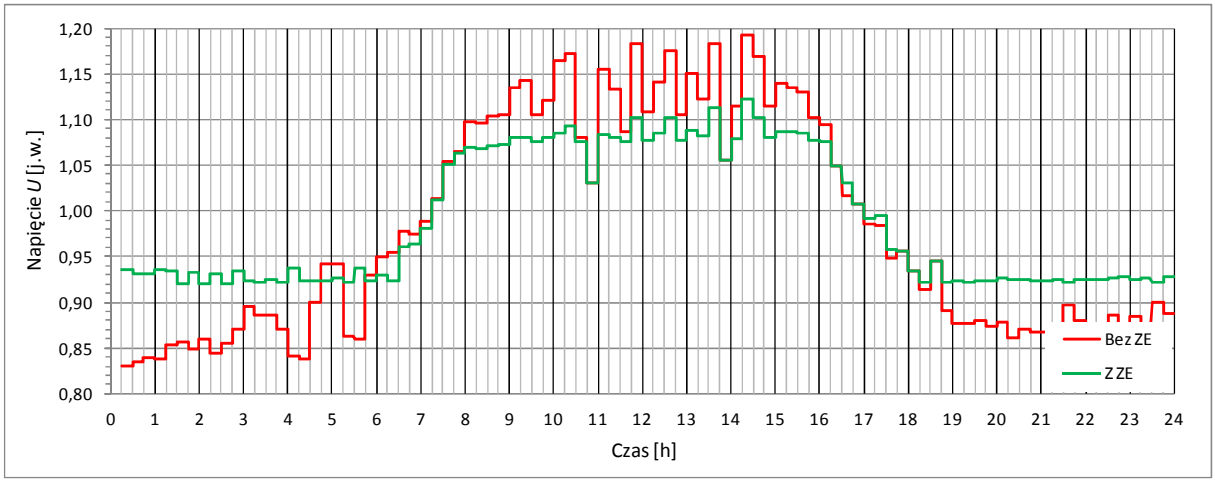
Rys. 9.28. Zmienność napięcia w węźle 515 (profil B)



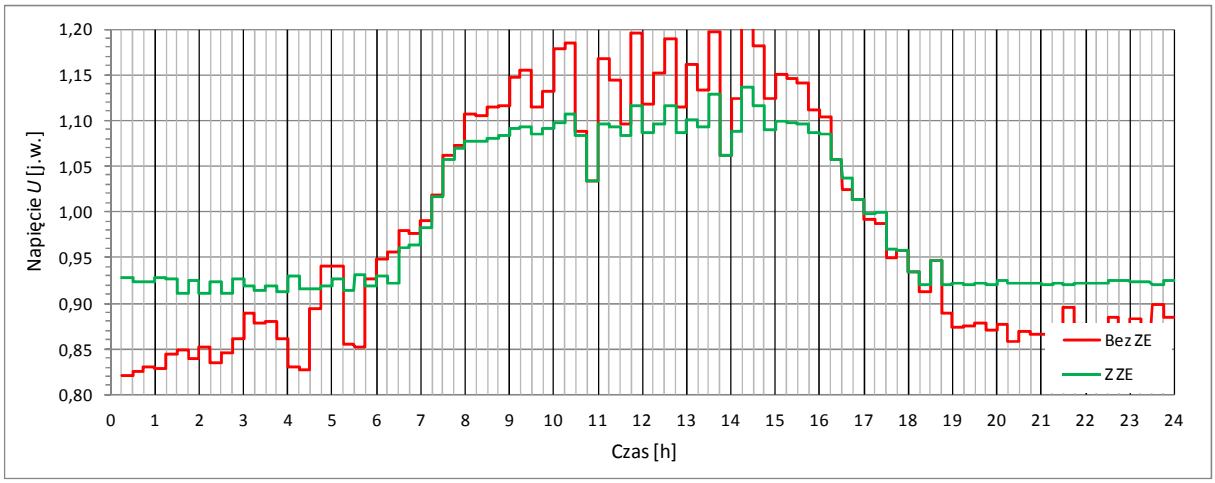
Rys. 9.29. Zmienność napięcia w węźle 520 (profil B)



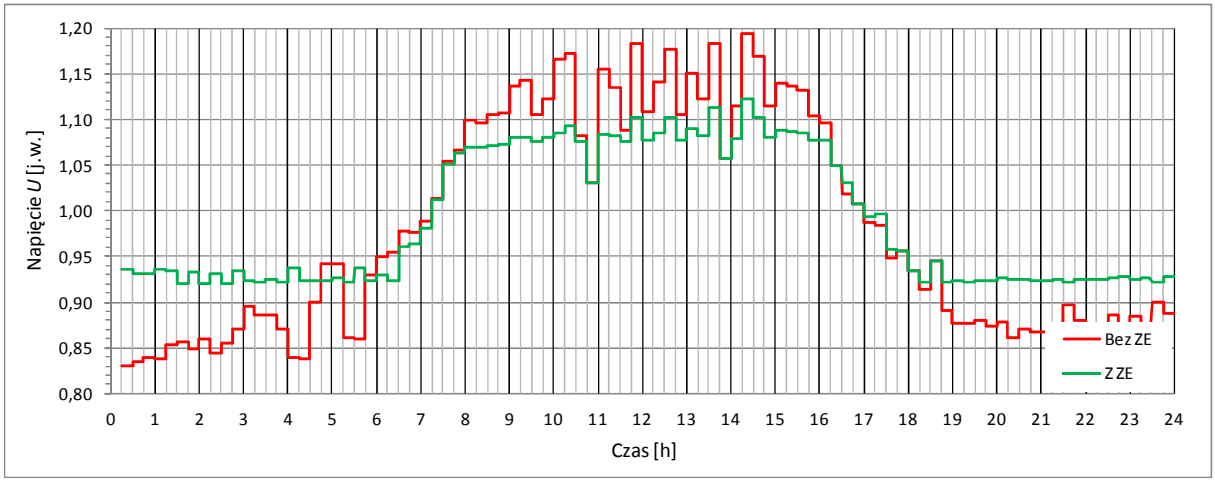
Rys. 9.30. Zmienność napięcia w węźle 522 (profil B)



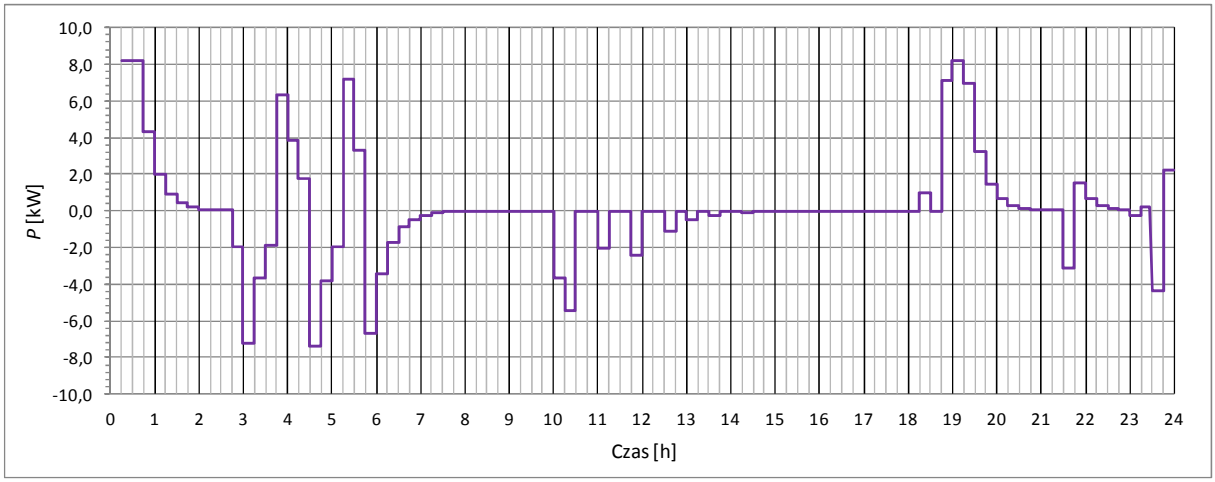
Rys. 9.31. Zmienność napięcia w węźle 526 (profil B)



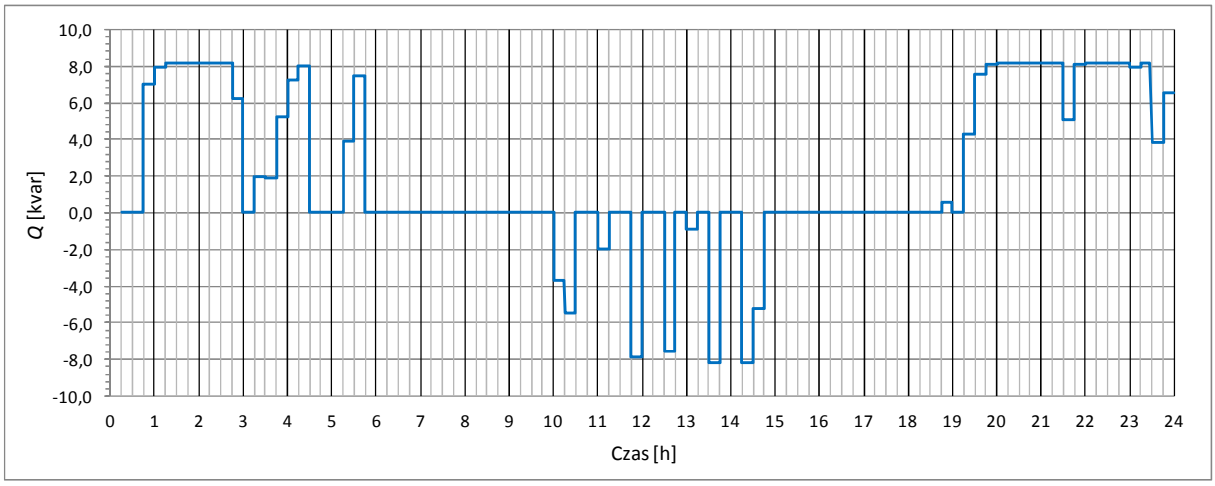
Rys. 9.32. Zmienność napięcia w węźle 528 (profil B)



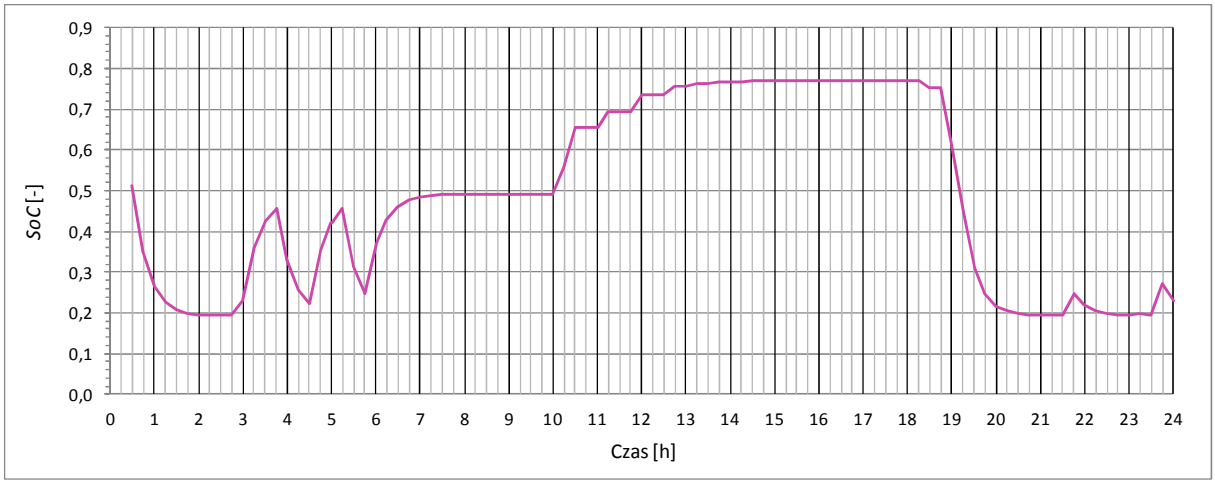
Rys. 9.33. Zmienność napięcia w węźle 530 (profil B)



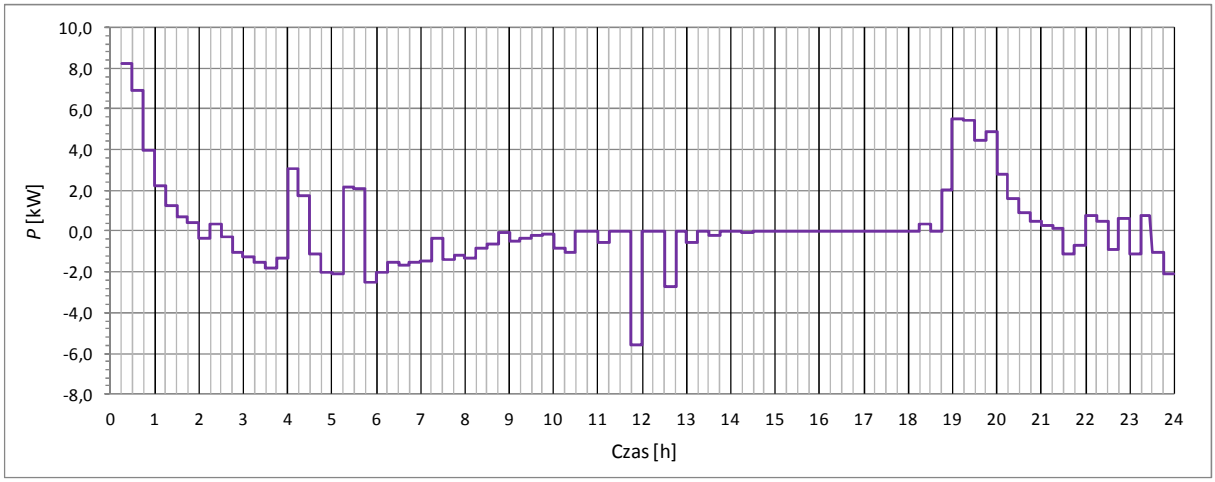
Rys. 9.34. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_520 (profil B)



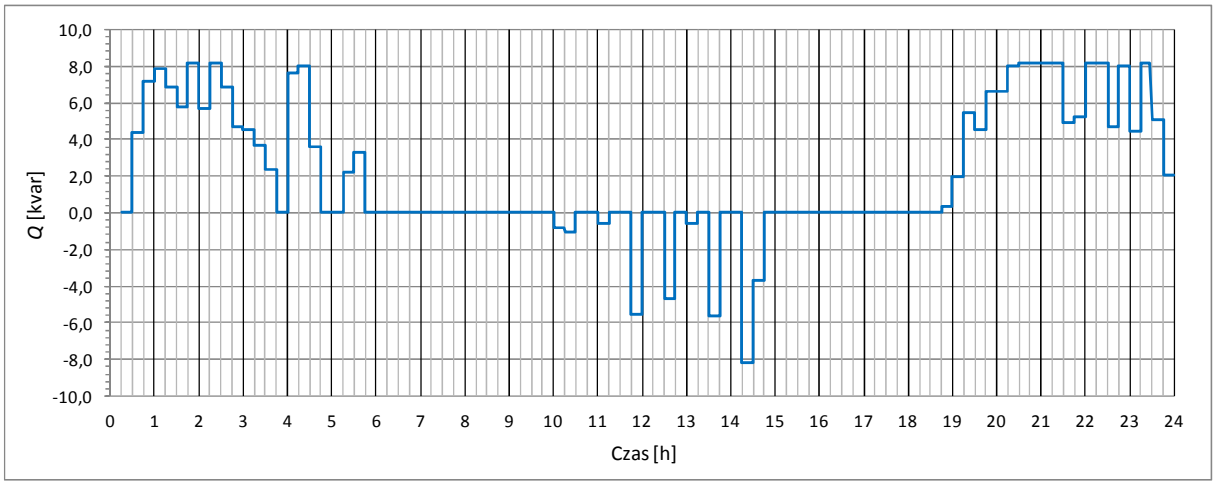
Rys. 9.35. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_520 (profil B)



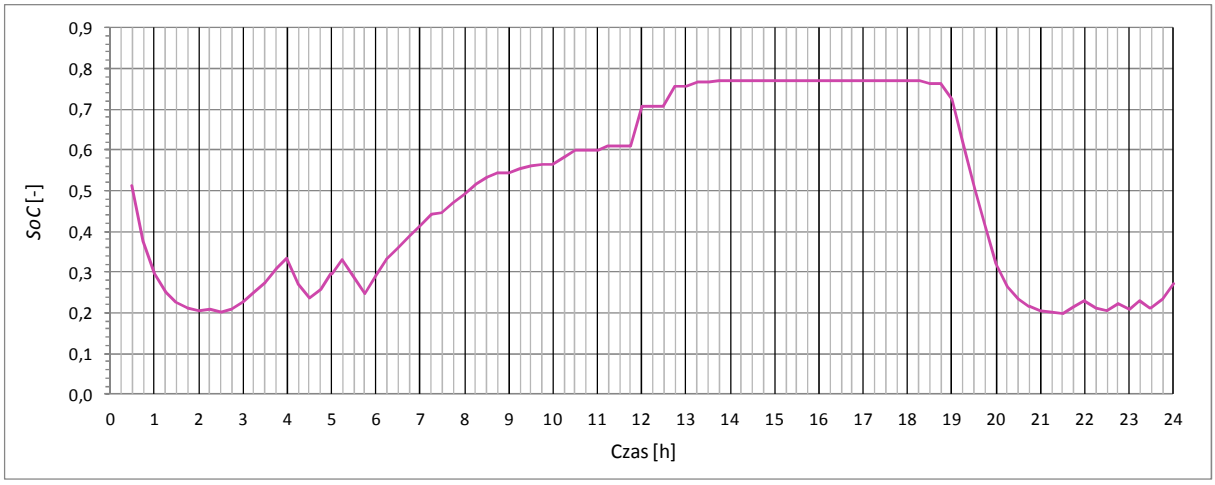
Rys. 9.36. Stan naładowania zasobnika energii ES_520 (profil B)



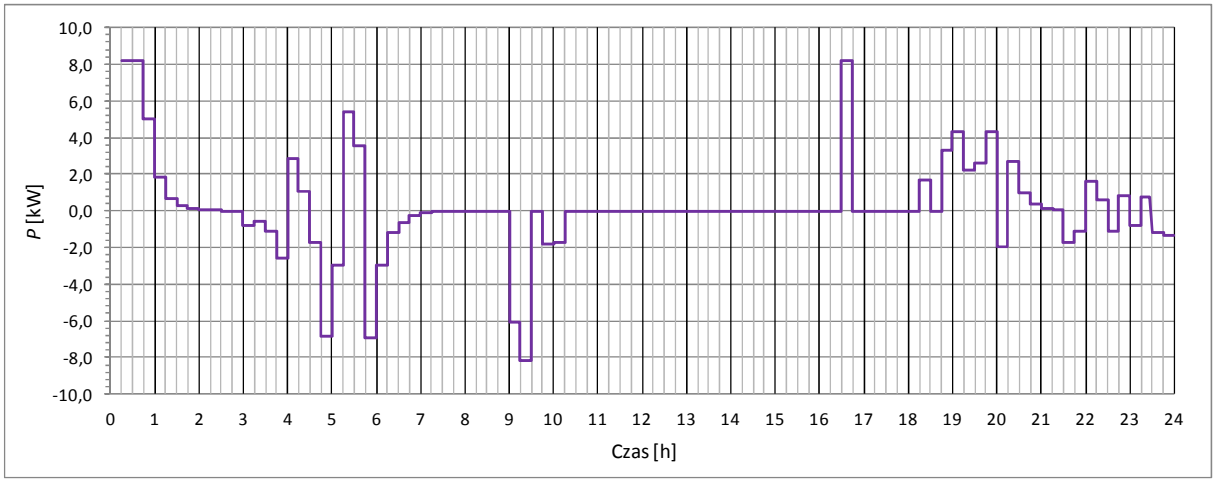
Rys. 9.37. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_521 (profil B)



