

# POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Dyscyplina Naukowa: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i  
Technologie Kosmiczne

Dziedzina nauk inżynieryjno - technicznych

## ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Łukasz Sosnowski

***Regulacja przepływu energii w sieci nN za pomocą mobilnych i  
stacjonarnych zasobników energii***

Promotor:

*dr hab. inż. Piotr Biczal*

Promotor pomocniczy:

*dr inż. Janusz Jakubowski*

Warszawa, 2023

*Składam serdecznie podziękowania*  
*prof. dr hab. inż. Desire Rasolomampionona*  
*dr hab. inż. Piotrowi Biczelowi*  
*oraz*  
*dr inż. Januszowi Jakubowskiemu*  
*za istotną pomoc w realizacji zadań,*  
*Żonie i synom za wyrozumiałość i wsparcie,*  
*a Pracodawcy i przełożonym za możliwość realizacji pracy*



## ***Regulacja przepływu energii w sieci nN za pomocą mobilnych i stacjonarnych - zasobników energii***

### **Streszczenie**

W rozprawie poruszono zagadnienie wykorzystania regulacji przepływów zarówno energii czynnej jak i biernej w sieci niskiego napięcia przy wykorzystaniu układów magazynowania energii.

Systemy magazynowania energii elektrycznej mogą być stosowane praktycznie w dowolnym miejscu systemu elektroenergetycznego, celem usprawnienia funkcjonowania każdej infrastruktury elektroenergetycznej pod kątem jakości parametrów energii elektrycznej, niezawodność jej dostaw, efektywność energetycznej, wydajność i dynamiki procesów kompensacji stanów zakłóceń, integracji z odnawialnymi źródłami energii OZE, lokalnej kompensacji mocy biernej czy wyrównania deficytów bądź nadwyżek mocy i energii w KSE (wyrównywanie „szczytów” i „dolin” zapotrzebowania na energię w KSE).

Przedmiotem badań naukowych realizowanych w ramach pracy doktorskiej była analiza możliwości regulacji przepływami energii w sieci nN z wykorzystaniem zasobników energii

**Słowa kluczowe:** magazynowanie energii, rozproszone źródła energii, rynek energii, pojazdy elektryczne, dystrybucja

***Regulation of energy flow in the Low Voltage grid using mobile and stationary energy storage***

**Abstract**

The dissertation discusses the issue of the use of flow regulation of both active and reactive energy in a low voltage network using energy storage systems.

Electric energy storage systems can be used practically anywhere in the power system in order to improve the functioning of any electricity infrastructure in terms of quality of electricity parameters, reliability of its supply, energy efficiency, efficiency and dynamics of faults compensation processes, integration with renewable energy sources, renewable energy, local compensation of reactive power or compensation of deficits or surpluses of power and energy in the National Power System (equalization of peaks and valleys of energy demand in the PPS).

The subject of scientific research carried out as part of the doctoral thesis was the analysis of the possibilities of regulating energy flows in the LV network with the use of energy storage.

**Key words:** energy storage, distributed energy sources, energy market, electric vehicles, distribution

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| WYKAZ OZNACZEŃ, SYMBOLI, SKRÓTÓW .....                                                               | 7   |
| 1    WSTĘP.....                                                                                      | 8   |
| 2    MAGAZYNOWANIE ENERGII W ŚWIELE WSPÓŁCZESNEJ LITERATURY .....                                    | 10  |
| 2.1 Idea magazynowania energii w sieci elektroenergetycznej.....                                     | 12  |
| 2.2 Dostępne konstrukcje zasobników energii .....                                                    | 16  |
| 2.3 Samochody elektryczne jako mobilne magazyny energii .....                                        | 19  |
| 2.4 Sposoby sterowania zasobnikami energii .....                                                     | 24  |
| 2.5 Koszty magazynowania energii .....                                                               | 30  |
| 3    CEL I ZAKRES PRACY .....                                                                        | 38  |
| 3.1 Problem badawczy/ Teza.....                                                                      | 38  |
| 3.2 Cel i zakres pracy .....                                                                         | 38  |
| 3.3 Przyjęta metoda badawcza .....                                                                   | 40  |
| 3.4 Podejście nowatorskie w pracy .....                                                              | 41  |
| 4    REGULACJA PRZEPŁYWÓW ENERGII W SIECIACH NISKICH NAPIĘĆ I POPRAWA NIEZAWODNOŚCI PRACY SIECI      |     |
| 42                                                                                                   |     |
| 4.1 Regulacja mocy czynnej.....                                                                      | 47  |
| 4.2 Propozycje formalnych zmian w funkcjonowaniu usług systemowych i poprawa niezawodności pracy     |     |
| sieci.....                                                                                           | 49  |
| 4.3 Koncepcja doboru mocy i lokalizacji mobilnych i stacjonarnych magazynów energii.....             | 52  |
| 5    WDROŻENIE ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI STOEN OPERATOR CELEM REGULACJI PRZEPŁYWÓW W SIECI          |     |
| NISKIEGO NAPIĘCIA .....                                                                              | 64  |
| 5.1 Opis sieci Stoen Operator.....                                                                   | 65  |
| 5.2 Koncepcja zastosowania zasobników energii w dzielnicy Wawer .....                                | 73  |
| 5.3 Analiza zastosowania mobilnych i stacjonarnych magazynów energii na terenie dzielnicy Wawer..... | 78  |
| 5.4 Analiza wrażliwości wyników .....                                                                | 89  |
| 5.5 Analiza wpływu instalacji zasobników na zmiany współczynnika SAIDI .....                         | 97  |
| 5.6 Podsumowanie rozdziału .....                                                                     | 106 |
| 6    ANALIZA KORZYŚCI Z ZASTOSOWANIA ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI WARSZAWSKIEGO OPERATORA              |     |
| SYSTEMU DYSTRYBUCYJNEGO.....                                                                         | 108 |
| 6.1 Redukcja zapotrzebowania na moc w szczycie obciążenia .....                                      | 110 |
| 6.2 Poprawa wskaźników jakościowych dostarczanej energii .....                                       | 113 |
| 6.3 Mobilne zasobniki energii jako element poprawy niezawodności pracy sieci .....                   | 114 |
| 6.4 Podsumowanie rozdziału .....                                                                     | 115 |
| 7    POSUMOWANIE.....                                                                                | 116 |
| 8    BIBLIOGRAFIA .....                                                                              | 120 |