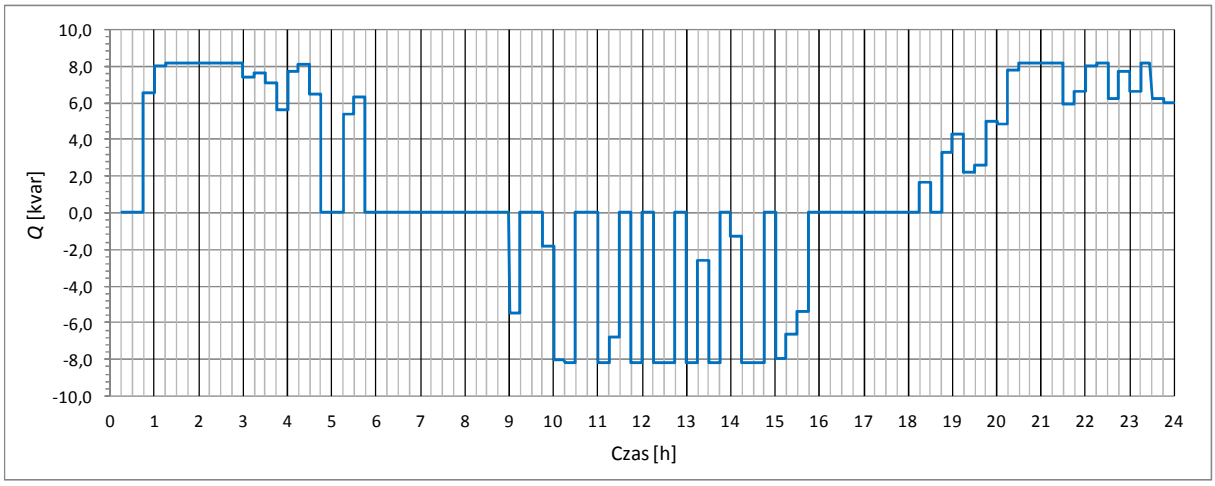
Rys. 9.38. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_521 (profil B)



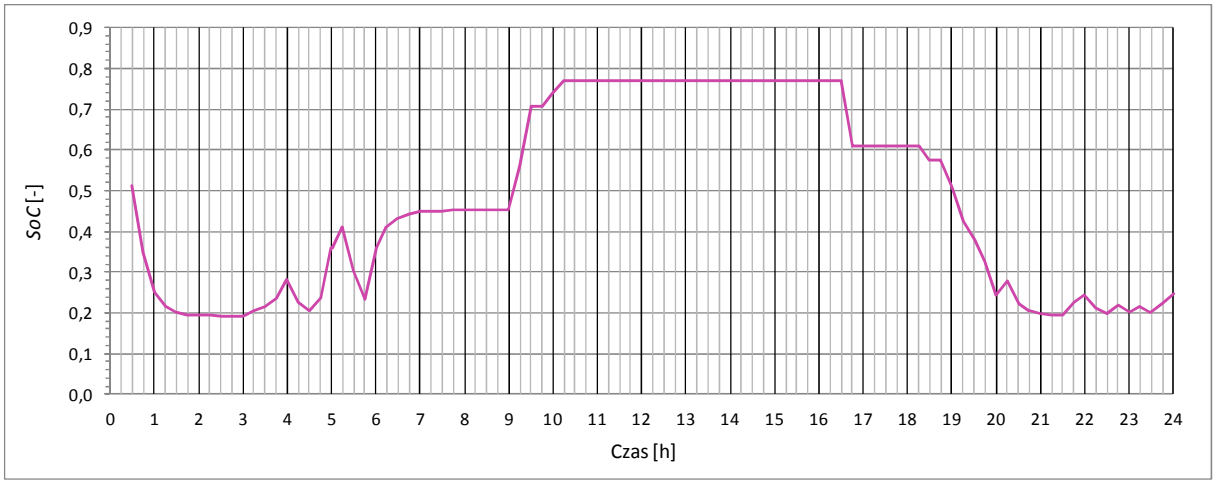
Rys. 9.39. Stan naładowania zasobnika energii ES_521 (profil B)



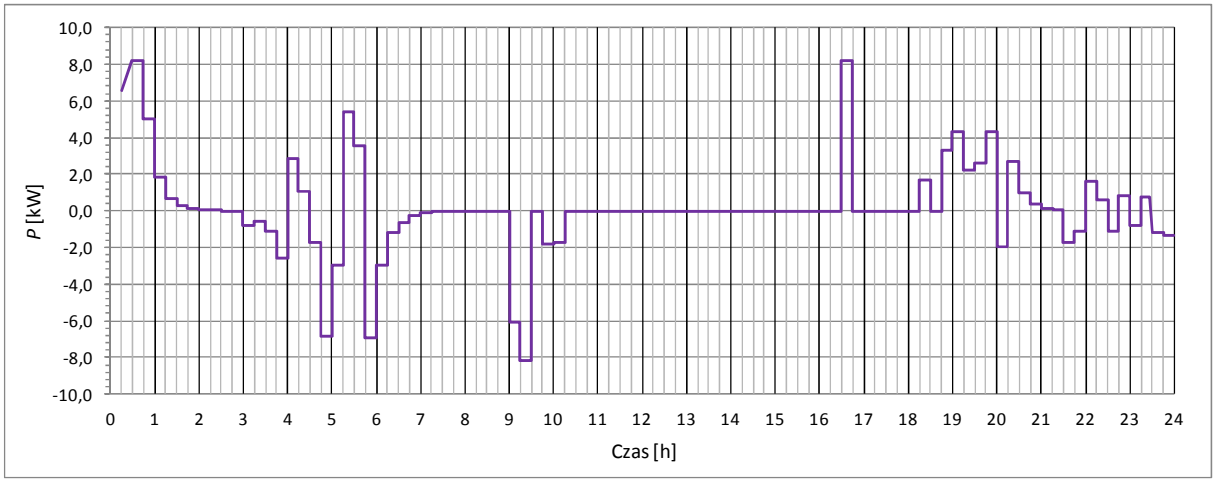
Rys. 9.40. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_524 (profil B)



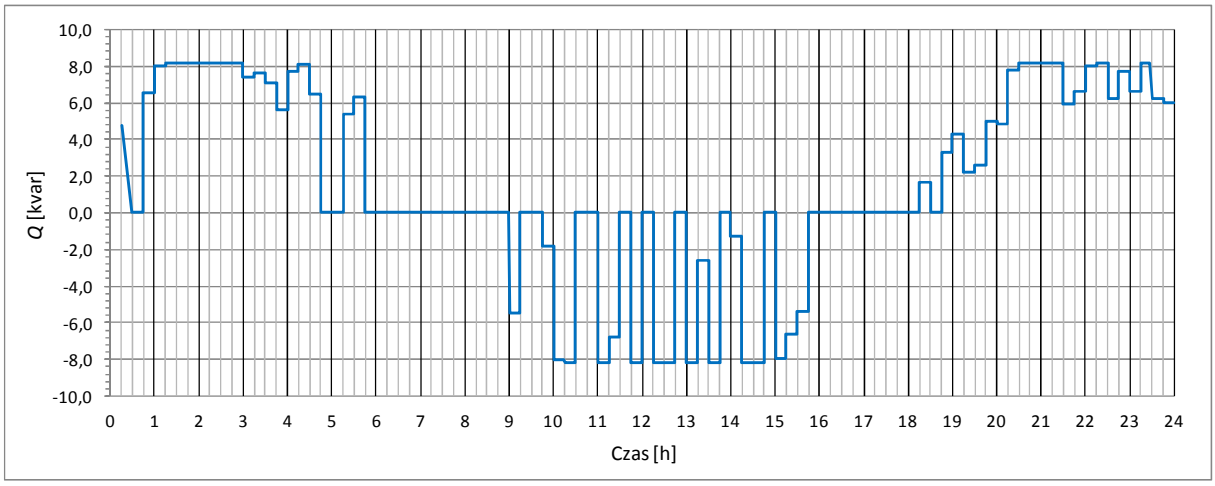
Rys. 9.41. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_524 (profil B)



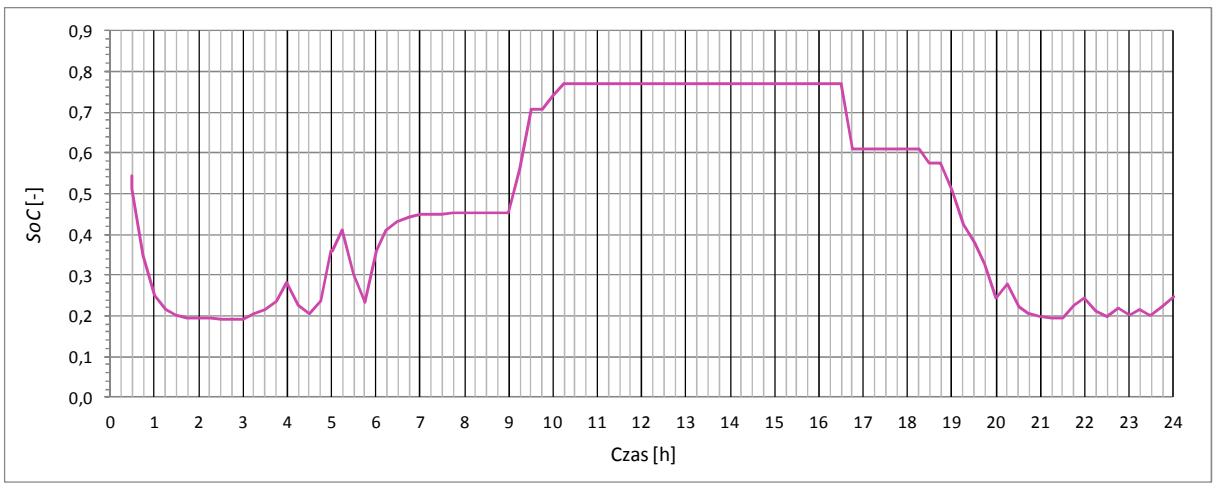
Rys. 9.42. Stan naładowania zasobnika energii ES_524 (profil B)



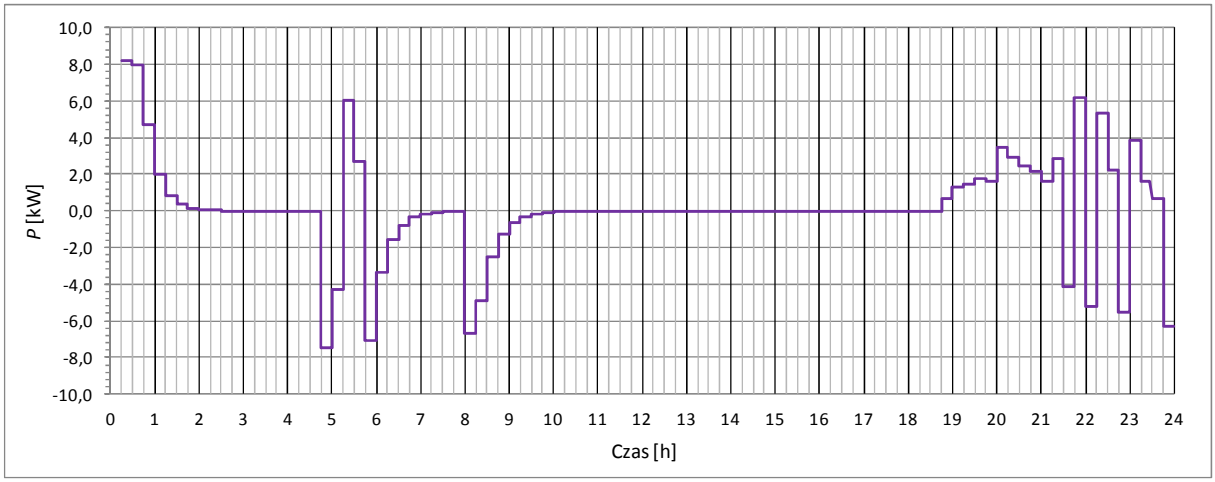
Rys. 9.43. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_525 (profil B)



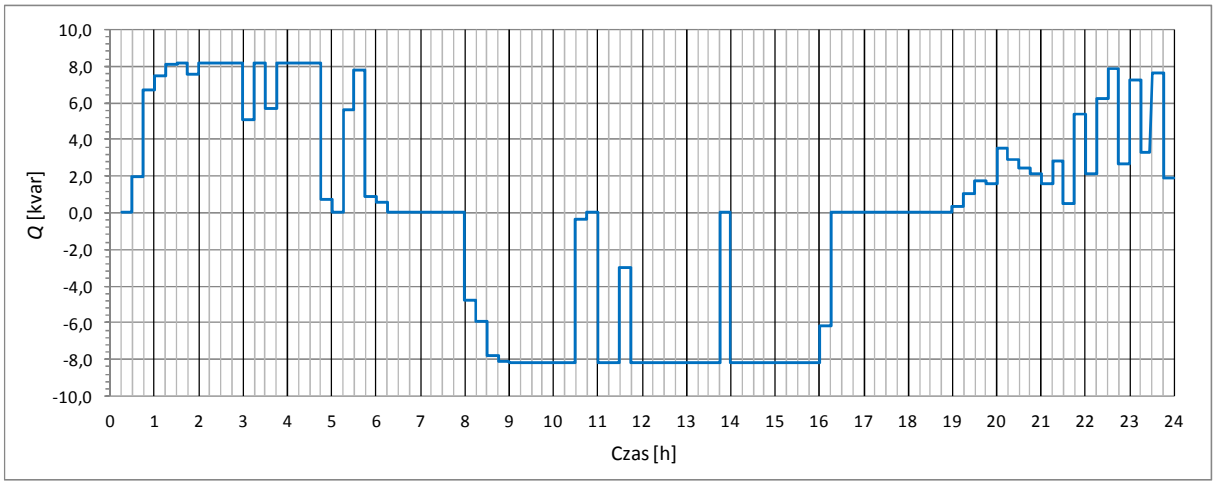
Rys. 9.44. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_525 (profil B)



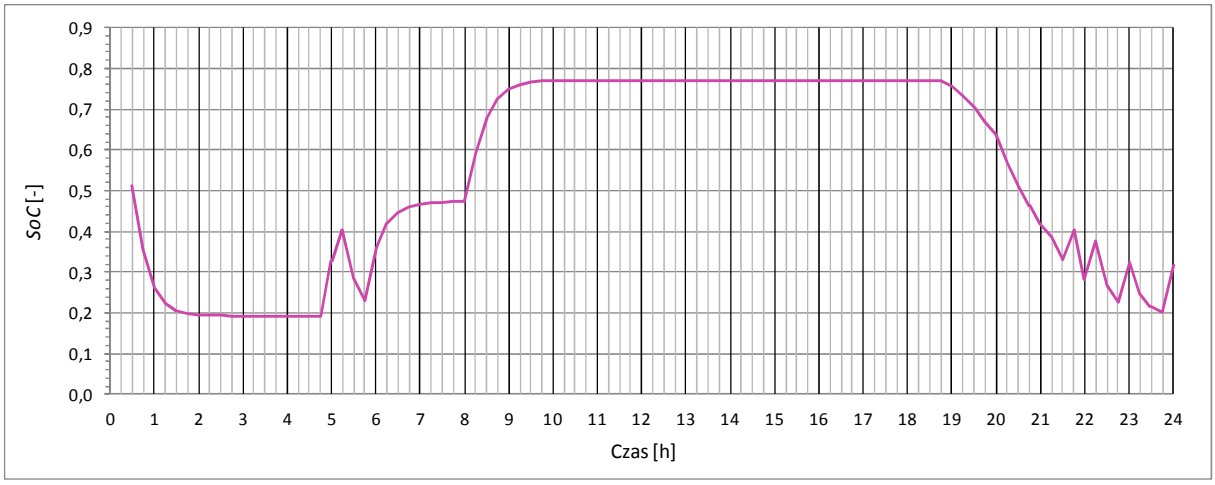
Rys. 9.45. Stan naładowania zasobnika energii ES_525 (profil B)



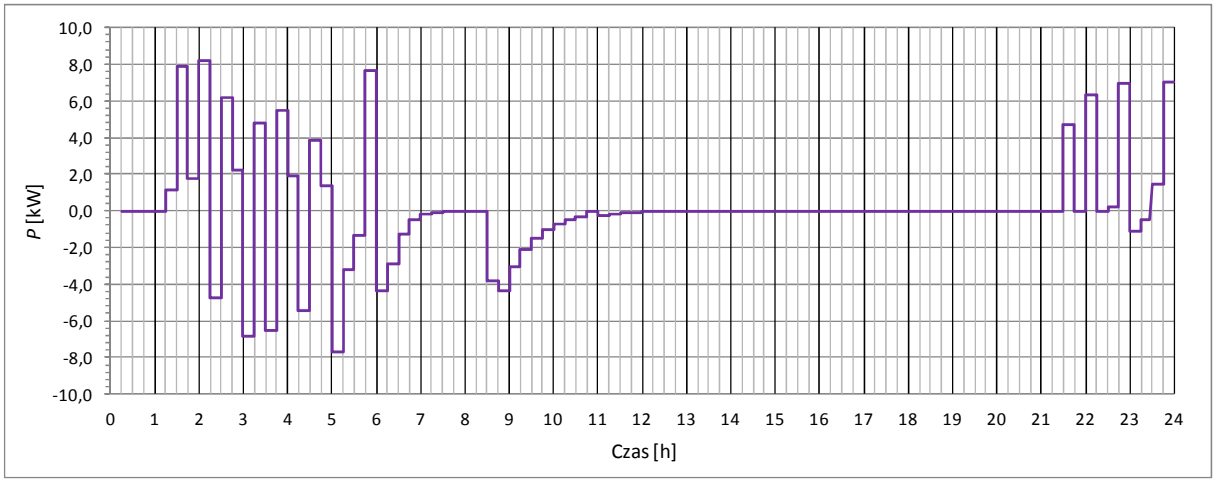
Rys. 9.46. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_526 (profil B)



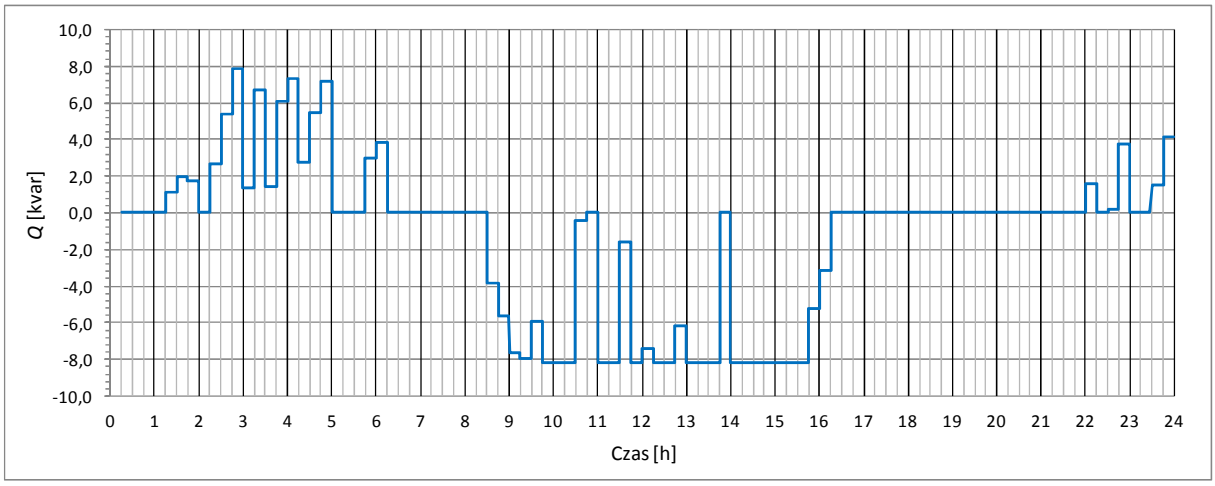
Rys. 9.47. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_526 (profil B)



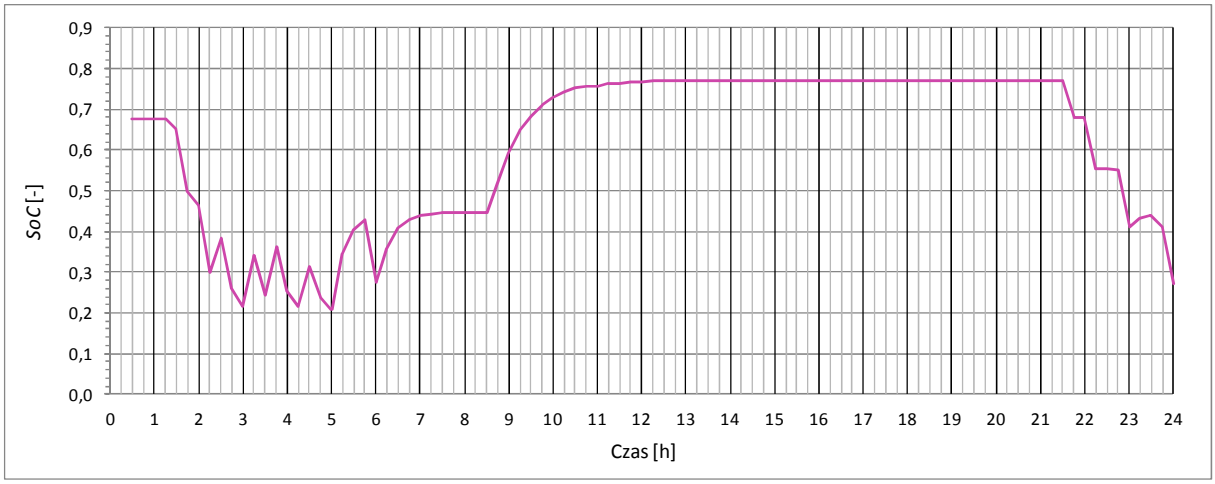
Rys. 9.48. Stan naładowania zasobnika energii ES_526 (profil B)



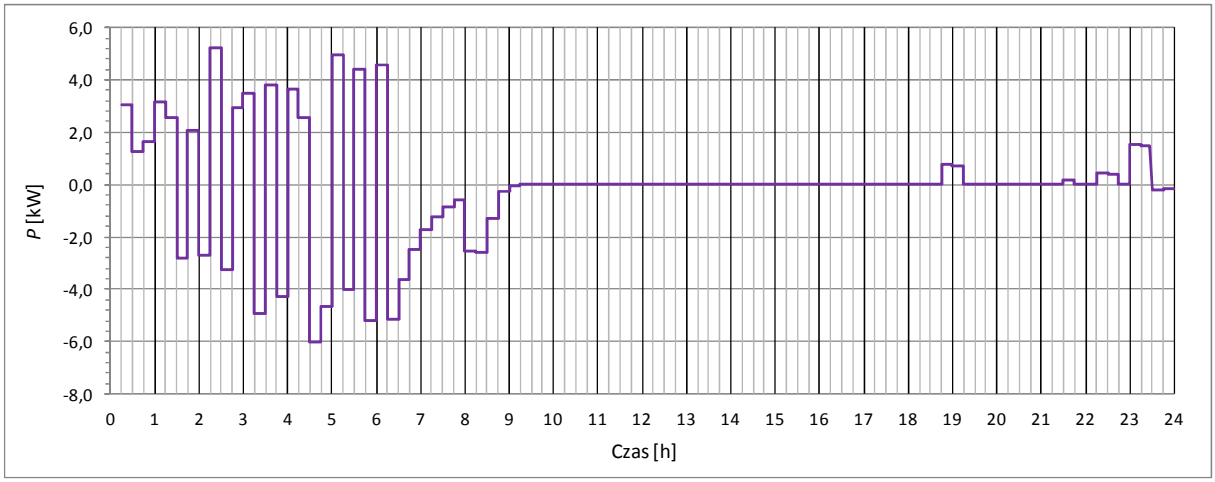
Rys. 9.49. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_527 (profil B)



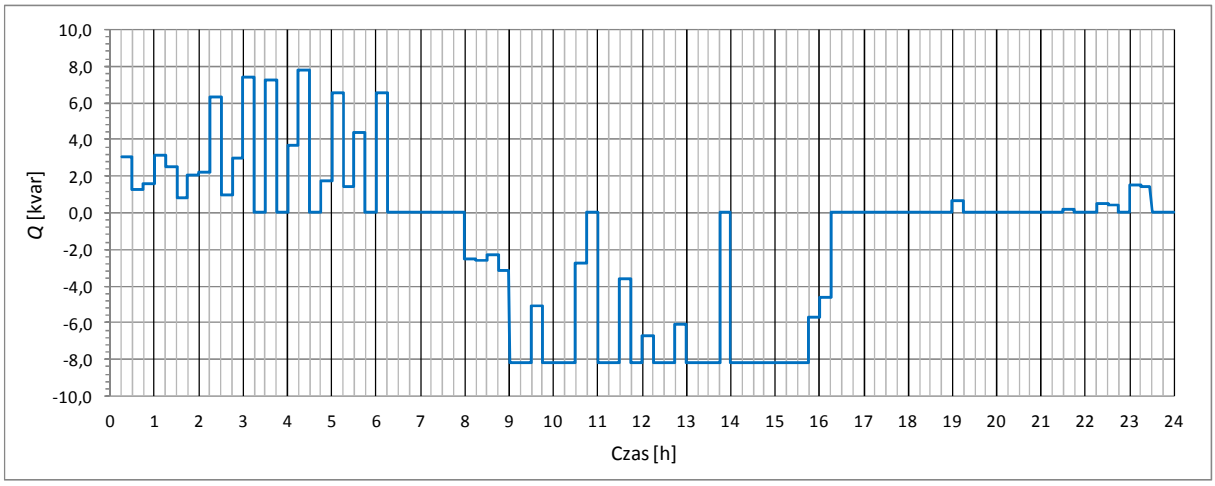
Rys. 9.50. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_527 (profil B)



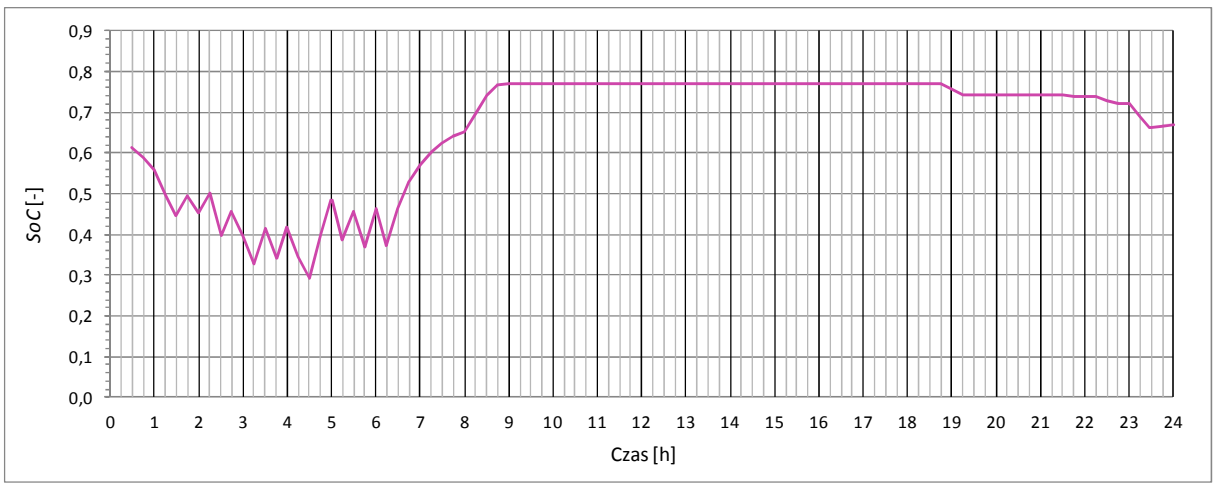
Rys. 9.51. Stan naładowania zasobnika energii ES_527 (profil B)



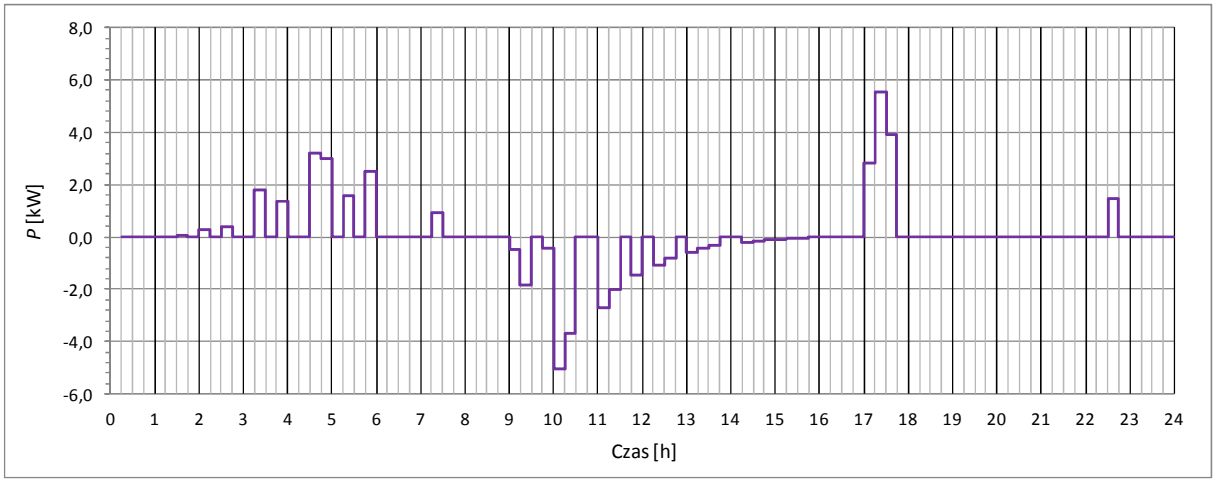
Rys. 9.52. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_528 (profil B)



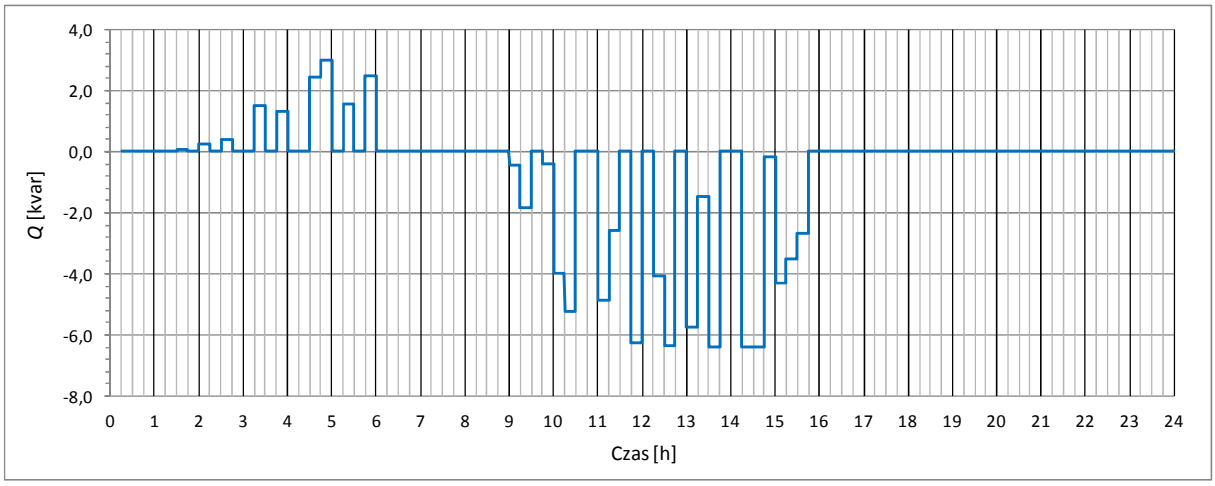
Rys. 9.53. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_528 (profil B)



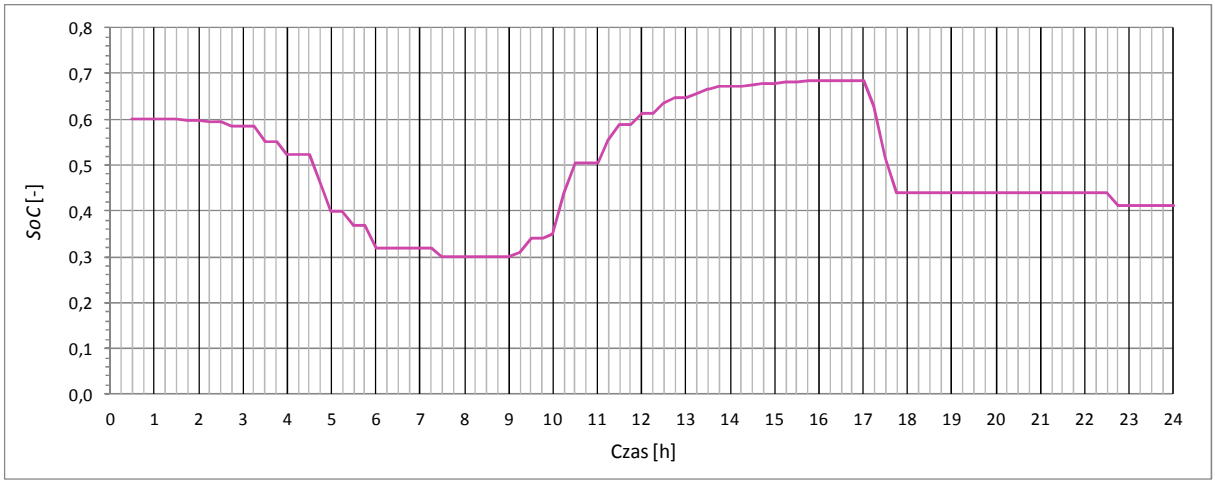
Rys. 9.54. Stan naładowania zasobnika energii ES_528 (profil B)



Rys. 9.55. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_529 (profil B)



Rys. 9.56. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_529 (profil B)



Rys. 9.57. Stan naładowania zasobnika energii ES_529 (profil B)

W tabeli 9.5 przedstawiono zestawienie udziału poszczególnych czynników w sumarycznych kosztach, które podlegają optymalizacji. Porównane zostały koszty poszczególnych czynników dla przypadku, gdy nie ma zasobników energii w sieci oraz koszty po wyborze optymalnej lokalizacji zasobników energii w sieci i zastosowania odpowiedniej regulacji.

Tabela 9.5. „Dobowy" koszt pracy sieci "bez zasobników energii" oraz "z zasobnikami energii" dla profilu A i profilu B

		Profil A		Profil B	
		BEZ ZE	Z ZE	BEZ ZE	Z ZE
p_1	Koszt niedotrzymania odpowiedniego napięcia w sieci	114,57 PLN	0,31 PLN	290,34 PLN	20,45 PLN
P_2	Koszt zasobników energii Dla t_p = 10 (lat)·365 dni = 3650	0 PLN	59,25 PLN	0 PLN	115,96 PLN
P_3	Koszt związany ze stratami mocy w sieci	35,32 PLN	31,89 PLN	41,32 PLN	34,34 PLN
P_4	Koszt związany z przeciążeniem elementów przesyłowych	0 PLN	0 PLN	0 PLN	0 PLN
	RAZEM	149,89 PLN	91,45 PLN	331,66 PLN	170,75 PLN
	OSZCZĘDNOŚCI [PLN / DZIEŃ]	58,44 PLN		160,91 PLN	

Z analizy wyników przedstawionych w tab. 9.5 wynika, że w obu przypadkach czynnikiem kluczowym (dla przyjętych w symulacji założeń) – generującym najwięcej kosztów, jest niedotrzymanie wymaganej wartości napięcia. Poprawę poziomu napięcia, a tym samym redukcję kosztów można osiągnąć poprzez instalację zasobników energii w sieci. Warto zwrócić uwagę na fakt, że im większe są koszty

związane z niedotrzymaniem wymaganego poziomu napięcia, tym bardziej opłaca się instalować zasobniki energii w sieci.

Przy lokalizacji zasobników energii szczególną uwagę powinno się zwrócić na profil obciążenia sieci. Dla analizowanego profilu A i B obciążenia okazuje się, że optymalne lokalizacje zasobników energii (tab. 9.1 i tab. 9.3) w sieci są różne oraz różne są także parametry regulatorów zasobników energii (tab. 9.2 i tab. 9.4). Zmiana parametrów regulatorów w zależności od przyjętego profilu obciążenia nie jest kosztowna. W związku z tym, parametry regulatorów powinny być każdorazowo odpowiednio ustawiane, w zależności od przewidywanego profilu obciążenia. Zabieg taki pozwoli na bardziej efektywne wykorzystanie zasobników energii. Z kolei przy wyborze lokalizacji zasobników energii powinno się przeanalizować kilka profili obciążenia i dobrać jedną odpowiednią lokalizację. Przykładowo przy wyborze lokalizacji dla zasobników energii współpracujących ze źródłami fotowoltaicznymi należało by uwzględnić co najmniej profil obciążenia w dni słoneczne robocze oraz profil obciążenia w dni słoneczne weekendowe.

10. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy wykazano, że zastosowanie elektrochemicznych zasobników energii wpływa na poprawę jakości energii elektrycznej oraz na poprawę pracy sieci dystrybucyjnej. Opracowany został algorytm wyboru lokalizacji i doboru parametrów zasobników energii, regulator zasobnika energii oraz algorytm doboru parametrów regulatora zasobnika energii, dla przypadku sieci symetrycznych. Wykazano, że wybór lokalizacji zasobników energii oraz dobór parametrów regulatorów zasobników energii pozwalający na optymalne pobieranie/dostarczanie przez nie mocy czynnej i biernej wpływa na efektywność ich wykorzystania, a także optymalizuje pracę sieci pod względem określonych kryteriów. W związku z tym, zostały osiągnięte założone cele rozprawy i tym samym udowodniono tezę zawartą we wstępie.

W wyniku przeprowadzonych badań zdefiniowano funkcję celu mającą ograniczyć sumaryczne koszty pracy sieci na które składały się: koszty związane z niedotrzymaniem odpowiedniego poziomu napięcia w sieci, koszty związane z instalacją zasobników energii, koszty strat energii w sieci na elementach przesyłowych oraz koszty związane z przeciążeniem elementów przesyłowych. Rozwiązanie problemu optymalizacyjnego doboru odpowiednich parametrów i lokalizacji zasobników energii zrealizowano z użyciem poszukiwawczej metody heurystycznej, tj. algorytmu genetycznego.

Analiza działania algorytmu lokalizacyjnego została przeprowadzona w oparciu o model sieci SN wykonany w programie Power Factory. Omawiany algorytm lokalizacyjny został zaimplementowany w programie Power Factory w wewnętrznym języku programowania (*DPL – ang. DigSILENT Programming Language*). Na bazie dobowej zmienności obciążenia została przeprowadzona analiza poszukiwania najlepszej konfiguracji zasobników energii w sieci w oparciu o wybrane kryterium napięciowe oraz kosztowe. Przeprowadzono analizę dla dwóch sieci dystrybucyjnych o różnym współczynniku *R/X*. Wykazano, że dla sieci o niskim współczynniku *R/X* korzystniej w celu regulacji napięcia jest sterować mocą bierną, a w sieci o wysokim współczynniku *R/X* mocą czynną. Zależność tą potwierdzają także wartości współczynników macierzy czułości napięciowej.

W kolejnym etapie pracy opracowano model regulatora zasobnika energii na bazie logiki rozmytej, który zarządza dostarczaną mocą czynną i bierną zasobnika.

W celu doboru parametrów regulatora wykorzystano samodzielnie opracowany algorytm ewolucyjny. Analiza działania pracy regulatora została przeprowadzona na uproszczonym modelu sieci nn, z quasi-dynamiczną dobową zmiennością obciążenia. W analizowanej sieci występowały problemy napięciowe wynikające z dużego obciążenia sieci oraz generacji mocy przez źródła fotowoltaiczne. Wykazano, że odpowiedni dobór parametrów regulatora pozwala na efektywne jego wykorzystanie w celu poprawy poziomu napięcia w sieci.

Przeprowadzono także analizę dla przykładowej sieci nn, w której zamodelowano quasi-dynamiczną dobową zmienność mocy odbiorów z uwzględnieniem generacji mocy przez źródła fotowoltaiczne. W celu eliminacji problemów napięciowych w sieci, zainstalowano w niej zasobniki energii. W celu doboru parametrów zasobników energii i ich umiejscowienia w sieci wykorzystano autorski algorytm lokalizacyjny. Sterowanie działaniem zasobników energii zostało zrealizowane przy użyciu autorskiego regulatora zasobnika energii. Dobór parametrów regulatorów zasobników energii zrealizowano za pomocą algorytmu ewolucyjnego. Wykazano, że dzięki instalacji zasobników energii w badanej sieci można poprawić profil napięcia w węzłach, odciążyć elementy przesyłowe oraz ograniczyć straty. W wyniku poprawy profilu napięcia uzyskano możliwość wprowadzenia do sieci odpowiednio dużej mocy przez źródła fotowoltaiczne.