## WYKAZ OZNACZEŃ, SYMBOLI, SKRÓTÓW

- 1) **AMI** – (ang. *Advanced Metering Infrastructure*) – zaawansowana infrastruktura pomiarowa;
- 2) **BESS** – (ang. *Battery Energy Storage*) – bateryjny system magazynowania energii;
- 3) **CAN** – (ang. *Controller Area Network*) – szeregową magistrala komunikacyjna;
- 4) **CAPEX** – (ang. *Capital expenditure*) – nakłady inwestycyjne;
- 5) **CHAdemo** – jeden z systemów ładowania pojazdów napięciem DC;
- 6) **CO<sub>2</sub>** – dwutlenek węgla;
- 7) **DoD** – (ang. *Depth of Discharge*) – głębokość rozładowania baterii;
- 8) **EV** – (ang. *Electric Vehicle*) – pojazd o napięciu elektrycznym;
- 9) **GPZ** – główny punkt zasilania;
- 10) **ICT** – (ang. *Information Communication Technics*) – techniki informacyjno – komunikacyjne;
- 11) **IRiESD** – Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej;
- 12) **IRiESP** – Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej;
- 13) **JEE** – jakość energii elektrycznej;
- 14) **KSE** – Krajowy System Elektroenergetyczny;
- 15) **nJWCD** – jednostka wytwórcza nie będąca jednostką wytwórczą centralnie dysponowaną;
- 16) **OSD** – operator systemu dystrybucyjnego;
- 17) **OSP** – operator systemu przesyłowego;
- 18) **OZE** – odnawialne źródła energii;
- 19) **PWM** – (ang. *Pulse Width Modulation*) – modulacja szerokości impulsów;
- 20) **RPZ** – Rozdzielczy Punkt Zasilania;
- 21) **SAIDI** – (ang. *System Average Interruption Duration Index*) – wskaźnik trwania przerwy w dostawie energii
- 22) **SAIFI** – (ang. *System Average Interruption Frequency Index*); - wskaźnik ilości przerw w dostawie energii
- 23) **SEE** – system elektroenergetyczny;
- 24) **SMART Grids** – inteligentne sieci elektroenergetyczne;
- 25) **SO** – Stoen Operator Sp. z o.o., operator sieci dystrybucyjnej w Warszawie;
- 26) **SoC** – (ang. *State of Charge*) – poziom naładowania baterii w odniesieniu do jej znamionowej pojemności;
- 27) **SoH** – (ang. *State of Health*) – „stan zdrowia baterii” – poziom zgodności aktualnych parametrów baterii, głównie pojemności, w odniesieniu do wartości deklarowanych przez producenta dla nowej baterii;

- 28) **V2G** – (*ang. Vehicle To Grid*) – *technologia umożliwiająca dwukierunkowy przepływ energii między pojazdem elektrycznym a siecią elektroenergetyczną.*

## 1 WSTĘP

Na przestrzeni ostatnich lat sektor elektroenergetyczny podlega dynamicznym zmianom i transformacji na skutek oddziaływania silnych trendów biznesowych i technologicznych.

W pracy przedstawiono przegląd literatury, dotyczącej magazynowania energii. W rozdziale drugim dokonano analizy idei magazynowania energii w sieci elektroenergetycznej, dostępnych konstrukcji zasobników energii, dostępności samochodów elektrycznych jako mobilnych magazynów energii, dostępności sposobów sterowania zasobnikami energii oraz koszty magazynowania energii.

W rozdziale trzecim przedstawiono zasady regulacji przepływów energii w sieciach niskich napięć oraz możliwości poprawy niezawodności poprawy sieci. W rozdziale tym opisano potencjalne korzyści ekonomiczne zastosowania zasobników w sieci dystrybucyjnej, koncepcję doboru mocy i lokalizacji mobilnych i stacjonarnych magazynów energii.

W rozdziale czwartym podjęto się opisu wdrożenia zasobników energii w sieci Stoen Operator, w celu regulacji przepływów w sieci niskiego napięcia. Dokonano opisu sieci innogy Stoen Operator oraz koncepcji zastosowania zasobników energii w dzielnicy Wawer, a także dokonano analizy zastosowania mobilnych i stacjonarnych magazynów energii na terenie dzielnicy Wawer.

W rozdziale piątym pracy wykonano analizę korzyści zastosowania zasobników energii w sieci warszawskiego operatora systemu dystrybucyjnego. W tym celu dokonano analizy redukcji zapotrzebowania na moc w szczycie obciążenia oraz poprawy wskaźników jakościowych dostarczanej energii.

Zagadnienia związane z magazynowaniem energii, elektromobilnością czy z pojęciem inteligentnych sieci elektroenergetycznych (*ang. Smart Grids*) coraz częściej pojawiają się w publikacjach i doniesieniach prasowych. Z jednej strony istotne stają się zagadnienia związane z ochroną środowiska i efektywnością energetyczną, z drugiej zaś obserwuje się gwałtowny wzrost wykorzystania technologii informacyjnych (ICT) w energetyce. Postępujący rozwój technologii sprawia, że urządzenia wcześniej występujące w sferze marzeń inżynierów i konsumentów, dziś są powszechnie dostępne. Podobne zjawiska zachodzą w kontekście systemów elektroenergetycznych. Transformacji ulega model przepływu energii z



jednokierunkowego (elektrownia – sieci – odbiorca) do układów, gdzie energia transferowana jest pomiędzy wszystkimi użytkownikami sieci na każdym poziomie napięć. Wytwórca/prosument, będąc przyłączonym na każdym poziomie napięć oraz dążąc do maksymalizacji ilości wyprodukowanej energii, oczekuje, że operator systemu dystrybucyjnego (OSD) zapewni mu dostawy energii w sposób ciągły, o właściwych parametrach. Jednocześnie prosument będzie także oczekiwał, że system elektroenergetyczny (SEE) stanowić będzie swego rodzaju wirtualny magazyn energii. Dodatkowym oczekiwaniem jest, żeby SEE był na tyle pojemny i elastyczny oraz dostępny, aby każda nadwyżka wyprodukowanej energii mogła być w nim ulokowana i odebrana w dowolnej chwili.