Powyższa analiza pracy sieci została przeprowadzona dla dobowej zmienności obciążenia. W celu prawidłowego doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii w sieci wymagane byłoby uwzględnienia w analizie co najmniej kilku charakterystycznych profilów obciążenia sieci (który uwzględniałby m. in. stan nasłonecznienia, zmienność profilów obciążenia w zależności od dnia tygodnia oraz pory roku). Istotne jest także, aby dla każdego profilu obciążenia odpowiednio zdefiniować nastawy regulatorów zasobników energii, co optymalizuje ich wykorzystanie. Propozycją dalszych badań jest przystosowanie algorytmu lokalizacyjnego oraz rozszerzenie możliwości sterowania zasobnikiem energii w kontekście współpracy z siecią niesymetryczną.

BIBLIOGRAFIA:

[1] R. Pawelek, R. Mienski, and I. Wasiak: “Energy storage application in low-voltage microgrids for energy management and power quality improvement”, *Gener. Transm. Distrib. IET*, vol. 8, no. 3, pp. 463–472, 2014.

[2] T. Capuder, P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, D. Škrlec, and M. Zidar: “Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 645–652, 2016.

[3] A. Dzionk and S. Szultka: “Metody doboru miejsc zainstalowania zasobników energii w sieciach elektroenergetycznych niskiego napięcia”, *Autom. Elektr. Zaklócenia*, vol. 7, pp. 16–21, 2016.

[4] R. Małkowski and, A. Szultka: “Selection of optimal location and rated power of capacitor banks in distribution network using genetic algorithm”, in *Electric Power Engineering (EPE), 2017 18th International Scientific Conference on*, 2017, pp. 1–6.

[5] V. Efthimiou, I. Hadjipaschalis, and A. Poullikkas: “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, 2009.

[6] A. A. Akhil *et al.*, *DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA*. Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, 2013.

[7] J. Paska: "Rozproszone źródła energii", Warszawa: Oficyna Wydawnicza politechniki Warszawskiej, 2017.

[8] G. Fuchs, M. Leuthold, B. Lunz, and D. U. Sauer: “Technology overview on electricity storage”, *ISEA Aachen Juni*, 2012.

[9] B. Ceran, R. Szczerbowski: “Możliwości i perspektywy magazynowania energii w generacji rozproszonej,” *Logistyka*, no. 4, pp. 4953–4960, 2014.

[10] M.-C. Alvarez-Herault, R. Caire, V. Debusschere, and, A. Hadj-said: “Technical and economic impact on the DG insertion rate of storage system facilities in LV network planning”, in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[11] M. Dicorato, G. Forte, N . Forte, and M. Trovato: “Performance of hybrid energy storage system within wind power hourly operation plan”, in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[12] F. Baalbergen, P. Bauer, and J. A. Ferreira, “Energy storage and power management for typical 4Q-load”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1485–1498, 2009.

[13] M. Bishop, C. Hao, D. G. Oikarinen, and X. Xu: “Application and modeling of battery energy storage in power systems”, *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 3, pp. 82–90, 2016.

[14] M. Zygmanowski, "Analiza porównawcza właściwości wybranych wielopoziomowych przekształtników energoelektronicznych przeznaczonych do układów kondycjonowania energii elektrycznej". Rozprawa Doktorska, Gliwice, 2009.

[15] O.-M. Midtgard and I. Ranaweera: “Centralized control of energy storages for voltage support in low-voltage distribution grids”, in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on*, 2016, pp. 1–6.

[16] K. A. Joshi and N. M. Pindoriya, “Day-ahead dispatch of Battery Energy Storage System for peak load shaving and load leveling in low voltage unbalance distribution networks”, in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1–5.

[17] M. F. Abdullah, S. A. Halim, T. C. Kwang, M. F. Romlie, and M . Uddin: “A review on peak load shaving strategies”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 3323–3332, 2018.

[18] J. van Dun, R. J. W. de Groot, J. Morren, and J. G. Slootweg, “Control of a battery energy storage system connected to a low voltage grid”, in *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*, 2015, pp. 1–6.

[19] J. C. Balda, A. K. Barnes, A. Escobar-Mejia, and S. O. Geurin, “Placement of energy storage coordinated with smart PV inverters”, in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*, 2012, pp. 1–7.

[20] R. Cherkaoui, M. Nick, and M. Paolone: “Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 72, pp. 33–39, 2015.

[21] D. Chakraborty, S. Deeba, R. Sharma, T. Saha, and A. Thomas: “Evaluation of Technical and Financial Benefits of Battery-Based Energy Storage Systems in Distribution Networks”, *IET Renew. Power Gener.*, 2016.

[22] S. Bose, K. M. Chandy, D. F. Gayme, and U. Topcu: “Optimal placement of energy storage in the grid”, in *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2012, pp. 5605–5612.

[23] J. C. Balda and A. K. Barnes: “Placement of distributed energy storage via multidimensional scaling and clustering”, in *Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 69–74.

[24] J. Niebrzydowski: "Sieci elektroenergetyczne", Białystok: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 1997.

[25] M. S. S. Abad, D. Azuatalam, A. Chapman, Y. Ma, and G. Verbic: “Impacts of community and distributed energy storage systems on unbalanced low voltage networks”, in *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2017, pp. 1–6.

[26] A. Dzionk and R. Małkowski: “Activity coordination of capacitor banks and power transformer controllers in order to reduce power losses in the MV grid”, in *Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2016 10th International Conference on*, 2016, pp. 27–32.

[27] Praca zbiorowa pod redakcją Szczęsnego Kujszczyka, *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*, vol. 1. Warszawa: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, 2004.

[28] S. Anand, S. R. Choudhury, and A. Gupta: “Simulation of low voltage ride through scheme for inverters connected to distribution system with high R/X ratio”, in *Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 2016 10th International Conference on*, 2016, pp. 202–207.

[29] A. Kulmala, S. Repo, and J. Tuominen: “Comparison of the low voltage distribution network voltage control schemes”, in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, pp. 1–6.

[30] “Wytyczne programowania rozwoju sieci rozdzielczych.” Instytut Energetyki, Zakład Sieci Rozdzielczych, Warszawa- Katowice, 1986.

[31] M. J. E. Alam, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto: “Distributed energy storage for mitigation of voltage-rise impact caused by rooftop solar PV”, in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–8.

[32] B. Blazic, T. Bulo, Y. T. Fawzy, and F. Marra: “Energy storage options for voltage support in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic”, in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, 2012, pp. 1–7.

[33] A. Giannitrapani, S. Paoletti, A. Vicino, and D. Zarrilli: “Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks”, *IEEE Trans. Smart Grid*.

[34] P. Chu, R. Gadh, H. Nazaripouya, H. R. Pota, and Y. Wang: “Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation”, in *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1–5.

[35] S. B. Karanki, B. Venkatesh, B. N. Singh, and D. Xu: “Optimal location of battery energy storage systems in power distribution network for integrating renewable energy sources”, in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*, 2013, pp. 4553–4558.

[36] M. S. S. Abad, M. K. Gharigh, A. Safdarian, and J. N. Zaeem: “Optimal sizing of distributed energy storage with consideration of demand response in distribution systems”, in *Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on*, 2016, pp. 1181–1186.

[37] A. Kiprakis, D. Okekunle, and O. Unigwe: “Economical distributed voltage control in low-voltage grids with high penetration of photovoltaic”, *CIRED-Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 1722–1725, 2017.

[38] S.-I. Chen, C.-W. Lin, and Y.-J. Liu: “Analysis of load electricity consumption on a low-voltage distribution system with community energy storages”, in *Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), 2017 IEEE 3rd International*, 2017, pp. 2048–2052.

[39] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graditi, F. Lamberti, and A. Piccolo: “Impact analysis of distributed PV and energy storage systems in unbalanced LV networks”, in *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*, 2015, pp. 1–6.

[40] D. Liu, Y. Nanhua, Z. Qing, Z. Xiaoping, and Y. You: “Optimal siting & sizing of battery energy storage system in active distribution network”, in *Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES*, 2013, pp. 1–5.

[41] C. Y. David, Q. Fu, H. Lan, S. Wen, and L. Zhang: “Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 644–652, 2015.

[42] Praca zbiorowa pod redakcją Jerzego Kulczyckiego, "Straty Energii Elektrycznej w Sieciach Dystrybucyjnych". Poznań: Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, 2009.

[43] “ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z dnia 29 maja 2007 r.).” .

[44] M. Arnold, W. Friede, and J. Myrzik: “Comparison of current and future voltage regulation measures on German low voltage grids”, in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[45] https://www.ensto.com/pl/produkty/jako-energii/ensto-phase-balancer/pb50a-3p-200adv – data dostępu: 13.11.2017 r.

[46] Z. M. Haider, S. U. Khan, C.-H. Kim, S.-J. Lee, K. K. Mehmood, and M. K. Rafique: “Optimal sizing and allocation of battery energy storage systems with wind and solar power DGs in a distribution network for voltage regulation considering the lifespan of batteries”, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 10, pp. 1305–1315, 2017.

[47] L. Magni, D. M. Raimondo, and M. Torchio: “A mixed integer SDP approach for the optimal placement of energy storage devices in power grids with renewable penetration”, in *American Control Conference (ACC), 2015*, 2015, pp. 3892–3897.

[48] W. Deis, D. Gamrad, J. Myrzik, and F. Wandelt: “Comparison of flywheels and batteries in combination with industrial plants for the provision of Primary Control Reserve”, in *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*, 2015, pp. 1–6.

[49] Z. Y. Dong, F. Luo, K. Meng, K. P. Wong, Y. Zhang, and Y. Zheng: “Optimal allocation of battery energy storage systems in distribution networks with high wind power penetration”, *IET Renew. Power Gener.*, 2016.

[50] A. Berizzi, C. Bovo, D. D. Le, N. T. Nguyen, and G. G. Moshi: “Sensitivity analysis on locations of Energy Storage in power systems with wind integration”, in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*, 2015, pp. 1115–1119.

[51] J. A. Domínguez-Navarro and H. Bludszuweit: “A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1651–1658, 2011.

[52] R. A. Jabr, S. Karaki, and J. A. Korbane, “Robust multi-period OPF with storage and renewables”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2790–2799, 2015.

[53] A. Arabali, M. Etezadi-Amoli, M. S. Fadali, and M. Ghofrani: “A framework for optimal placement of energy storage units within a power system with high wind penetration”, *Sustain. Energy IEEE Trans. On*, vol. 4, no. 2, pp. 434–442, 2013.

[54] P. Järventausta, T. Hakala, J. Markkula, S. Repo, and O. Vilppo: "Cost–benefit analysis for using the Li-ion batteries in low-voltage network for decreasing the outage time experienced by customers", *CIRED-Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 2201–2204, 2017.

[55] P. Bauer, G. R. C. Mouli, E. Raaijen, and J. Sridhar: "Analysis of load shedding strategies for battery management in PV-based rural off-grids", in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[56] S. Bose, B. Hassibi, and C. Thrampoulidis: "Optimal placement of distributed energy storage in power networks", *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 61, no. 2, pp. 416–429, 2016.

[57] Q. Guo, S. Huang, H. Sun, Q. Wu, Y. Xue, and H. Zhao: "Optimal siting and sizing of Energy Storage System for power systems with large-scale wind power integration", in *PowerTech, 2015 IEEE Eindhoven*, 2015, pp. 1–6.

[58] A. Giannitrapani, S. Paoletti, A. Vicino, and D. Zarrilli: "Algorithms for placement and sizing of energy storage systems in low voltage networks", in *2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2015, pp. 3945–3950.

[59] S. Grillo, A. Pievatolo, and E. Tironi: "Optimal Storage Scheduling Using Markov Decision Processes."

[60] Y. Dvorkin, D. S. Kirschen, H. Pandžić, Y. Wang, and T. Qiu: "Near-optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission network", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2288–2300, 2015.

[61] D. Swift-Hook, "Wind energy really is the last to be stored and solar energy cannot be stored economically", *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 971–976, 2013.

[62] S. Bacha, Y. Baghzouz, Y. Riffonneau, and C. Venu: "Battery storage system sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems", in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, pp. 1–5.

[63] J. K. Kaldellis, E. Kondili, and D. Zafirakis: "Optimum sizing of photovoltaic-energy storage systems for autonomous small islands", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 24–36, 2010.

[64] P. Du, M. C. Kintner-Meyer, H. F. Illian, C. Jin, and Y. V. Makarov: "Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 34–40, 2012.

[65] E. Larsen, F. Marra, C. Traeholt, J. Østergaard, and G. Yang: "A decentralized storage strategy for residential feeders with photovoltaics", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 974–981, 2014.

[66] D. F. Gayme and S. Wogrin: "Optimizing storage siting, sizing, and technology portfolios in transmission-constrained networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3304–3313, 2015.

[67] Y. Dvorkin, R. Fernández-Blanco, D. S. Kirschen, Y. Wang, and B. Xu: "Optimal energy storage siting and sizing: A WECC case study", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 733–743, 2017.

[68] T. Capuder, P. S. Georgilakis, D. Škrlec, and M. Zidar: "Convex AC optimal power flow method for definition of size and location of battery storage systems in the distribution grid", in *Proc. of the Ninth Conf. on Sustainable Development of Energy, Water and Environment System–SDEWES'(University of Zagreb Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2014)*, 2014, pp. 1–23.

[69] R. Cherkaoui, M. Nick, and M. Paolone: "Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2300–2310, 2014.

[70] N. Chen and T.-Y. Lee: "Determination of optimal contract capacities and optimal sizes of battery energy storage systems for time-of-use rates industrial customers", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 10, no. 3, pp. 562–568, 1995.

[71] H. Oh, “Optimal planning to include storage devices in power systems”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1118–1128, 2011.
[72] G. Celli, M. Loddo, S. Mocci, and F. Pilo: “Optimal integration of energy storage in distribution networks”, in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, pp. 1–7.
[73] J. Gonçalves, A. G. Martins, and L. Neves: “Multiobjective Methodology for Assessing the Location of Distributed Electric Energy Storage”, in *European Conference on the Applications of Evolutionary Computation*, 2015, pp. 227–238.
[74] M. A. Baharudin, J. J. Jamian, H. Mokhlis, and M. W. Mustafa: “Simulation study on optimal placement and sizing of Battery Switching Station units using Artificial Bee Colony algorithm”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 592–601, 2014.
[75] S. Backhaus, M. Chertkov, and K. Dvijotham,“Operations-based planning for placement and sizing of energy storage in a grid with a high penetration of renewables”, *ArXiv Prepr. ArXiv11071382*, 2011.
[76] R. Azizipanah-Abarghooee and B. Bahmani-Firouzi: “Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 56, pp. 42–54, 2014.
[77] S. M. Amin, J. M. Gantz, and A. M. Giacomoni: “Optimal mix and placement of energy storage systems in power distribution networks for reduced outage costs”, in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 2447–2453.
[78] A. Berizzi, C. Bovo, D. D. Le, G. G. Moshi, and N. T. Nguyen: “Sensitivity analysis on locations of energy storage in power systems with wind integration”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 5185–5193, 2016.
[79] D. E. Goldberg: "Klasyka Informatyki - Algorytmy Genetyczne i ich zastosowanie", Wydanie Trzecie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2003.
[80] Z. Michalewicz: "Algorytmy genetyczne + struktury danych programy ewolucyjne", Wydanie Trzecie. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1996.
[81] http://www.rollsbattery.com/ - data dostępu: 15.10.2016 r.
[82] “Information of the President of the Energy Regulatory Office No. 45/2016 the average selling price of electricity on the market competitive in the second quarter of 2016 years”.
[83] “BIULETYN BRANŻOWY URE - Energia elektryczna,” no. 187 (2213), 2016 r.
[84] E. Kuliś, J. Wilczarska, and B. Żółtowski: “Techniki informatyczne w procesie optymalizacji rozpoznawania stanu pojazdów”, *Logistyka*, no. 4, pp. 4354–4364, 2015.
[85] W. Tarnowski: "Optymalizacja i polioptymalizacja w technice". Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2011.
[86] E. Zitzler: "Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications", vol. 63. Citeseer, 1999.
[87] P. Bastard, F. A. Chacra, R. Clavreul, and G. Fleury: “Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 684–691, 2005.
[88] www.fornius.com - data dostępu: 10.03.2019 r.
[89] E. Musiał: “Obciążalność cieplna oraz zabezpieczenia nadprądowe przewodów i kabli,” *INPE Inf. O Normach Przep. Elektr. Miesięcznik*, no. 107, pp. 3–41, 2008.
[90] E. Musiał, materiały wykładowe: “Dobór bezpieczników do zabezpieczania przewodów i kabli”.
[91] W. Chang, J. H. Chen, C. S. Chung, G. L. Y. Hsu, K. K. Jen, and Y. J. Liu: “Modeling and simulations of the low-voltage distribution system integrated with energy storage systems in Kinmen Island”, in *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*, 2015, pp. 1–5.
[92] J. W. Białek and Z. Lubośny: "Supervisory Control of a Wind Farm", IEEE Transactions on Power Systems, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 985-994.

[93] T. K. Brekken, D. A. Halamay, H. M. Hapke, A. Von Jouanne, Z. Z. Yen, and A. Yokochi: "Optimal energy storage sizing and control for wind power applications," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 69–77, 2011.

[94] M. Brenna *et al.*, "Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 877–885, 2013.

[95] R. Andoulsi, A. Chaouachi, R. M. Kamel, and K. Nagasaka: "Multiobjective intelligent energy management for a microgrid", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1688–1699, 2013.

[96] H. B. Ahmed, P. Haessig, and B. Multon: "Energy storage control with aging limitation", in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[97] G. Andersson, J. L. Mathieu, and O. Mégel: "Stochastic Dual Dynamic Programming to schedule energy storage units providing multiple services", in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[98] A. Beguin, R. Cherkaoui, and A. Oudalov: "Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application", in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp. 621–625.

[99] J. Chen, L. Guo, C. Wang, B. Zhao, and X. Zhang: "Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 934–943, 2013.

[100] M. P. Behera, G. H. Beng, and P. K. Ray: "Single-phase grid-tied photovoltaic inverter to control active and reactive power with battery energy storage device", in *Region 10 Conference (TENCON), 2016 IEEE*, 2016, pp. 1900–1904.

[101] L. Rouco and L. Sigrist: "Active and reactive power control of battery energy storage systems in weak grids", in *Bulk Power System Dynamics and Control-IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP), 2013 IREP Symposium*, 2013, pp. 1–7.

[102] Z. Y. Dong, M. N. Kabir, G. Ledwich, Y. Mishra, and K. P. Wong: "Coordinated control of grid-connected photovoltaic reactive power and battery energy storage systems to improve the voltage profile of a residential distribution feeder", *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, no. 2, pp. 967–977, 2014.

[103] B. Hartmann and S. Lipták: "Development of steady state and dynamic energy storage models for digsilent powerfactory", in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 2015, pp. 1–6.

[104] A. Bocca, A. Macii, E. Macii, M. Poncino, D. Shin, and A. Sassone: "An equation-based battery cycle life model for various battery chemistries", in *2015 IFIP/IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC)*, 2015, pp. 57–62.

[105] A. Łachwa, "Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji", vol. 1. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001.