W artykule [49] autorzy określili, że inteligentne sieci elektroenergetyczne (ISE), nazywane, powszechnie Smart Power Grids, to sieci, które z definicji są elastyczne i mające zdolność do adaptacji do oczekiwań jej użytkowników. ISE z założenia są powszechnie dostępne, a także dają możliwość wzajemnego połączenia wszystkich jej użytkowników, nie tylko odbiorców, ale także odnawialnych źródeł energii i wysoce wydajnej lokalnej generacji. Kolejną wartą uwagi cechą ISE jest wysoka niezawodność, rozumiana jako zapewnienie odpowiedniego poziomu jakości i bezpieczeństwa dostaw. Wykazano także, że dzięki automatyzacji sieci SN i nN oraz zwiększeniu jej obserwowalności przez operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) możliwe jest samoczynne lokalizowanie i eliminowanie uszkodzeń. Nie bez znaczenia jest również fakt, że przebudowa sieci elektroenergetycznej do sieci inteligentnej musi być ekonomicznie uzasadniona, co jest możliwe do realizacji poprzez takie działania jak: efektywne kosztowo i technicznie zarządzanie energią oraz stosowanie innowacyjnych rozwiązań np.: zarządzanie stroną popytową (Demand Side Management) czy zarządzanie popytem (Demand Response).

Inteligentne sterowanie pozwoli dostosować godziny pracy urządzeń do profilu obciążenia systemu oraz do aktualnych chwilowych cen energii i zapewni obniżenie kosztów odbiorcy. Dzięki zwiększeniu elastyczności zachowań użytkowników (np. konsumpcji energii) oraz bieżącemu dostępowi do danych pomiarowych możliwe stanie się bilansowanie systemu elektroenergetycznego również po stronie odbioru [38]. Rozwinięcie technologii Smart na szeroką skalę przyniesie odczuwalny wzrost niezawodności dostaw energii elektrycznej, poprawę bezpieczeństwa energetycznego i możliwość dalszej optymalizacji wykorzystania majątku sieciowego przez spółkę dystrybucyjną [74].

## **2 MAGAZYNOWANIE ENERGII W ŚWIETLE WSPÓŁCZESNEJ LITERATURY**

Systemy magazynowania energii elektrycznej (zasobniki energii) są niezbędnym elementem każdej nowoczesnej infrastruktury elektroenergetycznej [48]. W sieciach i mikrosieciach elektroenergetycznych, w których źródła charakteryzują się dużą dynamiką ilości generowanej (tj. elektrownie fotowoltaiczne i turbospoły wiatrowe), zasobniki energii zapewniają stabilność pracy, równoważenie obciążeń i generacji ze źródeł częściowo niedyspozycyjnych. Małe, rozproszone magazyny energii elektrycznej, wkomponowane w infrastrukturę stacji elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych SN i rozdzielczych nN, zlokalizowane blisko odbiorców odgrywają kluczową rolę w przyszłej transformacji Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). W przyszłości podstawowymi elementami systemów elektroenergetycznych będą pracujące niezależnie, ale mogące również ze sobą współpracować, regionalne lub lokalne małe systemy elektroenergetyczne. Ponadto, zaawansowane technologicznie, systemy elektroenergetyczne z rozbudowaną infrastrukturą teleinformatyczną, zasilające pojedyncze gospodarstwa domowe w sposób niezależny, czyli tzw. mikrosieci, wykorzystujące lokalne zasoby energetyczne, również będą stanowiły podstawę systemów dystrybucyjnych. Aktualnie technologie zasobników energii są postrzegane jako systemy krytyczne, których zadaniem będzie stabilizacja napięciowa (w mikrosieci DC) lub napięciowa i częstotliwościowa (w mikrosieci AC) w przyszłych systemach elektroenergetycznych.

Przewiduje się, że zasobniki energii odegrają także ważną rolę w integracji dużej floty pojazdów elektrycznych z siecią elektroenergetyczną, umożliwiając bilansowanie większego i mniej przewidywalnego zapotrzebowania szczytowego [72, 74, 75]. Układ zasobnika może pracować jako lokalny układ gwarantowanego napięcia zapewniając zasilanie odbiorców w czasie krótkich i długich przerw w dostawie energii z KSE. Jest to typowa funkcjonalność charakterystyczna dla układów UPS (ang. Uninterruptible Power Supply) zwiększająca pewność i niezawodność zasilania odbiorcy końcowego. Dla słabo rozwiniętych sieci,

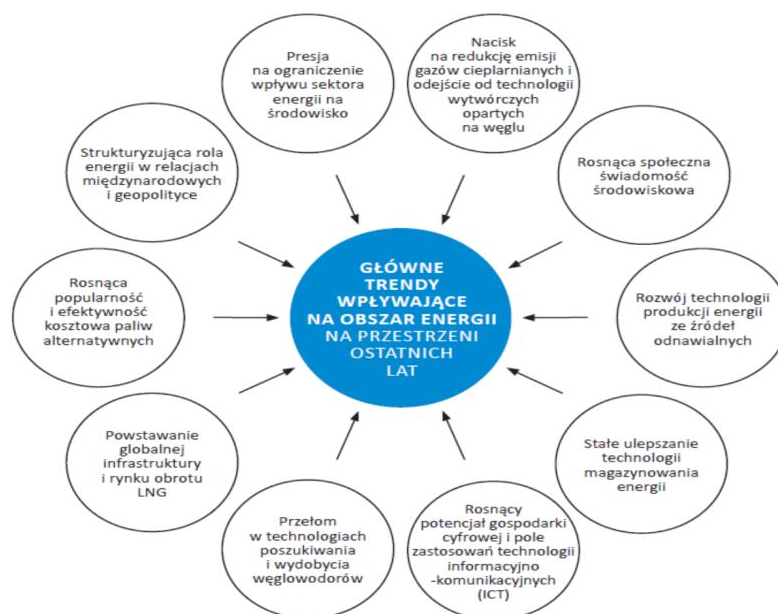
charakteryzujących się dużą częstotliwością występowania awarii, układy zasobników energii o funkcjonalności UPS'ów są wręcz zalecane.

Budowa tak zdefiniowanych struktur elektroenergetycznych, mogących pełnić różne usługi systemowe będzie możliwa jedynie przy wykorzystaniu szybko rozwijającej się technologii przetwornic energoelektronicznych i cyfrowych układów sterowania [55, 73].

Postęp jaki dokonał się w obszarze urządzeń energoelektronicznych znacznie rozszerzył potencjalne obszary aplikacyjne dla zasobników. Bardzo duża dynamika układów energoelektronicznych wraz z dynamiką dostępnych, mających tu zastosowanie technologii magazynów energii elektrycznej takich jak baterie akumulatorów, superkondensatory czy masy wirujące, umożliwia szybką odpowiedź zasobnika i kompensację nieprzewidywalnych i niebezpiecznych stanów dynamicznych takich jak np. krótkie zapady napięcia zasilającego lub podskoki napięcia w KSE. Systemy magazynowania energii elektrycznej mogą być stosowane praktycznie w dowolnym miejscu systemu elektroenergetycznego, celem usprawnienia funkcjonowania każdej infrastruktury elektroenergetycznej pod kątem jakości parametrów energii elektrycznej, niezawodność jej dostaw, efektywność energetycznej, wydajność i dynamiki procesów kompensacji stanów zakłóceńowych, integracji z odnawialnymi źródłami energii OZE, lokalnej kompensacji mocy biernej czy wyrównania deficytów bądź nadwyżek mocy i energii w KSE (wyrównywanie „szczytów” i „dolin” zapotrzebowania na energię w KSE).

Skumulowany wpływ negatywnych impulsów zewnętrznych, zgodnie z [1], spowoduje zmiany w obecnym modelu funkcjonowania sektora energetycznego stawiając na centralnym miejscu konsumenta (odbiorcę czy prosumenta). Przemiana ta spowoduje zmianę przepływu wytwarzanej energii z układu scentralizowanego do charakteru rozproszonego i zlokalizowanego jak najbliżej odbiorcy [9].

Na rys 1. przedstawiono główne trendy wpływające na obszar energii, na przestrzeni ostatnich lat.



Rys. 1 Czynniki zmieniające energetykę, [1]

Magazynowanie energii odgrywa znaczącą rolę w przyszłej transformacji obecnego systemu elektroenergetycznego w układ niskoemisyjny oparty o odnawialne źródła energii. Autorzy [64] wskazali, że tylko poprzez konwersję energii z systemu przemiennie-prądowego do stałoprądowego możliwe jest zmagazynowanie dostępnej energii w sieciach elektroenergetycznych. Wykorzystywane do tego zjawiska elektrochemiczne, elektrokinetyczne czy elektromagnetyczne są narzędziem w transformacji z jednej formy do drugiej. Technologie magazynowania energii, zgodnie z [64] pozwalają na uzyskanie wartości dodanej z ich zastosowania. Jest to przede wszystkim poprawa stabilności pracy sieci, poprawę niezawodności dostaw jak również mogą wpływać na parametry jakościowe. Wynika to z faktu, że magazyny mogą dostarczać energię w sposób lepiej dopasowany do charakteru odbiorów jak również służyć obszarowemu bilansowaniu przepływów energii. Nie bez znaczenia jest fakt, że wdrożenie magazynowania energii przyspieszy rozwój innowacji w sektorze energetyki, poprawi bezpieczeństwo i efektywność dostaw, a także umożliwi stabilizację cen energii [51, 74].

## 2.1 Idea magazynowania energii w sieci elektroenergetycznej

Inteligentne sieci (ang. Smart Grids) wdrażane są obecnie jako inicjatywa, która pozwoli eksploatować nowoczesne systemy dystrybucyjne w bardziej ekonomiczny i wydajny sposób.

Systemy magazynowania energii (ESS) są takim rodzajem technologii, które pozwolą osiągnąć cele zdefiniowane dla inteligentnych sieci poprzez sprawną integrację źródeł odnawialnych, poprawę niezawodności systemu i kontrolowanie zapotrzebowania poprzez dynamiczne obniżanie szczytów obciążenia. W artykule [5] w wyczerpujący wprowadzono ramy umiejscowienia systemów magazynowania w sieciach dystrybucyjnych celem ustalenia najbardziej opłacalnej lokalizacji i rozmiarów ESS, które maksymalizują korzyści. Działanie to oparto o podejście probabilistyczne, które obejmuje uwzględnienie stochastycznej natury elementów systemu. Tak zdefiniowane założenia pozwalają autorom określić właściwe działanie ESS przy każdym stanie obciążenia.

W sieci inteligentnej (ang. Smart Grid) pojawił się dodatkowy rodzaj użytkowników [39, 42], a mianowicie prosumenci, którzy mogą działać zarówno jako konsumenci energii, ale także mogą energię wytwarzać w określonym czasie. W różnych przedziałach czasowych, prosumenci mogą zachowywać się z punktu widzenia udziału w rynku energii zarówno jak sprzedający, ale także jako kupujący w zależności od cen energii elektrycznej i ich profili mocy. W tym względzie handel energią między sąsiadującymi prosumentami można postrzegać jako dzielenie się energią odnawialną, co może być doskonałym sposobem na poprawę lokalnego zużycia energii jak i na zmniejszenie negatywnego wpływu na system elektroenergetyczny. Jednak ze względu na niepewność generacji energii ze źródeł odnawialnych (losowość, zmienność i sporadyczność) trudno jest skoordynować podział energii fotowoltaicznej czy wiatrowej między prosumentami.

Jednak zmienny w czasie charakter odnawialnych zasobów energii i fluktuacje generowanej mocy w różnych horyzontach czasowych zwiększają złożoność planowania i eksploatacji sieci [55]. To uzasadnia potrzebę zastosowania w systemach dystrybucyjnych zaawansowanych systemów magazynowania energii (ESS). Celem takiego podejścia według autorów jest argument, że za pomocą ESS przerywany profil produkcji odnawialnych źródeł energii można ukształtować tak, aby krzywa produkcji w czasie była możliwie płaska. ESS może pochłaniać energię, gdy wytwarzanie przekroczy obciążenie i dostarczać z powrotem do sieci w godzinach szczytowego zapotrzebowania ze strony systemu elektroenergetycznego [69]. Zgodnie z charakterystyką elastycznego obciążenia układ magazynowania energii co do zasady musi być skalowalny, autonomiczny i gotowy do współpracy z innymi sieciami. Pozwoli to utrzymać wysoką wydajność pracy układu oraz zapewni ograniczanie wahań mocy i częstotliwości [7].