SIPS RYSUNKÓW

Rys. 4.1. Redukcja szczytów obciążenia (a) i wyrównywanie obciążeń (b) w sieci... 22
Rys. 4.2. Wyrównywanie obciążenia sieci elektroenergetycznej przy zastosowaniu bateryjnego zasobnika energii [18]... 23
Rys. 4.3. Schemat zastępczy typu π linii III rodzaju... 25
Rys. 4.4. Schemat zastępczy typu Γ transformatora dwuuzwojeniowego... 26
Rys. 4.5. Schemat zastępczy fragmentu sieci dystrybucyjnej od punktu A do punktu B... 28
Rys. 4.6. Wykres fazorowy napięć w punkcie A i B [27]... 28
Rys. 4.7. Wpływ współczynnika R/X na wrażliwość napięciową ($\partial U_i / \partial P_i$) oraz ($\partial U_i / \partial Q_i$) [28]... 29
Rys. 4.8. Efekt poprawy poziomu napięć w węźle w wyniku zastosowania zasobnika energii [39]... 31
Rys. 4.9. Interpretacja graficzna idei składowych symetrycznych... 33
Rys. 4.10. Schemat analizowanego układu z zasobnikiem energii [1]... 36
Rys. 4.11. Przebiegi prądów w poszczególnych fazach (a, b, i c) oraz w przewodzie neutralnym, i_t – sumaryczny prąd odbioru oraz źródła fotowoltaicznego ($i_t = i_{t1} + i_{t2}$), i_s – prąd zasobnika energii, i_q – wypadkowy prąd sieci zasilającej [1]... 36
Rys. 6.1. Przykładowa struktura chromosomu osobnika... 49
Rys. 6.2. Schemat blokowy algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci dystrybucyjnej... 51
Rys. 6.3. Schemat analizowanej sieci SN... 52
Rys. 6.4. Graficzna interpretacja kosztu związanego z niedotrzymaniem napięcia [4]... 55
Rys. 6.5. Minimalny i maksymalny poziom napięcia w węzłach analizowanej sieci... 55
Rys. 6.6. Dobowa zmienność napięcia w wybranych węzłach sieci i moc bierna dostarczana lub pobierana przez zasobnik energii zlokalizowany w danym węźle, a) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 4a, b) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 9a, c) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 11a, d) napięcie i moc bierna zasobnika energii w węźle 13a... 56
Rys. 6.7. Macierz czułości napięciowej a) $\partial U/\mathrm{d}P$ dla sieci o R/X_1, b) $\partial U/\mathrm{d}Q$ dla sieci o R/X_1, c) $\partial U/\mathrm{d}P$ dla sieci o R/X_2, d) $\partial U/\mathrm{d}Q$ dla sieci o R/X_2... 58
Rys. 6.8. Przypisane mocy znamionowej zasobników energii przez algorytm lokalizacyjny dla dwóch rodzajów regulacji $P_{crit.}$ i $Q_{crit.}$, dla dwóch sieci różniących się współczynnikiem R/X... 59
Rys. 6.9. Zmienność napięcia w węźle nr 1a dla sieci nr 1 i 2... 60
Rys. 6.10. Zmienność napięcia w węźle nr 4a dla sieci nr 1 i 2... 60
Rys. 6.11. Zmienność napięcia w węźle nr 6a dla sieci nr 1 i 2... 61
Rys. 6.12. Zmienność napięcia w węźle nr 9a dla sieci nr 1 i 2... 61
Rys. 7.1. Zbiór Pareto dla zadania minimalizacji [84]... 63
Rys. 8.1. Schemat układu regulacji zasobnika energii... 71
Rys. 8.2. Sterownik rozmyty i sterowane nim urządzenie [105]... 74
Rys. 8.3. Schemat regulatora rozmytego dla zasobnika energii... 76

Rys. 8.4. Funkcja przynależności dla napięcia "zbyt niskiego" w węźle *i* 77
Rys. 8.5. Funkcja przynależności dla napięcia "zbyt wysokiego" w węźle *i* 77
Rys. 8.6. Funkcja przynależności dla stanu zasobnika "rozładowany" 78
Rys. 8.7. Funkcja przynależności dla stanu zasobnika "naładowany" 78
Rys. 8.8. Funkcja przynależności dla stanu linii "obciążona" 79
Rys. 8.9. Funkcja przynależności dla stanu linii "niedociążona" 79
Rys. 8.10. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "dostarczaj moc czynną do sieci" 79
Rys. 8.11. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc czynną z sieci" 80
Rys. 8.12. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "dostarczaj moc bierną do sieci" 80
Rys. 8.13. Funkcja przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc bierną z sieci" 80
Rys. 8.14. Przykład funkcji przynależności dla mocy czynnej dla stanu "pobieraj moc bierną z sieci" 81
Rys. 8.15. Przykład procesu wnioskowania oraz określania wartości funkcji przynależności μ_P i μ_Q zasobnika energii 83
Rys. 8.16. Proces wyostrzania wartości rozmytych 84
Rys. 8.17. Struktura genotypu pojedynczego osobnika w algorytmie ewolucyjnym 86
Rys. 8.18. Schemat analizowanej sieci nn 87
Rys. 8.19. Zmienność napięcia w węźle A_nn 90
Rys. 8.20. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_A_nn 90
Rys. 8.21. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_A_nn 90
Rys. 8.22. Stan naładowania zasobnika ES_A_nn 91
Rys. 8.23. Zmienność napięcia w węźle B_nn – w którym występuje generacja mocy 92
Rys. 8.24. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_B_nn 92
Rys. 8.25. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_A_nn 92
Rys. 8.26. Stan naładowania zasobnika ES_A_nn 93
Rys. 9.1. Schemat analizowanej sieci nn 94
Rys. 9.2. Schemat blokowy doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii oraz parametrów ich regulatorów, gdzie n_{max} – ilość osobników populacji dla algorytmu ewolucyjnego wykorzystanego do doboru parametrów regulatorów zasobników energii, g_{max} – liczba generacji dla algorytmu ewolucyjnego wykorzystanego do doboru parametrów regulatorów zasobników energii, k_{max} – ilość osobników populacji dla algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci, d_{max} – liczba generacji dla algorytmu genetycznego wykorzystanego do wyboru lokalizacji zasobników energii w sieci. 97
Rys. 9.3. Zmienność napięcia w węźle 515 (profil A) 99
Rys. 9.4. Zmienność napięcia w węźle 520 (profil A) 99
Rys. 9.5. Zmienność napięcia w węźle 522 (profil A) 100
Rys. 9.6. Zmienność napięcia w węźle 526 (profil A) 100
Rys. 9.7. Zmienność obciążenia linii 515-520 (profil A) 101

Rys. 9.8. Zmienność obciążenia linii 520-522 (profil A) 101
Rys. 9.9. Zmienność odciążenia linii 522-526 (profil A) 102
Rys. 9.10. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_522 (profil A) 102
Rys. 9.11. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_522 (profil A) 103
Rys. 9.12. Stan naładowania zasobnika energii ES_522 (profil A) 103
Rys. 9.13. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_526 (profil A) 103
Rys. 9.14. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_526 (profil A) 104
Rys. 9.15. Stan naładowania zasobnika energii ES_526 (profil A) 104
Rys. 9.16. Zmienność napięcia w węźle 528 (profil A) 104
Rys. 9.17. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_528 (profil A) 105
Rys. 9.18. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_528 (profil A) 105
Rys. 9.19. Stan naładowania zasobnika energii ES_528 (profil A) 105
Rys. 9.20. Zmienność napięcia w węźle 529 (profil A) 106
Rys. 9.21. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_529 (profil A) 106
Rys. 9.22. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_529 (profil A) 106
Rys. 9.23. Stan naładowania zasobnika energii ES_529 (profil A) 107
Rys. 9.24. Zmienność napięcia w węźle 530 (profil A) 107
Rys. 9.25. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_530 (profil A) 107
Rys. 9.26. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_530 (profil A) 108
Rys. 9.27. Stan naładowania zasobnika energii ES_530 (profil A) 108
Rys. 9.28. Zmienność napięcia w węźle 515 (profil B) 110
Rys. 9.29. Zmienność napięcia w węźle 520 (profil B) 110
Rys. 9.30. Zmienność napięcia w węźle 522 (profil B) 110
Rys. 9.31. Zmienność napięcia w węźle 526 (profil B) 111
Rys. 9.32. Zmienność napięcia w węźle 528 (profil B) 111
Rys. 9.33. Zmienność napięcia w węźle 530 (profil B) 111
Rys. 9.34. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_520 (profil B) 112
Rys. 9.35. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_520 (profil B) 112
Rys. 9.36. Stan naładowania zasobnika energii ES_520 (profil B) 112
Rys. 9.37. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_521 (profil B) 113
Rys. 9.38. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_521 (profil B) 113
Rys. 9.39. Stan naładowania zasobnika energii ES_521 (profil B) 113
Rys. 9.40. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_524 (profil B) 114
Rys. 9.41. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_524 (profil B) 114
Rys. 9.42. Stan naładowania zasobnika energii ES_524 (profil B) 114
Rys. 9.43. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_525 (profil B) 115
Rys. 9.44. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_525 (profil B) 115
Rys. 9.45. Stan naładowania zasobnika energii ES_525 (profil B) 115
Rys. 9.46. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_526 (profil B) 116
Rys. 9.47. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_526 (profil B) 116
Rys. 9.48. Stan naładowania zasobnika energii ES_526 (profil B) 116
Rys. 9.49. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_527 (profil B) 117
Rys. 9.50. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_527 (profil B) 117
Rys. 9.51. Stan naładowania zasobnika energii ES_527 (profil B) 117

Rys. 9.52. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_528 (profil B) 118
Rys. 9.53. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_528 (profil B) 118
Rys. 9.54. Stan naładowania zasobnika energii ES_528 (profil B) 118
Rys. 9.55. Zmienność mocy czynnej zasobnika energii ES_529 (profil B) 119
Rys. 9.56. Zmienność mocy biernej zasobnika energii ES_529 (profil B) 119
Rys. 9.57. Stan naładowania zasobnika energii ES_529 (profil B) 119
Rys. Z .0.1. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 502 profil (A), b) Lo 502 profil (B), c) Lo 503 profil (A), d) Lo 503 profil (B) 138
Rys. Z .0.2. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 507 profil (A), b) Lo 507 profil (B), c) Lo 508 profil (A), d) Lo 508 profil (B) 138
Rys. Z. 0.3. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 510 profil (A), b) Lo 510 profil (B), c) Lo 511 profil (A), d) Lo 511 profil (B) 139
Rys. Z. 0.4. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 512 profil (A), b) Lo 512 profil (B), c) Lo 513 profil (A), d) Lo 513 profil (B) 139
Rys. Z. 0.5. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 516 profil (A), b) Lo 516 profil (B), c) Lo 517 profil (A), d) Lo 517 profil (B) 140
Rys. Z. 0.6. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 518 profil (A), b) Lo 518 profil (B), c) Lo 519 profil (A), d) Lo 519 profil (B) 140
Rys. Z. 0.7. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 521 profil (A), b) Lo 521 profil (B), c) Lo 524 profil (A), d) Lo 524 profil (B) 141
Rys. Z. 0.8. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 525 profil (A), b) Lo 525 profil (B), c) Lo 527 profil (A), d) Lo 527 profil (B) 141
Rys. Z.0.9. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 528 profil (A), b) Lo 528 profil (B), c) Lo 529 profil (A), d) Lo 529 profil (B) 142
Rys. Z. 0.10. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 530 profil (A), b) Lo 530 profil (B) 142
Rys. Z. 0.11. Zmienność napięcia w węźle a) 502 (profil A), b) 502 (profil B), c) 503 (profil A), d) 503 (profil B) 143
Rys. Z. 0.12. Zmienność napięcia w węźle a) 504 (profil A), b) 504 (profil B), c) 505 (profil A), d) 505 (profil B) 143
Rys. Z. 0.13. Zmienność napięcia w węźle a) 506 (profil A), b) 506 (profil B), c) 507 (profil A), d) 507 (profil B) 144
Rys. Z. 0.14. Zmienność napięcia w węźle a) 508 (profil A), b) 508 (profil B), c) 509 (profil A), d) 509 (profil B) 144
Rys. Z. 0.15. Zmienność napięcia w węźle a) 510 (profil A), b) 510 (profil B), c) 511 (profil A), d) 511 (profil B) 145
Rys. Z. 0.16. Zmienność napięcia w węźle a) 512 (profil A), b) 512 (profil B), c) 513 (profil A), d) 513 (profil B) 145
Rys. Z. 0.17. Zmienność napięcia w węźle a) 514 (profil A), b) 514 (profil B), c) 515 (profil A), d) 515 (profil B) 146
Rys. Z. 0.18. Zmienność napięcia w węźle a) 516 (profil A), b) 516 (profil B), c) 517 (profil A), d) 517 (profil B) 146
Rys. Z. 0.19. Zmienność napięcia w węźle a) 518 (profil A), b) 518 (profil B), c) 519 (profil A), d) 519 (profil B) 147

Rys. Z. 0.20. Zmienność napięcia w węźle a) 520 (profil A), b) 520 (profil B), c) 521 (profil A), d) 521 (profil B) 147
Rys. Z. 0.21. Zmienność napięcia w węźle a) 522 (profil A), b) 522 (profil B), c) 524 (profil A), d) 524 (profil B) 148
Rys. Z. 0.22. Zmienność napięcia w węźle a) 525 (profil A), b) 525 (profil B), c) 526 (profil A), d) 526 (profil B) 148
Rys. Z. 0.23. Zmienność napięcia w węźle a) 527 (profil A), b) 527 (profil B), c) 528 (profil A), d) 528 (profil B) 149
Rys. Z. 0.24. Zmienność napięcia w węźle a) 529 (profil A), b) 529 (profil B), c) 530 (profil A), d) 530 (profil B) 149
Rys. Z. 0.25. Zmienność napięcia w węźle a) 531 (profil A), b) 531 (profil B) 150

SIPS TABEL

Tabela 3.1. Przegląd wybranych właściwości zasobników energii [8], [9] 13
Tabela 4.1. Dopuszczalne spadki napięcia w liniach SN i nn według wytycznych zawartych w [30] 30
Tabela 6.1. Przykładowe przyjmowane wartości genów i odpowiadające mi allele [81] 49
Tabela 7.1. Parametry techniczne oraz koszt zasobników energii wykorzystanych w analizie pracy sieci nn [88] 68
Tabela 8.1. Dobrane parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii 89
Tabela 9.1. Wynik doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii dla analizowanej sieci nn (profil obciążenia: A) 98
Tabela 9.2. Parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii (profil obciążenia: A) 99
Tabela 9.3. Wynik doboru lokalizacji i parametrów zasobników energii dla analizowanej sieci nn (profil obciążenia: B) 109
Tabela 9.4. Parametry regulatorów dla poszczególnych zasobników energii (profil obciążenia: B) 109
Tabela 9.5. „Dobowy” koszt pracy sieci "bez zasobników energii" oraz "z zasobnikami energii" dla profilu A i profilu B 120

ZAŁĄCZNIK 1.

Załącznik 1. zawiera informacje dotyczące badanej sieci nn. W tabeli Z.1. i Z.2. zestawiono linie elektroenergetyczne nn. Wartości parametrów transformatora SN/nn zasilającego analizowaną sieć przedstawiono w tabeli Z.3. Rysunki Z.1 ÷ Z.10 przedstawiają przyjęte profile obciążenia poszczególnych odbiorów dla profilu obciążenia A i B. Na rys. Z.11 ÷ Z. 25 zobrazowano zmienność napięcia we wszystkich węzłach w sieci dla przypadku pracy sieci z bez zasobników energii oraz z zasobnikami energii dla profilu obciążenia A i B.

Tabela Z. 1. Zestawienie linii elektroenergetycznych nn wykorzystanych w analizie

Nazwa linii	Typ	Długość [m]
L 500-504	YAKY 4x150	20
L 504-502	AsXSn 4x25	36
L 504-503	AsXSn 4x16	6
L 504-505	YAKY 4x150	200
L 505-506	AsXSn 4x70	20
L 506-507	AsXSn 4x16	7
L 506-508	YAKY 4x35	21
L 506-509	AsXSn 4x70	31
L 509-510	AsXSn 4x16	12
L 509-511	AsXSn 4x70	20
L 511-512	AsXSn 4x16	11
L 509-513	AsXSn 4x16	31
L 509-514	AsXSn 4x16	14
L 506-515	AsXSn 4x70	32
L 515-516	YAKY 4x35	20
L 515-517	AsXSn 4x16	14
L 515-518	YAKY 4x35	8
L 518-519	AsXSn 4x16	14
L 515-520	4 x AL70	390
L 520-521	YAKY 4x35	17
L 520-522	4 x AL70	120
L 522-524	AsXSn 4x16	5
L 522-525	YAKY 4x25	17
L 522-526	4 x AL70	200
L 526-527	YAKY 4x25	11
L 526-528	AsXSn 4x16	26
L 526-529	AsXSn 4x16	18

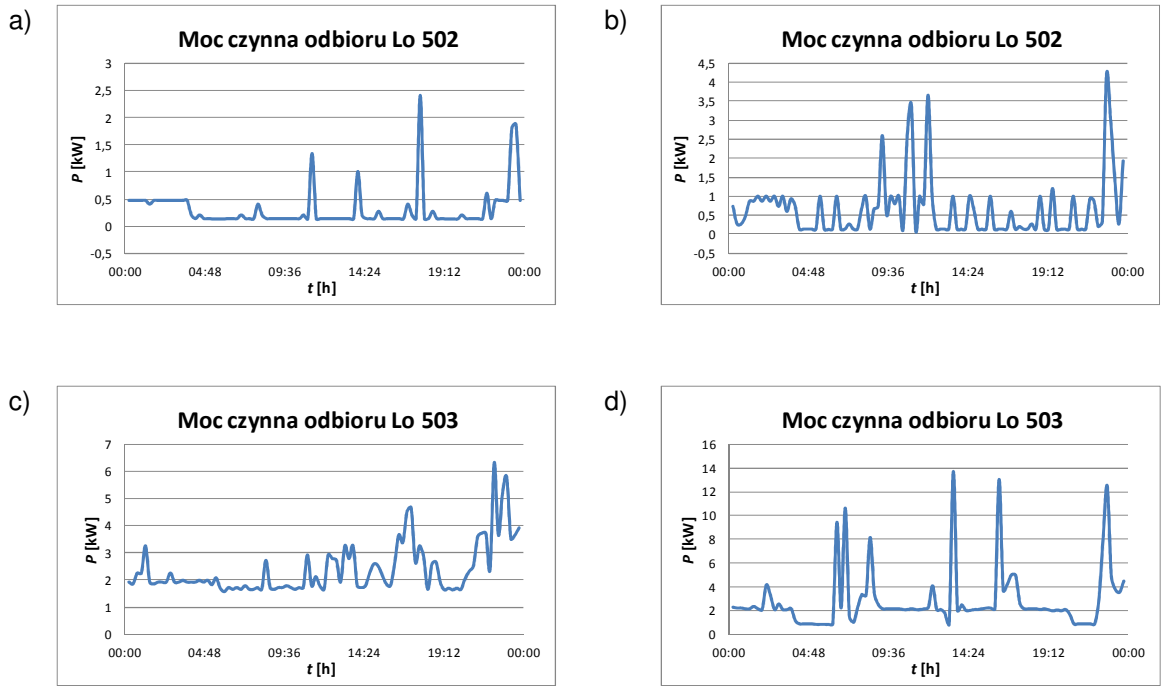
L 526-530	4 x AL16	16
L 526-531	4 x AL70	31

Tabela Z. 2. Parametry linii elektroenergetycznych wykorzystanych w analizie

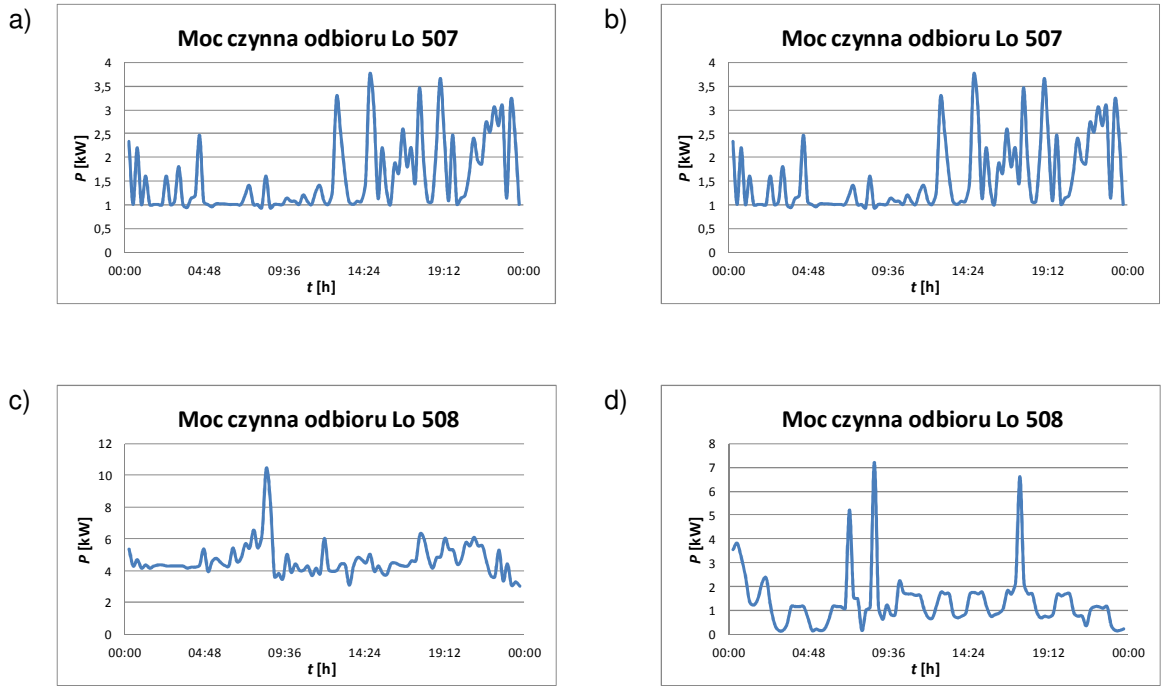
Typ	**Rezystancja jednostkowa składowej zgodnej [Ω/km]**	**Reaktancja jednostkowa składowej zgodnej [Ω/km]**	**Obciążalność prądowa [A]**
YAKY 4x150	0,206	0,080	270
AsXSn 4x70	0,433	0,083	213
4 x AL70	0,417	0,320	285
YAKY 4x35	0,868	0,080	118
YAKY 4x25	1,200	0,080	78
AsXSn 4x25	1,200	0,090	112
AsXSn 4x16	1,910	0,091	93
4 x AL16	1,822	0,360	110