Dodatkowo, w artykułach [43, 44, 62, 21] podjęto próby opisanie i rozwiązania problemu dzielenia się energią przez wielu prosumentów na z góry zdefiniowanym obszarze. Analizując

wymienione publikacje, badania autorów można z podzielić na dwa podstawowe zagadnienia: udział w rynku energii oraz kontrola koordynacji produkowanej i przesyłanej energii. W obszarze zagadnień rynkowych zaangażowane podmioty można sklasyfikować jako sprzedawców i nabywców, którzy muszą uczestniczyć w obrocie energią na z góry zdefiniowanym lokalnym rynku w obrębie albo mikrosieci albo sieci dystrybucyjnej. W obszarze koordynacji działań administrator lub menedżer danego obszaru zobowiązany jest do koordynowania procesu handlowego w imieniu wszystkich uczestników. Parametry handlowe i określone okresy są ustalane przez kontrolera na podstawie poziomu dopasowania profili energetycznych między różnymi prosumentami. Główną wadą tych metod jest jednak brak szczegółowego mechanizmu ustalania cen co w praktycznych wdrożeniach budowy mikrosieci i dzielenia się energią dla wielu niezależnych stron jest trudne, jeżeli nie jesteśmy w stanie z góry zaplanować konkretnych cen i profitów.

Nie mniej podstawą funkcjonowania sieci elektroenergetycznej jest przede wszystkim utrzymywanie ciągłości zasilania dla odbiorców końcowych. Aby sprostać temu zapotrzebowaniu niezbędne są dokładne prognozy zmian popytu na energię odniesione do jednostki czasu oraz generowanie energii w sposób ciągły. Cechy te posiadają głównie elektrownie konwencjonalne oparte na spalaniu węgla, gazu czy elektrownie atomowe. Odwrotnie niż źródła OZE, dla których wielkość produkcji energii uzależniona jest od niezależnych czynników zewnętrznych, takich jak woda, wiatr, słońce.

Koncepcja rozmieszczenia magazynów energii w nowoczesnej sieci energetycznej w głównej mierze opiera się na czterech filarach, tj. wytwórcach, sieci przesyłowej, sieci dystrybucyjnej oraz odbiorcach końcowych. Różne rozmieszczenie w systemie energetycznym determinuje również różne funkcje jakie mogą być zapewnione przez te układy. W tabeli 1 przedstawiono możliwości wykorzystania magazynów energii.

**Tabela 1. Potencjalne możliwości wykorzystania magazynów energii, [opracowanie własne]**

| Miejsce w systemie                                 | Wytwórcy                                 | Sieć Przesyłowa            | Sieć Dystrybucyjna                                            | Odbiorcy końcowi                      |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Funkcje                                            |                                          |                            |                                                               |                                       |
| Wyrównywanie zapotrzebowania i wytwarzania energii | podmiot wytwarzający energię elektryczną | Okresowe zmiany parametrów | <i>Dzienne/godzinowe wahania</i><br><i>Obniżanie szczytów</i> | <i>Dzienne zmiany zapotrzebowania</i> |

|                          |                                                           |                                                                          |                                                   |                                              |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Zarządzanie siecią       | Udział w rynku                                            | Regulacja napięcia<br>Regulacja częstotliwości<br>Wymiana transgraniczna | Regulacja napięcia<br>Udział w rynku bilansującym | Agregacja małych magazynów                   |
| Efektywność Energetyczna | Sprzedaż w zakresie prowadzonej działalności gospodarczej | Lepsze wykorzystanie źródeł                                              | DSR/DSM                                           | Zużycie na własne potrzeby<br>Zmiana zużycia |

Zgodnie z powyższą tabelą, główne zadania, jakie stawia się magazynom energii, będą w dużej mierze wpływać na bezpieczeństwo dostaw, poprawę wskaźników niezawodności dostaw jak również na minimalizację kosztów bezpośrednich inwestycji sieciowych. Różna lokalizacja magazynów w systemie energetycznym umożliwia realizację różnych zadań i funkcji, a także angażuje różne zasoby i potencjalnych użytkowników [22]. Gdy udział OZE w sieci elektroenergetycznej przekroczy próg 20-25% istotne staje się zapewnienie pokrycia nadmiaru produkcji z tych źródeł przez odbiorców tak, aby uniknąć problemów sieciowych związanych z przesyłem czy wahaniami napięcia. Wspólna praca wielu rozproszonych jednostek z systemem elektroenergetycznym stwarza obecnie wiele problemów natury nie tylko związanej z ich budową, ale także problemów eksploatacyjnych. Z kolei implementacja wielu lokalnych magazynów energii sterowanych lokalnie ograniczy potencjalny zasięg awarii w porównaniu do dużych jednostek umieszczonych centralnie w systemie energetycznym.

Wartym uwagi jest również aspekt wykorzystania układów magazynowania dla potrzeb dynamicznego przesunięcia szczytów obciążenia u odbiorców końcowych [19, 20]. Szczególnie przy wykorzystaniu układów opartych o akumulowanie ciepła czy też regulując niewielkie zmiany częstotliwości. Niewiele jednak badań dotyczyło analizy innych korzyści z wdrożenia ESS w sieciach dystrybucyjnych [84, 12], takich jak obniżanie obciążenia szczytowego i odroczenie inwestycji w sieciach dystrybucyjnych, ale bez modelowania sieci dystrybucyjnej czy też bez wykorzystania profili jednodniowych do modelowania niepewności obciążeń. Ponadto przeprowadzono wystarczające prace w zakresie oceny niezawodności ESS w systemach dystrybucyjnych.

Badanie literatury ujawnia, że problem poprawy niezawodności systemu poprzez ustalenie najbardziej opłacalnej lokalizacji i wielkości urządzeń w sieciach dystrybucyjnych nie został jeszcze rozwiązany.

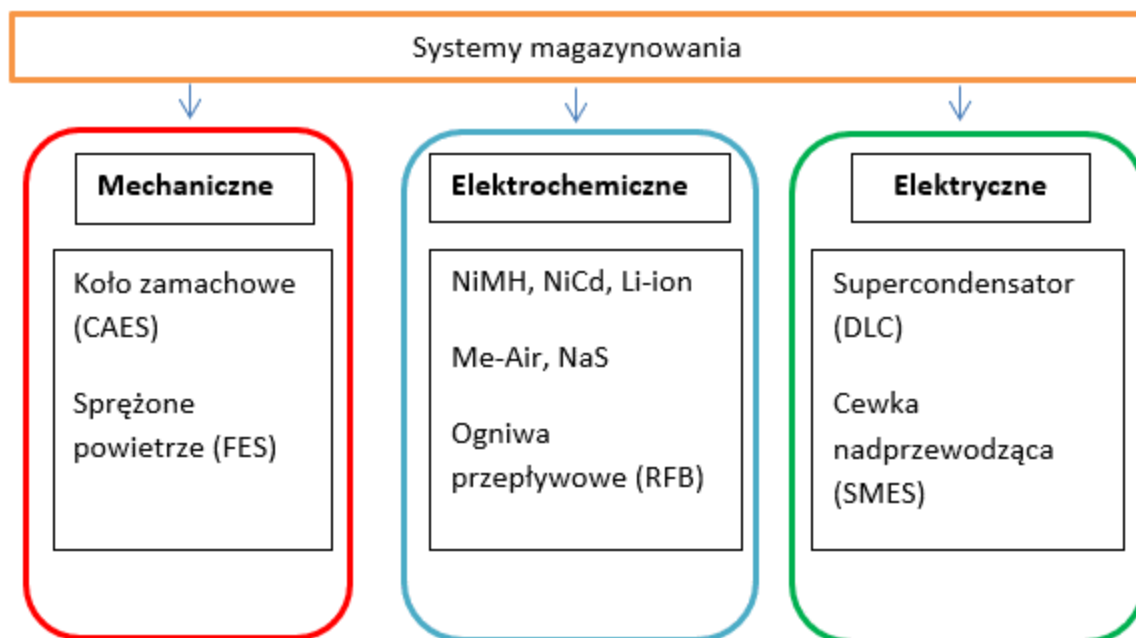
## 2.2 Dostępne konstrukcje zasobników energii

Współczesne wdrożenia układów magazynowania energii obejmują zarówno technologie dojrzałe, umożliwiające magazynowanie energii elektrycznej, jak i te nowatorskie, które nie zostały jeszcze skomercjalizowane. Szczegółowe technologie przedstawili autorzy [8, 77] prezentując szereg różnych aspektów i uwarunkowań związanych z różnymi technologiami magazynowania energii, jak również szereg przykładowych zastosowań takich układów.

Technologia magazynowania energii wykorzystuje różne metody akumulacji energii [65], takie jak:

- elektrochemię – baterie, ogniwa paliwowe
- pole elektryczne – kondensatory, super kondensatory
- fizykochemię – magazynowanie ciepła/chłodu, koła zamachowe, sprężone powietrze.

Ten podział w formie graficznej ilustruje rysunek 2.



Rys. 2 Podział układów magazynowania w zależności od technologii, [opracowanie własne]

Z technicznego punktu widzenia, żadna z powyższych technologii nie może mieć przypisanego miana technologii uniwersalnej. W zależności od aplikacji i funkcji systemowej każdy z powyższych systemów magazynowania ujawnia swoje wady i zalety. Technologie



baterijne pozwoliły na szerokie spektrum ich zastosowania w związku z relatywnie niedużymi wymiarami, technologie kół zamachowych pozwalają na budowanie układów bezprzerwowego zasilania w sposób niezanieczyszczający środowisko, zaś superkondensatory, zgodnie z [15] wykorzystywane są do aplikacji związanych z jakością energii i szybkimi odpowiedziami na zakłócenia [15, 30]. Realizowane są także układy hybrydowe oparte o mieszanki technologiczne (np. układy elektrochemiczne i superkondensatory)

Do jednych z najpopularniejszych, najbardziej dostępnych i najlepiej dopracowanych pod względem technologicznym urządzeń do magazynowania energii należą *baterijne zasobniki energii*. Budowa ich opiera się na ogniwach elektrochemicznych, które przetwarzają energię elektryczną w chemiczną i odwrotnie. Aby zwiększyć pojemność zasobnika oraz aby dopasować parametry jego pracy do współpracy z siecią elektroenergetyczną ogniwa łączy się szeregowo i równolegle w moduły.

Ogniwa mogą się różnić materiałem elektrod oraz typem elektrolitu. Do najbardziej popularnych należą akumulatory kwasowo-ołowiowe. Znane są również akumulatory niklowo-kadmowe oraz litowo-jonowe. Najważniejszymi zaletami bateryjnych zasobników energii są: niskie koszty utrzymania, długi czas życia oraz stosunkowo krótki czas reakcji. Wadami są: ograniczona liczba cykli ładowania i rozładowania, stosunkowo mała zawartość energii na jednostkę masy, problemy z elektrolitem (akumulatory kwasowo-ołowiowe) oraz wysoka cena zakupu (akumulatory niklowo-kadmowe, akumulatory litowo-jonowe). Sprawność magazynowania energii dla bateryjnych zasobników energii waha się w granicach od 60 do 97%. W artykule [57] oraz [50] pokazano, że technologie baterijne (BESS) testowane były najczęściej w układach niedopasowanych do rzeczywistych wymagań użytkowników co skutkowało małą efektywnością ekonomiczną proponowanych rozwiązań.

Wykorzystanie kół zamachowych jako układów magazynów energii, staje się powoli alternatywą dla baterii elektrochemicznych [79, 90]. *Koła zamachowe*, zwane też *bateriami kinetycznymi*, to układy, które gromadzą energię w postaci mas wirujących. Urządzenia te składają się najczęściej z maszyny indukcyjnej oraz falownika z układem sterowania [1]. Silnik elektryczny rozpędza obracającą się masę do tysięcy obrotów na minutę. Energię odzyskuje się kiedy rozpędzone, wirujące masy napędzają maszynę elektryczną, która wcześniej służyła jako napęd. Zasobniki energii oparte o koła zamachowe pozwalają na magazynowanie dużej ilości energii i szybki jej zwrot. W odróżnieniu od baterii elektrochemicznych praktycznie nie mają ograniczeń dotyczących liczby cykli ładowania/rozładowania.

Analizując dostępne konstrukcje można zauważyć, że do magazynowania energii wykorzystuje się aktualnie układy wolnoobrotowe (około 6000 obr./min) oraz szybkoobrotowe (do 60000 obr./min).

W układach wolnoobrotowych stosuje się tradycyjny wirnik stalowy z uzwojeniem, który wirując w rozrzedzonym powietrzu na łożyskach mechanicznych akumuluje energię. W układach szybkoobrotowych, z uwagi na bardzo duże naprężenia materiału, jest stosowany wirnik kompozytowy z magnesami trwałymi, wirujący w próżni na poduszce magnetycznej.