Tabela Z. 3. Zestawienie parametrów transformatora zasilającego analizowaną sieć nn

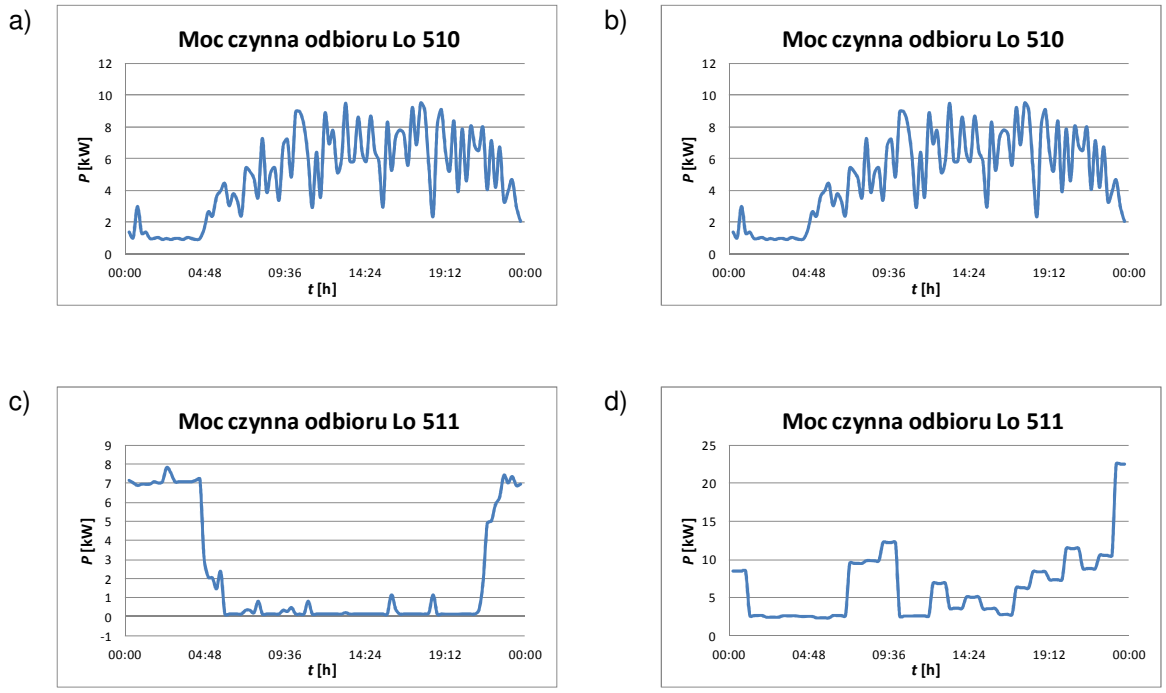
Moc znamionowa	S_n	1 MVA
Napięcie po stronie pierwotnej	U_g	15,75 kV
Napięcie po stronie wtórnej	U_d	0,42 kV
Grupa połączeń	Grupa połączeń	Dyn5
Napięcie zwarcia	$u_{\%}$	6 %
Starty obciążeniowe	ΔP_{Cu}	10,5 kW
Prąd biegu jałowego	$I_{0\%}$	1,2 %
Starty jałowe	ΔP_{Fe}	1,1 kW
Liczba zaczepów	N	5
Zmiana napięcia na zaczep	ΔN	2,5 %



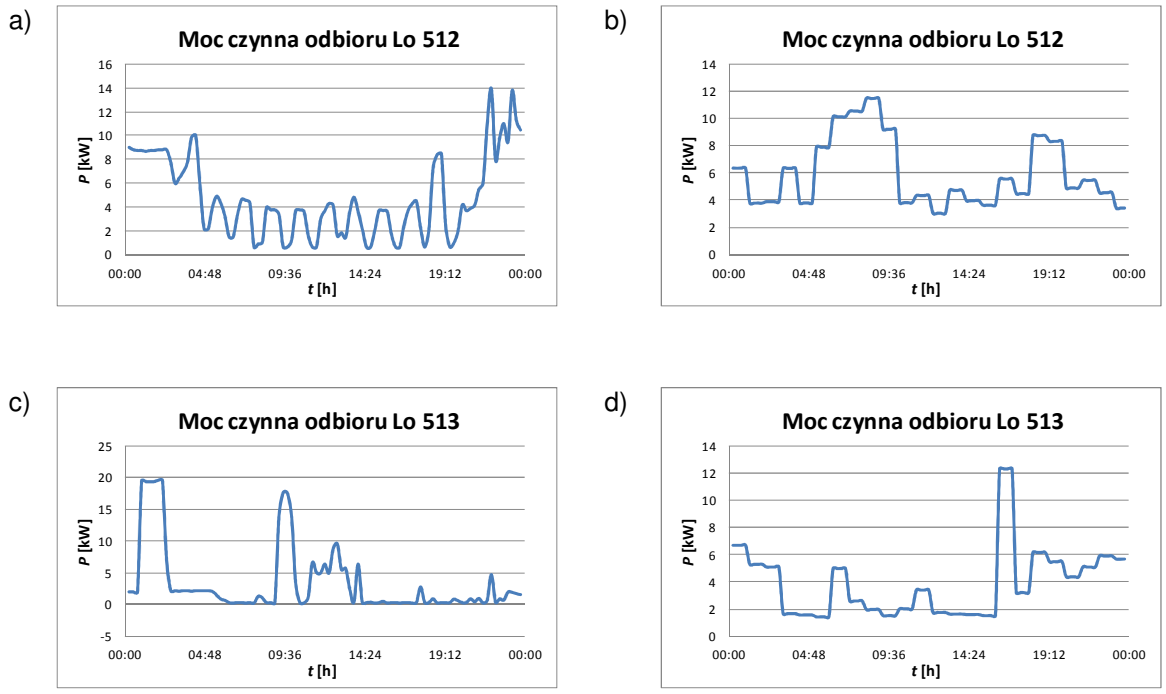
Rys. Z .0.1. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 502 profil (A), b) Lo 502 profil (B), c) Lo 503 profil (A), d) Lo 503 profil (B)



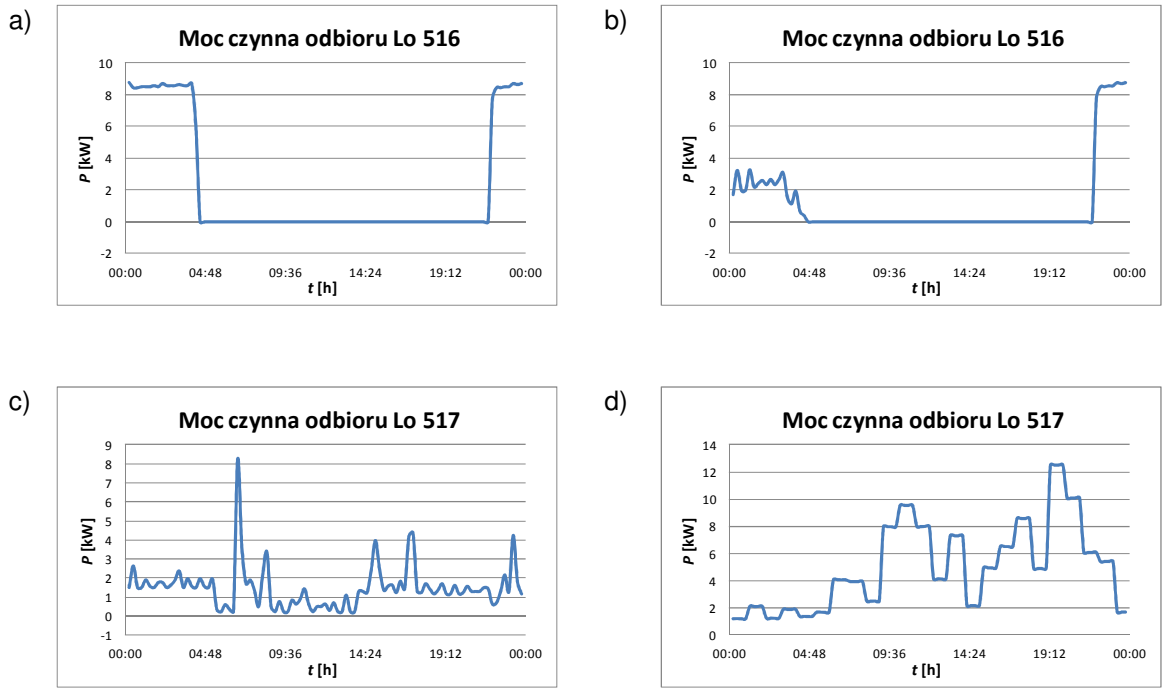
Rys. Z .0.2. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 507 profil (A), b) Lo 507 profil (B), c) Lo 508 profil (A), d) Lo 508 profil (B)



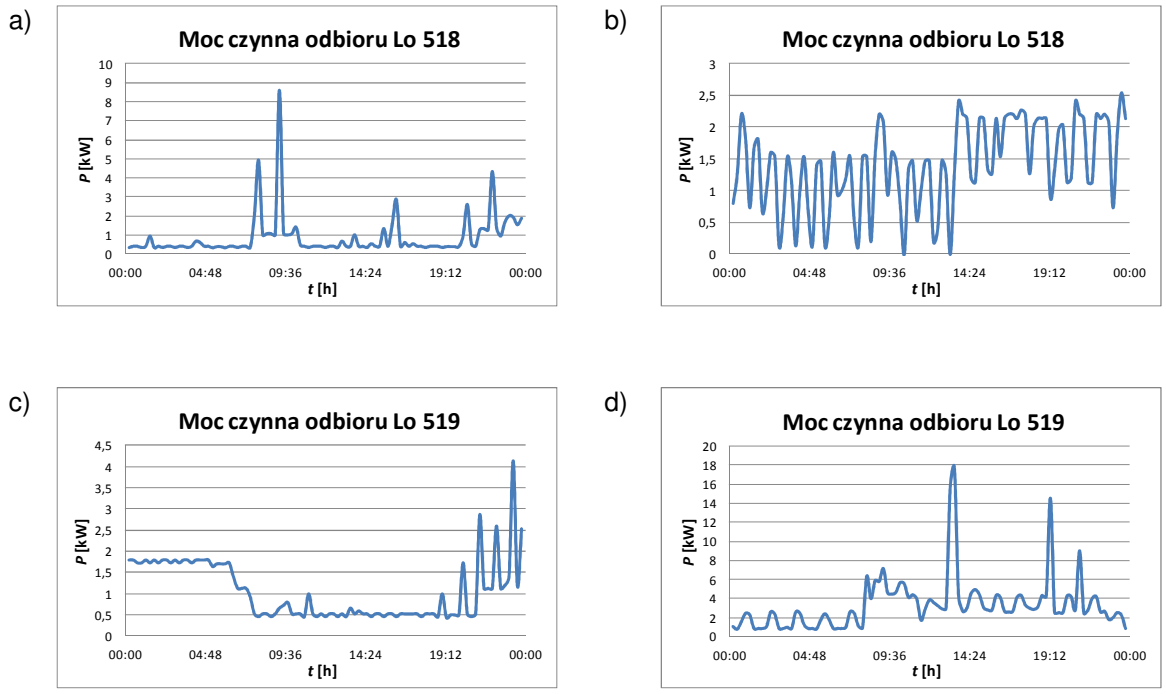
Rys. Z. 0.3. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 510 profil (A), b) Lo 510 profil (B), c) Lo 511 profil (A), d) Lo 511 profil (B)



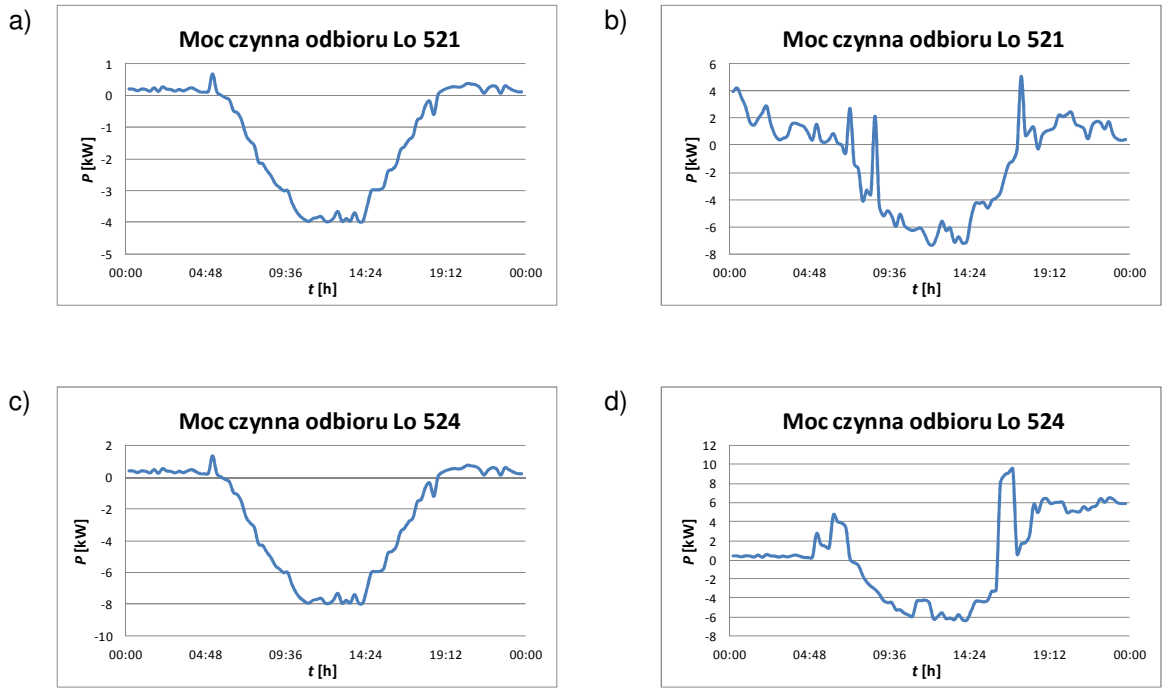
Rys. Z. 0.4. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 512 profil (A), b) Lo 512 profil (B), c) Lo 513 profil (A), d) Lo 513 profil (B)



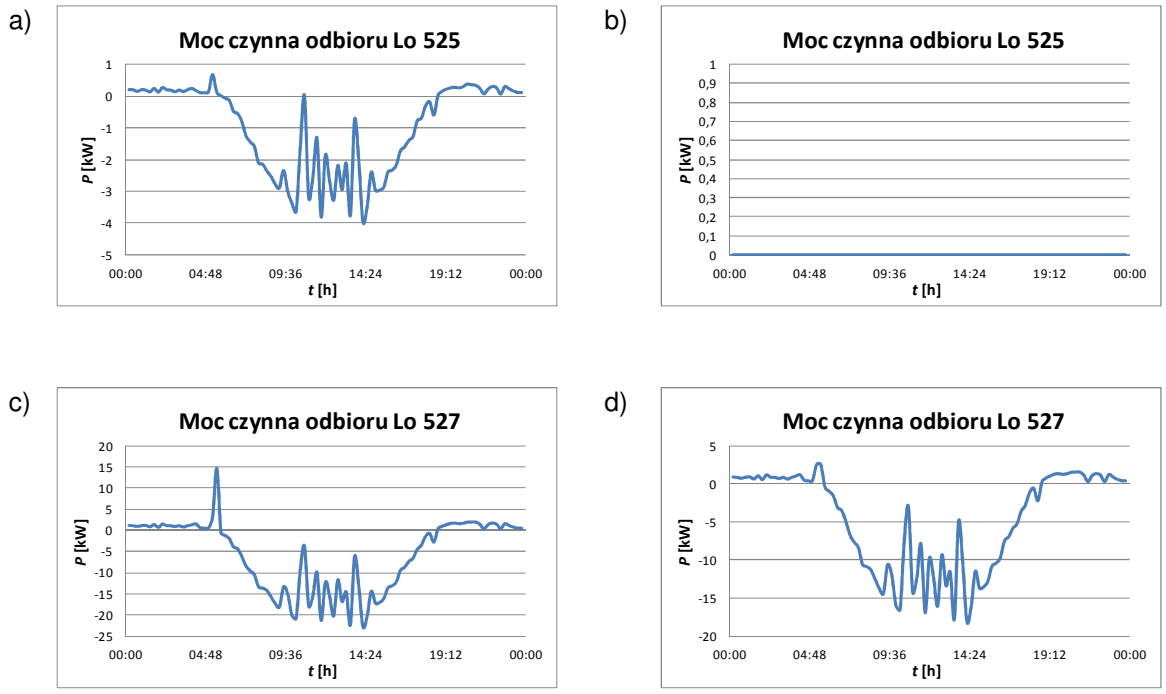
Rys. Z. 0.5. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 516 profil (A), b) Lo 516 profil (B), c) Lo 517 profil (A), d) Lo 517 profil (B)



Rys. Z. 0.6. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 518 profil (A), b) Lo 518 profil (B), c) Lo 519 profil (A), d) Lo 519 profil (B)

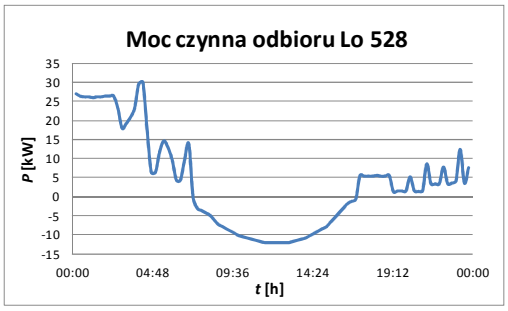


Rys. Z. 0.7. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 521 profil (A), b) Lo 521 profil (B), c) Lo 524 profil (A), d) Lo 524 profil (B)

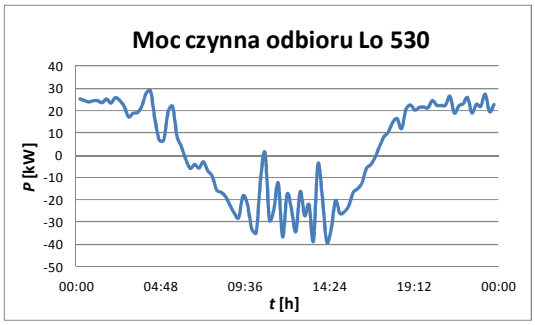


Rys. Z. 0.8. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 525 profil (A), b) Lo 525 profil (B), c) Lo 527 profil (A), d) Lo 527 profil (B)

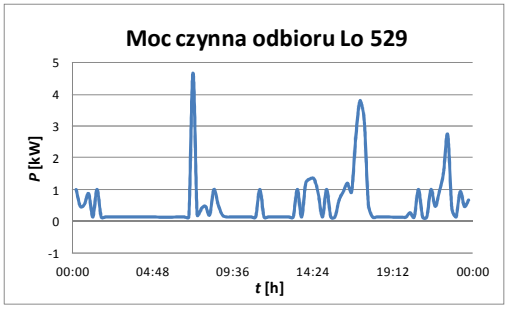
a)



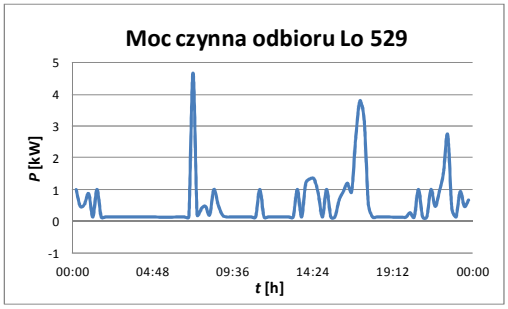
b)



c)

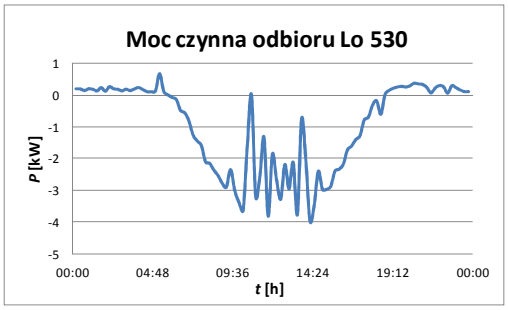


d)

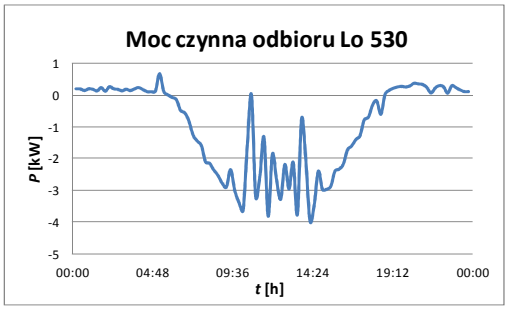


Rys. Z.0.9. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 528 profil (A), b) Lo 528 profil (B), c) Lo 529 profil (A), d) Lo 529 profil (B)

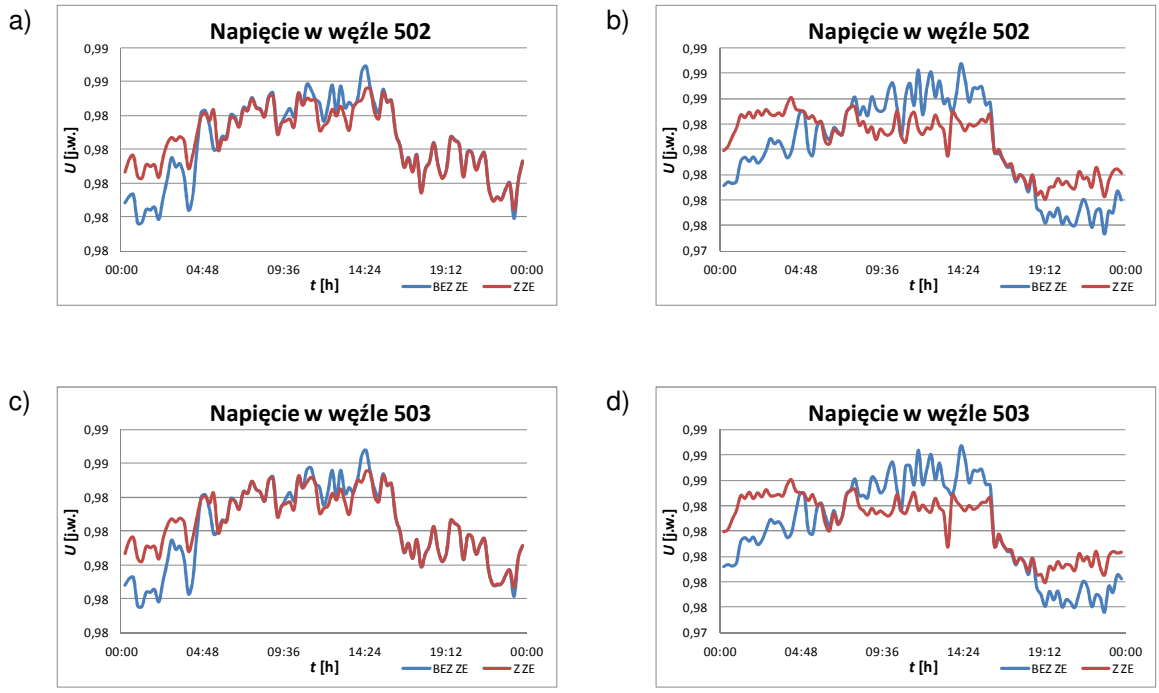
a)



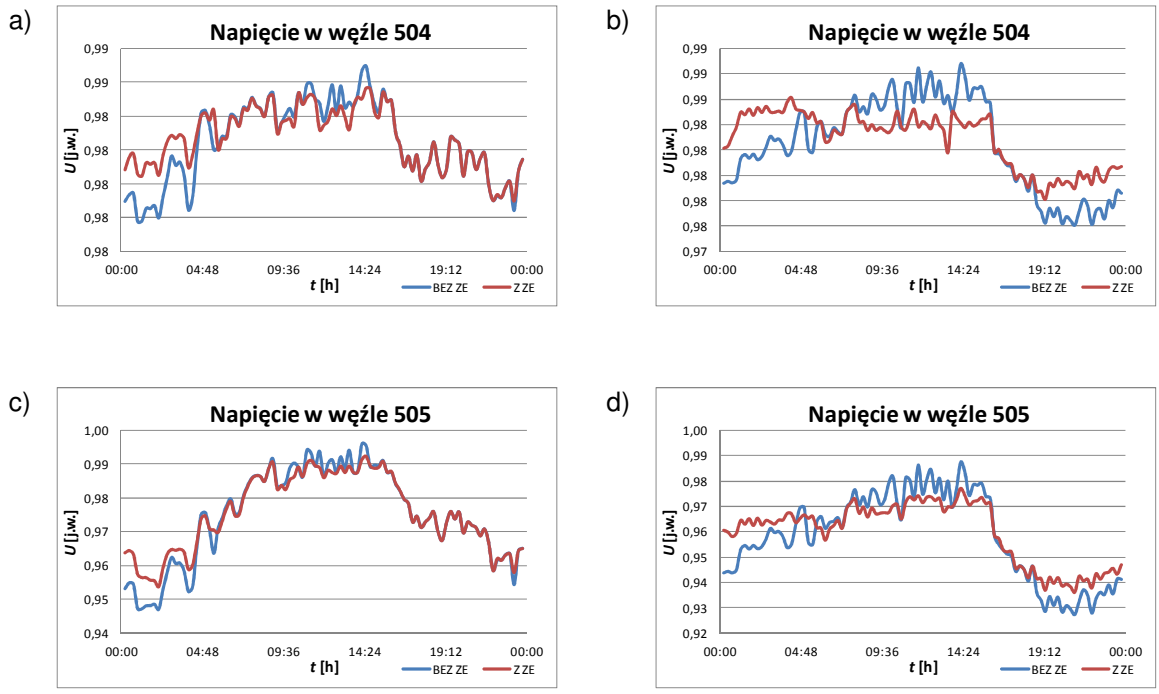
b)



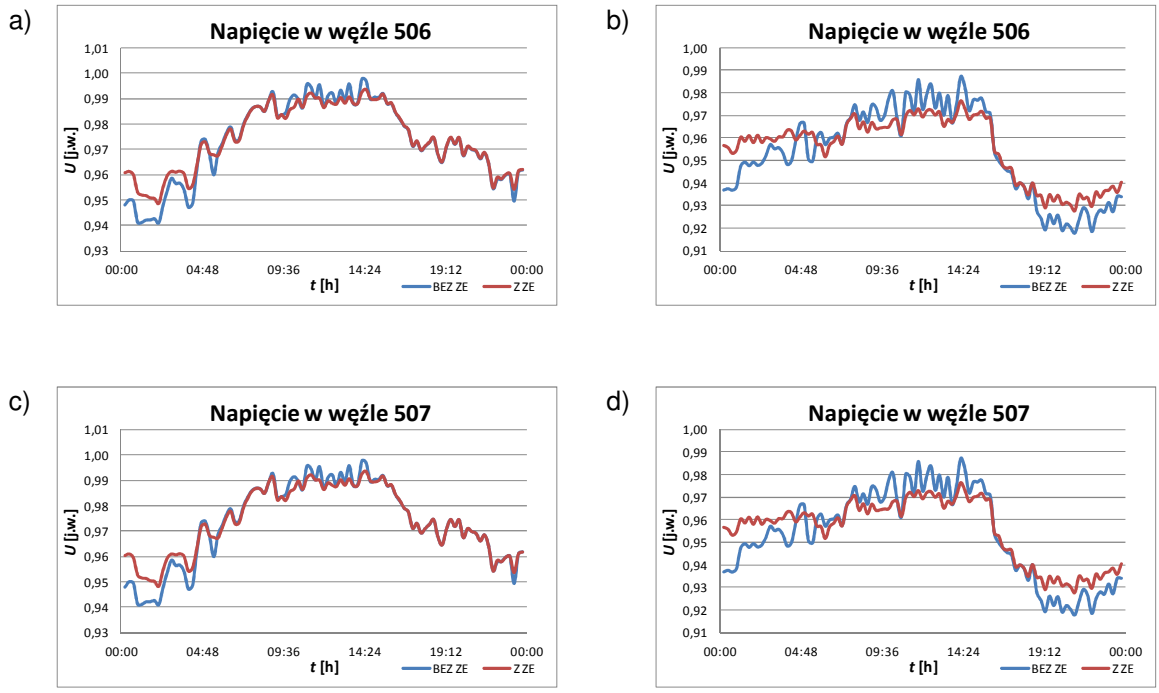
Rys. Z. 0.10. Zmienność obciążenia dla odbioru a) Lo 530 profil (A), b) Lo 530 profil (B)



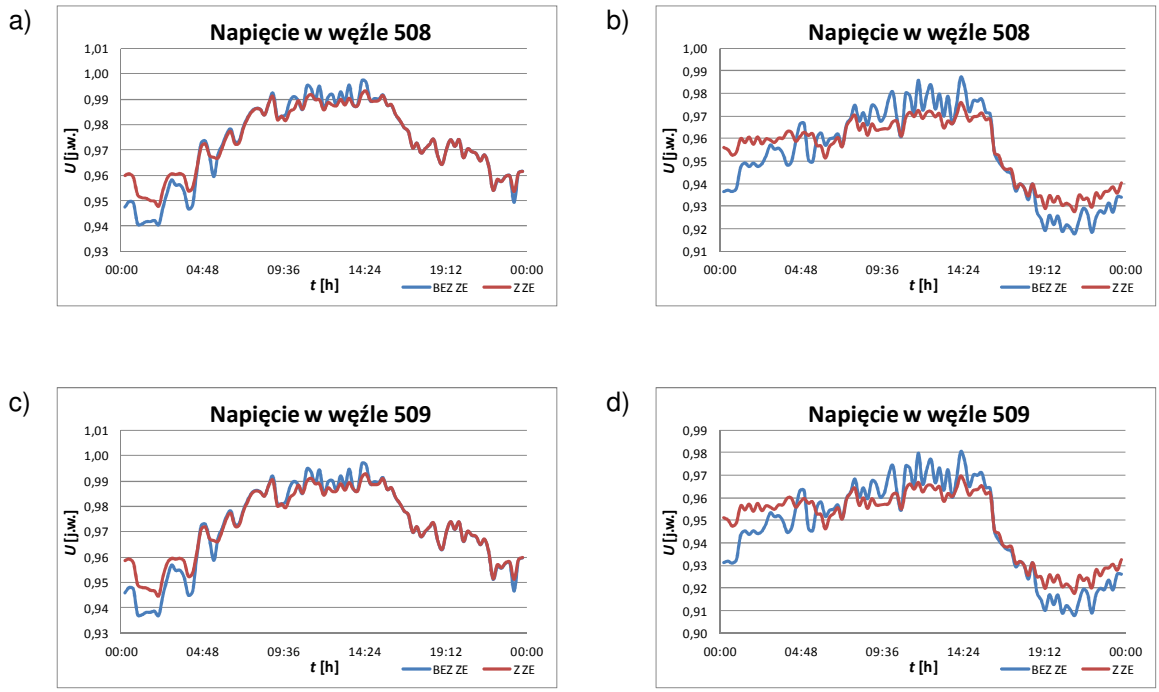
Rys. Z. 0.11. Zmienność napięcia w węźle a) 502 (profil A), b) 502 (profil B), c) 503 (profil A), d) 503 (profil B)



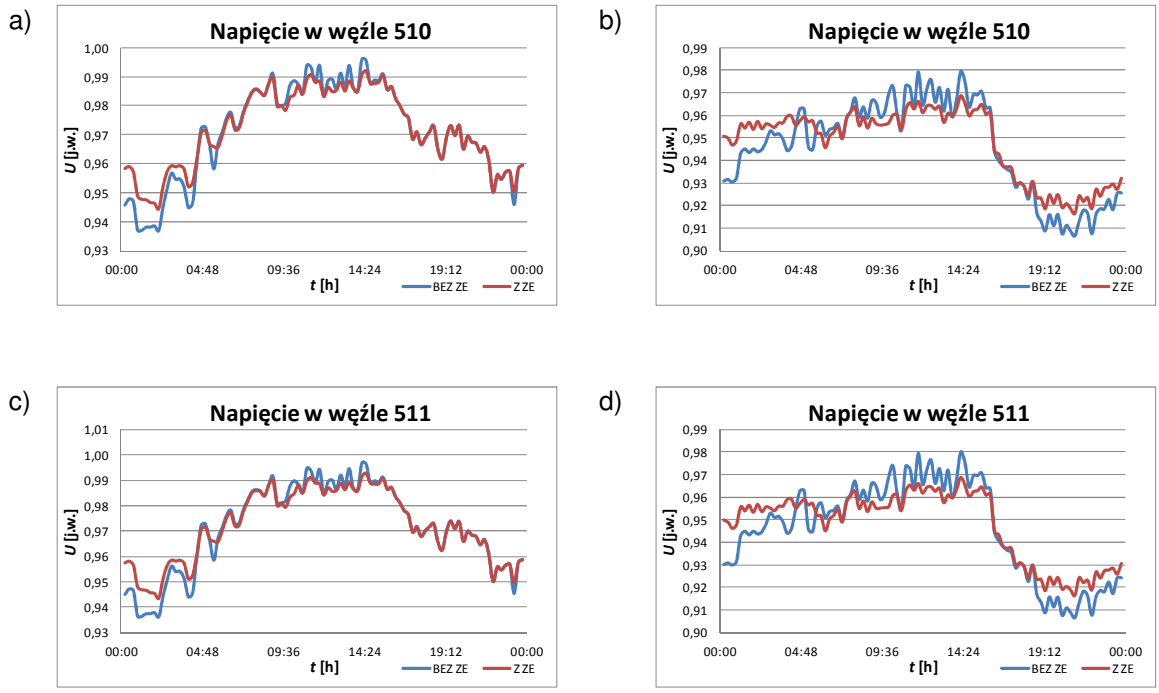
Rys. Z. 0.12. Zmienność napięcia w węźle a) 504 (profil A), b) 504 (profil B), c) 505 (profil A), d) 505 (profil B)



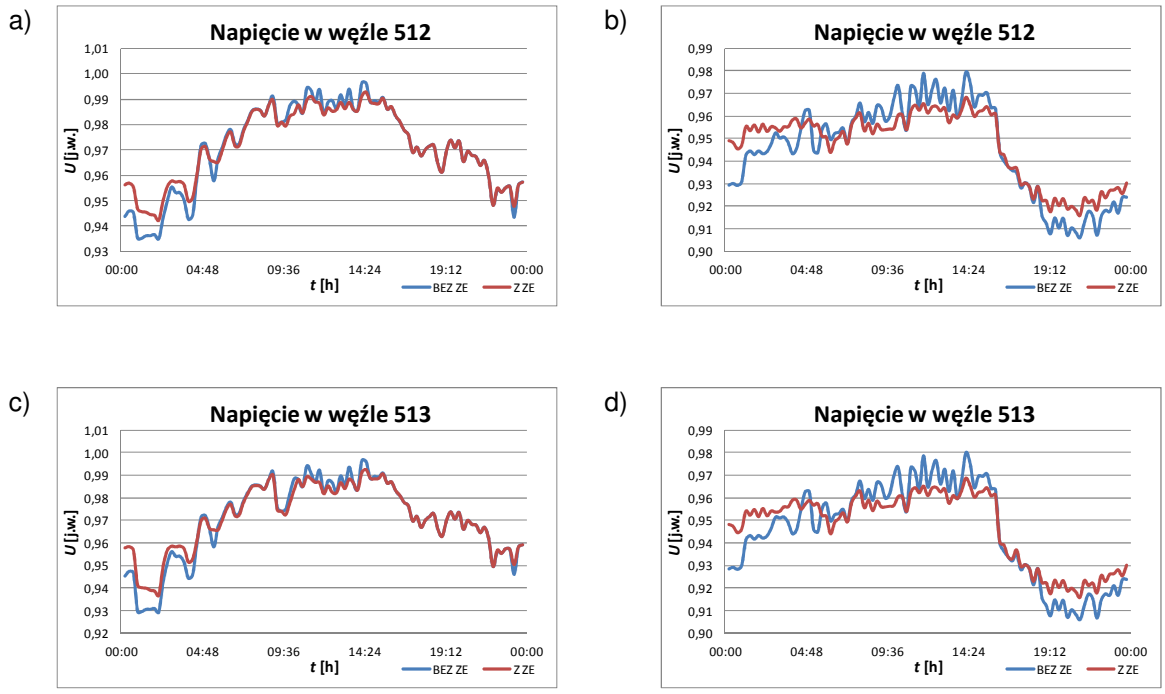
Rys. Z. 0.13. Zmienność napięcia w węźle a) 506 (profil A), b) 506 (profil B), c) 507 (profil A), d) 507 (profil B)



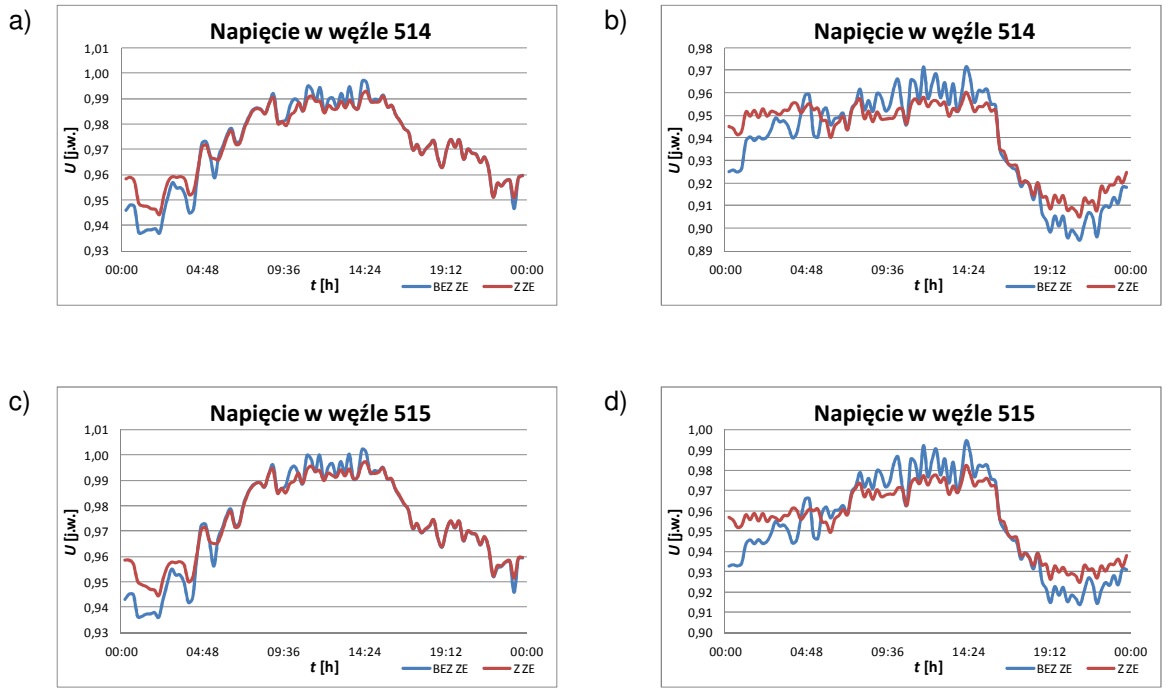
Rys. Z. 0.14. Zmienność napięcia w węźle a) 508 (profil A), b) 508 (profil B), c) 509 (profil A), d) 509 (profil B)