Ze względu na dużą masę wirnika i wytwarzaną energię w obwodach elektromagnesów wykorzystywane są nadprzewodniki „wysokotemperaturowe”, które umożliwiają przepływ dużych prądów. Sprawność tego rodzaju zasobników jest bardzo wysoka i sięga 90%. Technologia magazynowania energii w oparciu o koła zamachowe jest cały czas rozwijana. Przewiduje się, że w najbliższym czasie dostępne będą zasobniki o prędkości wirowania wirnika rzędu 60000 obr./min o przewidywanej mocy do 1,5 MW (szacowany czas zwrotu energii do 15 min).

**Tabela 2. Źródła energii pierwotnej i ich konwersja i magazynowanie, [28]**

| Źródła energii                  |           | Rodzaj energii      |                             | Magazynowanie energii      |
|---------------------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Paliwa kopalne                  | Konwersja | Energia elektryczna | Magazynowanie, odzyskiwanie | Baterie                    |
| Paliwa jądrowe                  |           | Ciepło              |                             | Koła zamachowe             |
| Odnawialne źródła energii (OZE) |           | Chłód               |                             | Odwracalne ogniwa paliwowe |
|                                 |           | Transport           |                             | Pola elektro magnetyczne   |
|                                 |           | Energia kinetyczna  |                             | Sprężone powietrze         |



|  |  |                    |  |                     |
|--|--|--------------------|--|---------------------|
|  |  | Sprężone powietrze |  | Zbiorniki ciepła    |
|  |  |                    |  | Elektrownie pompowe |

Alternatywą dla rozwiązań bateryjnych są układy hybrydowe oparte o superkondensatory. Są to urządzenia elektrochemiczne, pozwalające na gromadzenie znacznych ilości ładunku [10]. Proces ładowania i rozładowywania takich układów charakteryzuje się bardzo małą stałą czasową. Ze względu na niskie napięcie znamionowe pojedynczego kondensatora (zwykle  $2,3 \text{ V} \div 2,7 \text{ V}$ ) są one łączone w szeregowo gałęzie, a następnie są łączone równolegle. Przy odpowiednim zestawieniu gałęzi można uzyskać napięcia przewyższające  $230 \text{ V}$  i prądy rozładowania dochodzące do  $500 \text{ A}$ , a nawet więcej. Ważną zaletą jest możliwość wykonania nieograniczonej liczby cykli ładowania i rozładowania bez pogorszenia własności. Określa się, że superkondensatory mają dużą żywotność, co zmniejsza ich koszt utrzymania. Ich własności elektryczne nie degradują się w czasie, mają małą rezystancję wewnętrzną nawet przy połączeniu w zespoły. Sprawność magazynowania energii w superkondensatorach sięga  $98\%$  [23].

Kolejnym urządzeniem, którego konstrukcja pozwala na magazynowanie energii są cewki nadprzewodzące. Urządzenia te zwane są także magnetycznymi zasobnikami nadprzewodnikowymi. Gromadzą one energię w polu magnetycznym cewki wykonanej z nadprzewodnika. Dzięki pracy w niskich temperaturach (do  $20 \text{ K}$ ) straty w uzwojeniu są co do zasady pomijalne. Właściwość ta pozwala uzyskać bardzo duże wartości prądu. Wymiana zmagazynowanej energii może odbywać się nawet tysiące razy bez pogarszania własności elektrycznych elementu magazynującego. Obecnie badane są możliwości wykorzystania nadprzewodników wysokotemperaturowych (do  $70 \text{ K}$ ). W produkcji seryjnej znajdują się niewielkie cewki nadprzewodzące, przeznaczone dla lokalnych odbiorców energii, umożliwiające zgromadzenie ponad  $6 \text{ MJ}$  ( $1,67 \text{ kWh}$ ) energii, co pozwala oddawać przez około  $9 \text{ s}$  moc rzędu  $450 \text{ kW}$  przy stratach w pozostałym okresie.

### 2.3 Samochody elektryczne jako mobilne magazyny energii

Wraz ze wzrostem zainteresowania społeczeństwa jakością powietrza istotne stają się wszelkie metody redukcji zanieczyszczeń w każdej gałęzi gospodarki, a szczególnie

w dziedzinie transportu. Unia Europejska w swych dążeniach do neutralności klimatycznej wspiera rozwój czystej motoryzacji, przedstawiając go jako jeden ze środków realizacji celu zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych (Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu czy też Plan działania dla przemysłu motoryzacyjnego UE na okres do 2020 r.) [36]. Takie działania są jednym z elementów tworzenia inteligentnych sieci elektroenergetycznych a dokładniej wdrażania rozwiązań z rodziny zarządzania stroną popytową tzw. DSM/DSR, gdzie jednym z uczestników nowoczesnego systemu elektroenergetycznego mogą być pojazdy elektryczne.

Pojazdy elektryczne (EV) dzięki swojej budowie mogą zwiększyć rezerwę energii w sieci elektroenergetycznej [16, 35], działając jako mobilne magazyny energii elektrycznej. Pojazdy elektryczne, samochody typu plug-in (PEV) mogą przenieść inteligentną sieć elektroenergetyczną na wyższy poziom. Nie mniej potrzebne są badania dla pokonania ograniczeń takiego wykorzystania pojazdów zarówno pod względem zasięgu jazdy jak i kosztów pojazdów elektrycznych [79]. Ma to istotne znaczenie dla funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

Wykorzystanie pojazdów elektrycznych do rozwiązywania problemów środowiskowych posiada zarówno zalety, jak i wady. Pojazdy elektryczne (EV) emitują mniej dwutlenku węgla, ale jednocześnie powodują szereg problemów w systemach elektroenergetycznych [51]. Jednoczesne ładowanie/rozładowywanie dużej liczby pojazdów może zaburzać jakość dostarczanej energii, a także wpływać na stabilność pracy sieci [63]. Wraz ze zwiększonymi stratami mocy duża liczba pojazdów elektrycznych powoduje także wzrost obecnych szczytów obciążenia zmniejszając zapas przepustowości sieci dystrybucyjnych na wszystkich poziomach napięć. W pracach [27, 18] autorzy podkreślili również, że bez dodatkowych zabezpieczeń nieskoordynowane ładowanie i rozładowanie pojazdów elektrycznych niekorzystnie wpływa na jakość dostarczanej energii (wzrost wskaźnika migotania światła), zaburza równowagę między podażą i popytem energii elektrycznej, wpływając na kontrolę napięcia.