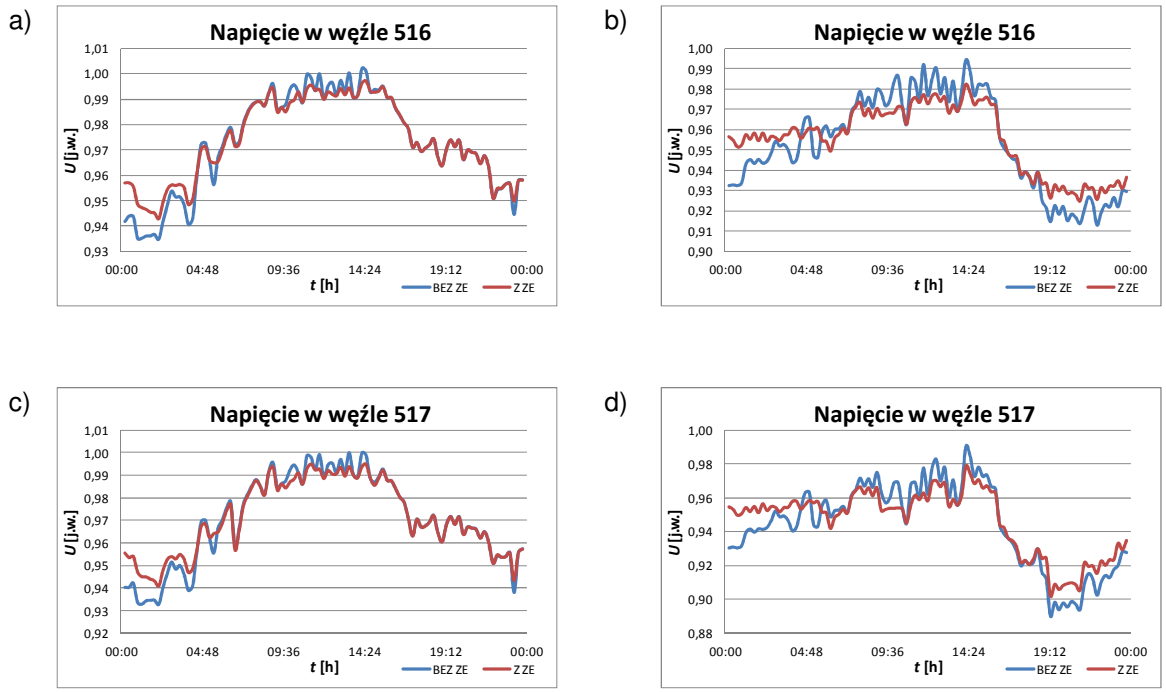
Rys. Z. 0.15. Zmienność napięcia w węźle a) 510 (profil A), b) 510 (profil B), c) 511 (profil A), d) 511 (profil B)



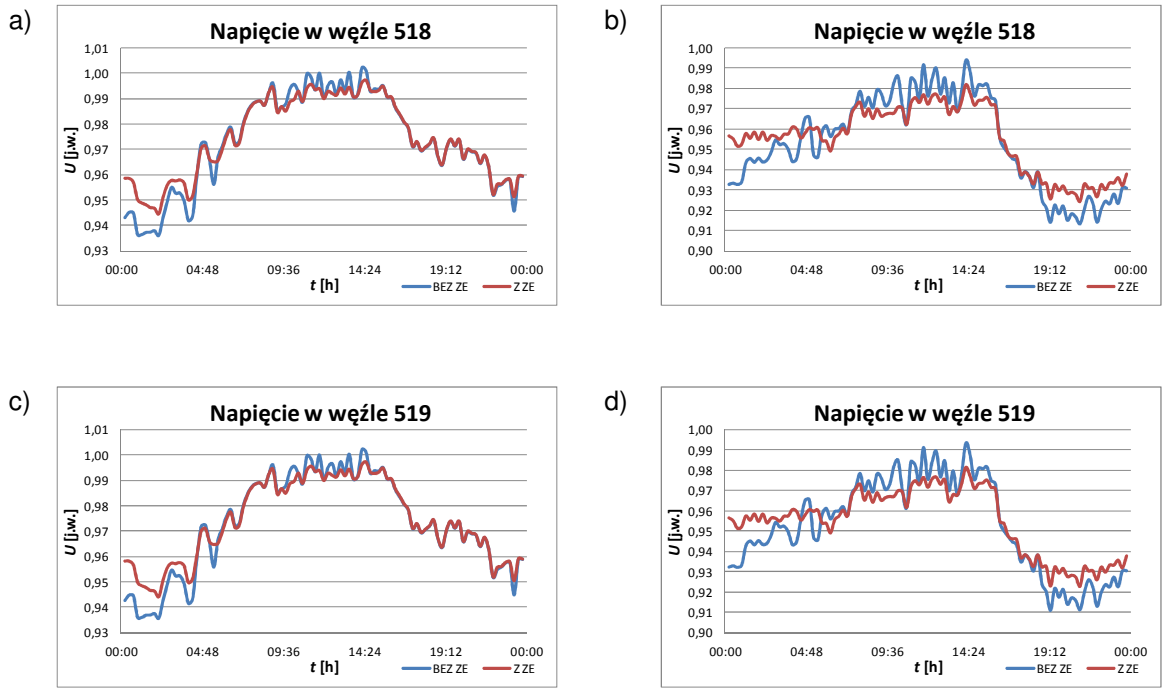
Rys. Z. 0.16. Zmienność napięcia w węźle a) 512 (profil A), b) 512 (profil B), c) 513 (profil A), d) 513 (profil B)



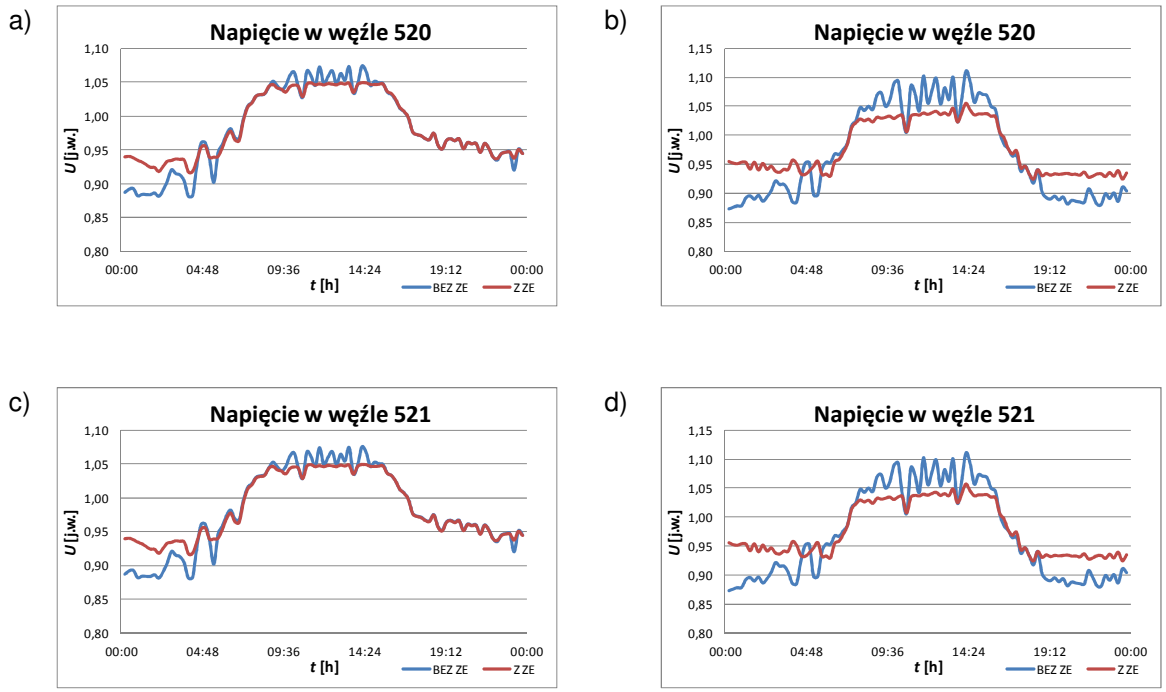
Rys. Z. 0.17. Zmienność napięcia w węźle a) 514 (profil A), b) 514 (profil B), c) 515 (profil A), d) 515 (profil B)



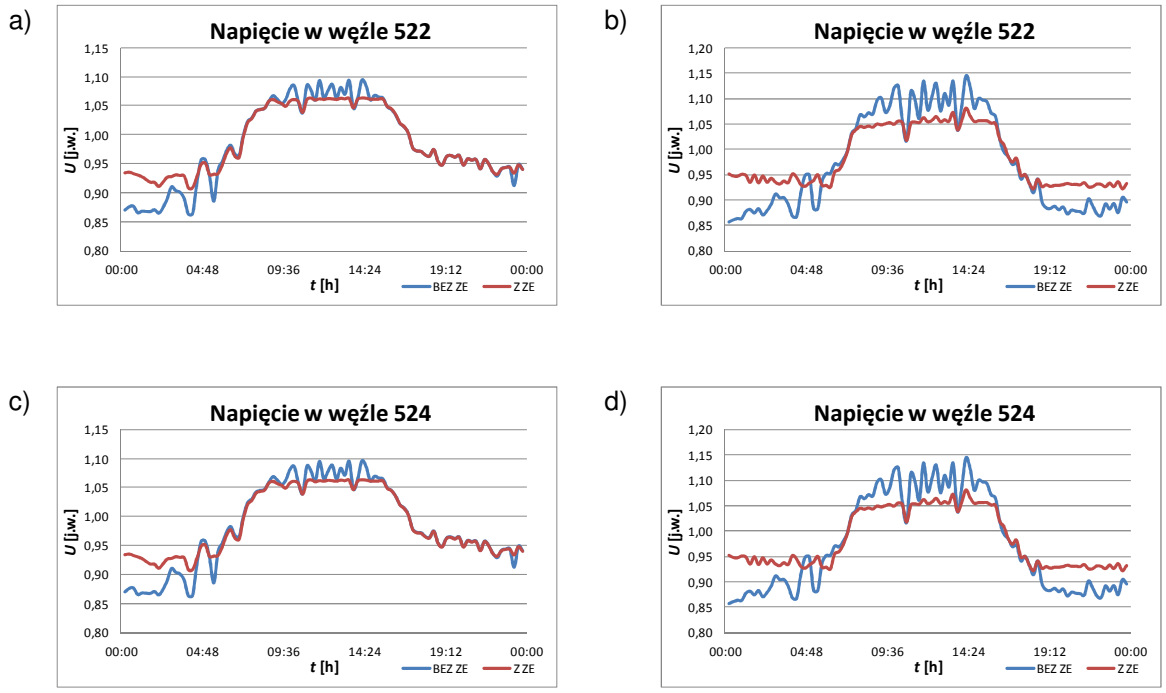
Rys. Z. 0.18. Zmienność napięcia w węźle a) 516 (profil A), b) 516 (profil B), c) 517 (profil A), d) 517 (profil B)



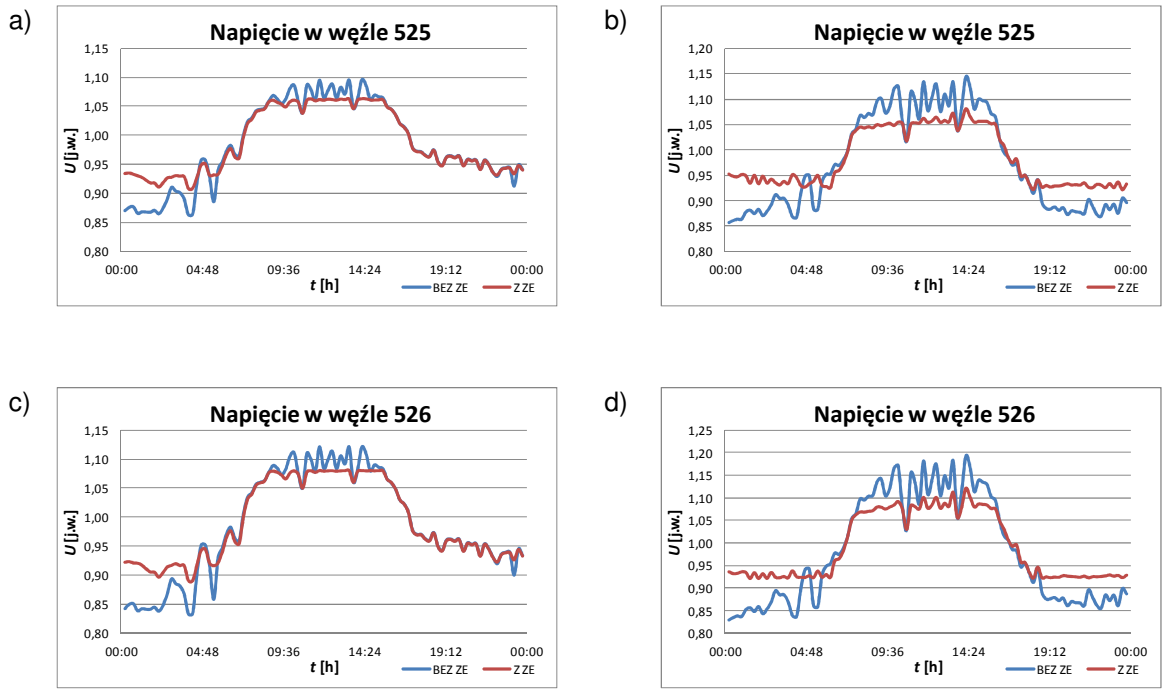
Rys. Z. 0.19. Zmienność napięcia w węźle a) 518 (profil A), b) 518 (profil B), c) 519 (profil A), d) 519 (profil B)



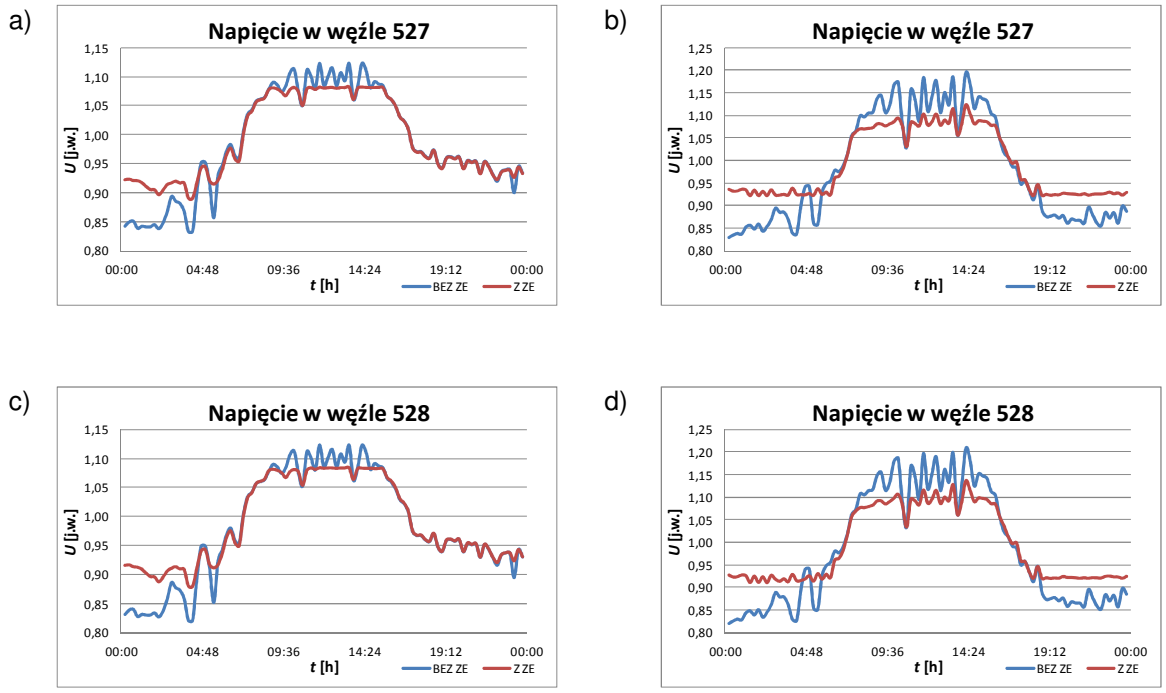
Rys. Z. 0.20. Zmienność napięcia w węźle a) 520 (profil A), b) 520 (profil B), c) 521 (profil A), d) 521 (profil B)



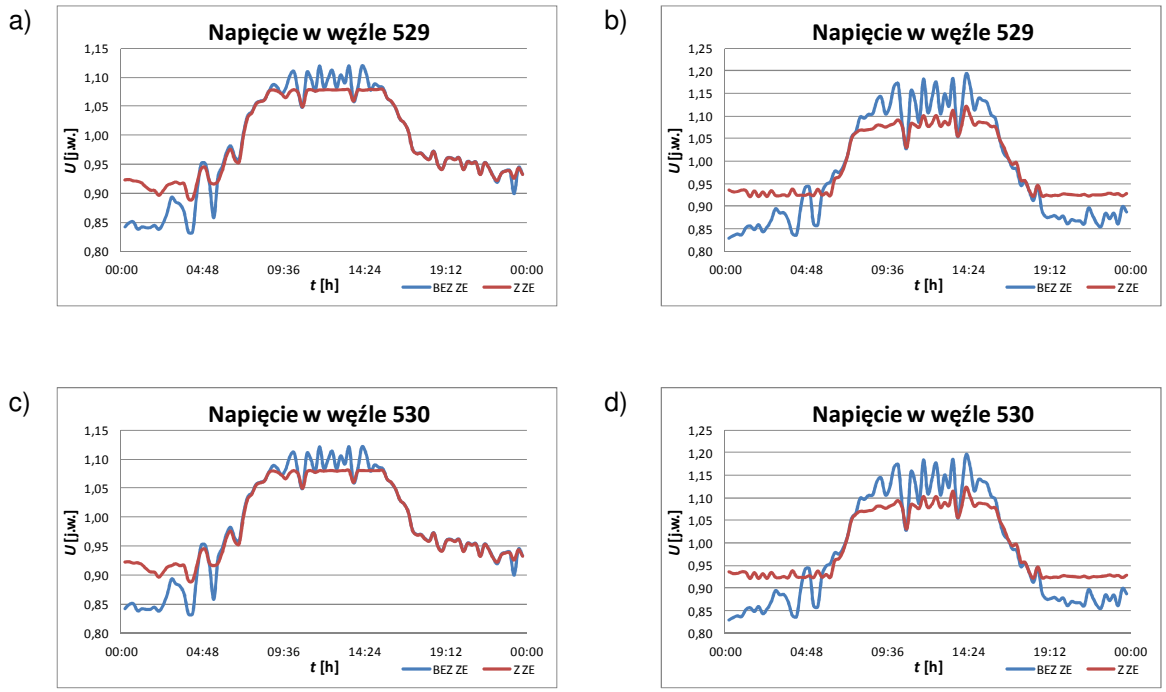
Rys. Z. 0.21. Zmienność napięcia w węźle a) 522 (profil A), b) 522 (profil B), c) 524 (profil A), d) 524 (profil B)



Rys. Z. 0.22. Zmienność napięcia w węźle a) 525 (profil A), b) 525 (profil B), c) 526 (profil A), d) 526 (profil B)

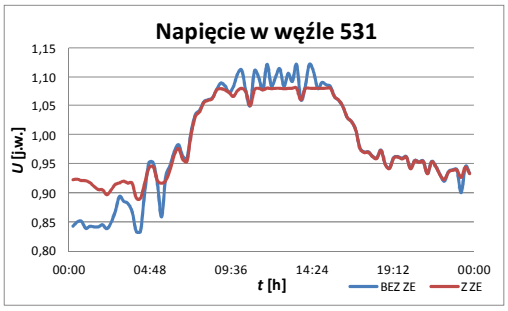


Rys. Z. 0.23. Zmienność napięcia w węźle a) 527 (profil A), b) 527 (profil B), c) 528 (profil A), d) 528 (profil B)

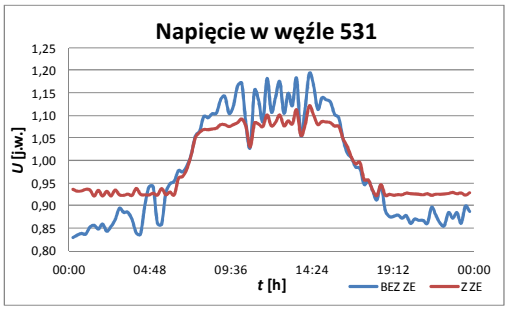


Rys. Z. 0.24. Zmienność napięcia w węźle a) 529 (profil A), b) 529 (profil B), c) 530 (profil A), d) 530 (profil B)

a)



b)



Rys. Z. 0.25. Zmienność napięcia w węźle a) 531 (profil A), b) 531 (profil B)