Wykorzystanie zgromadzonej w pojazdach elektrycznych energii elektrycznej do bilansowania przez operatora systemu dystrybucyjnego (OSD) pracy sieci dystrybucyjnych (obcinanie szczytów, wypełnianie dolin, przesuwanie obciążenia) pozwoli na znaczącą poprawę parametrów jakościowych i niezawodnościowych dostaw energii elektrycznej do odbiorcy końcowego (wskaźniki przerw w sieci dystrybucyjnej– SAIDI, SAIFI). Możliwe stanie się także obniżenie kosztów wynikających z niedotrzymania wymaganych parametrów w tym obszarze [32]. Dodatkowo pojawi się możliwość bezpiecznego odstawienia fragmentu

sieci dystrybucyjnej i przejścia do pracy wyspowej w przypadku planowanych i nieplanowanych wyłączeń.

Pewną możliwością jest potraktowanie pojazdów jako klasycznych, ale mobilnych magazynów energii [9]. Autorzy [33, 34] podają, że inna technologia, tzw. „Vehicle-to-grid, jest związana z wykorzystaniem samochodów elektrycznych oraz zgromadzonej w nich energii czy to w bateriach czy ogniwach paliwowych do dostarczania energii na rynek wtórny. Autorzy w obu tych opracowaniach prezentują przykładowe strategie wykorzystania pojazdów do bilansowania lokalnego obszarów, czy też do świadczenia usług opartych na szybkiej odpowiedzi w przypadku zagrożenia stabilności sieci czy też jej uszkodzeń. Dodatkowo, usługa ta może być dodatkowym motywem w zakresie popularyzacji czystej energii i niedrogim acz rozproszonym systemem wielu małych magazynów w systemie energetycznym. Ponadto, autorzy artykułu [26] proponują ramy wspólnego funkcjonowania samochodów elektrycznych i sieci dystrybucyjnych przy wykorzystaniu technologii odzysku energii z pojazdów. Proponują głównie wykorzystanie technologii V2G do redukcji szczytów obciążenia jak również dostarczania usług systemowych dla operatora systemu dystrybucyjnego. Autorzy [26] uważają, że jednym z istotnych problemów przy wyznaczaniu ram prawnych funkcjonowania technologii V2G jest określenie pozycji akumulatorowych systemów magazynowania energii (BESS) na lokalnych rynkach energii. Autorzy wspomnieli o konieczności zakwalifikowania układów BESS do znanych podsektorów energetycznych.

Istotnym problemem jest brak jasnej definicji tego, czym jest magazynowanie energii. Zgodnie z Dyrektywą [61] magazynowanie energii jest to „opóźnienie ostatecznego zużycia energii elektrycznej na chwilę później niż w momencie jej wytworzenia lub energii elektrycznej do postaci energii, która może być magazynowana, a następnie przekształcenie takiej energii w energię elektryczną lub wykorzystanie jej jako innego nośnika energii”. Z kolei magazyn energii definiowany jest jako „obiekt w systemie elektroenergetycznym, w którym następuje magazynowanie energii”. Istotnym aspektem przytoczonej formuły oraz związanej z nią dyrektywy jest fakt, że OSD i OSP nie mogą posiadać magazynów energii. Możliwe jest jednak uzyskanie odstępstwa od UE poprzez spełnienie następujących warunków:

- magazyny muszą być w pełni zintegrowane z siecią energetyczną;
- krajowy organ regulacyjny wyraził zgodę na takie działania;
- innym stronom nie wolno było zakładać ani obsługiwać magazynów energii;

- magazyny energii są niezbędne OSD do wypełniania obowiązków i regulacji wynikających z dyrektywy 2019/944 w celu zapewnienia bezpiecznej pracy systemu elektroenergetycznego;
- obiekty magazynowe nie mogą podlegać grze rynkowej i generować dodatkowych przychodów OSD.

Regulacja magazynowania energii jest podstawową częścią europejskiego procesu zrównoważonego rozwoju w zakresie wykorzystania alternatywnych źródeł energii. Ponieważ technologia V2G wykorzystuje BESS instalowane w samochodach elektrycznych, można wnioskować, że bez odpowiednich regulacji nie będzie można jej sprawnie wdrożyć. Należy również podkreślić, że żadne dokumenty UE dotyczące magazynowania energii nie zawierają bezpośredniej regulacji technologii V2G. Dlatego należy rozumieć, że państwa członkowskie mają swobodę decydowania o wdrożeniu usług V2G, zachowując obecne ramy magazynowania energii.

W obliczu planowanych problemów z zapewnieniem dostatecznego poziomu rezerwy mocy dostępnej dla operatora sieci przesyłowej (OSP), usługi V2G mogą stać się alternatywą do nowatorskich sposobów bilansowania systemu, w ujęciu lokalnym. Jednakże wartym uwagi jest fakt, że struktura obecnego sektora energetycznego będzie wymagała znaczących zmian, tak by zapewnić możliwość korzystania w pełni ze źródeł generacji rozproszonej oraz mobilnych magazynów energii, w tym usług V2G. Dodatkowo w sytuacji stale zwiększającego się zapotrzebowania (postępująca elektryfikacja odbiorców) i problemach związanych z konwencjonalną generacją (przepisy, ekologia, opłacalność, polityka, procesy starzeniowe elementów KSE) wzrasta znaczenie efektywnego zarządzania energią elektryczną zarówno w skali lokalnej jak i krajowej.

Wprowadzenie efektywnie funkcjonującej usługi Vehicle to Grid (V2G) czy Vehicle to Home (V2H) niesie za sobą potencjalne zyski zarówno dla OSD jak i dla właścicieli pojazdów elektrycznych, co może przyczynić się do popularyzacji pojazdów elektrycznych. Rozwój elektromobilności oraz magazynowania energii elektrycznej stwarza problemy polskim operatorom systemów dystrybucyjnych (OSD) nie tylko na gruncie technicznym czy sposobie implementacji we własnej działalności, ale również jest problematyczny z uwagi na brak ram prawnych do zastosowania tej skądinąd interesującej technologii. Wykorzystanie technologii zwrotu energii z pojazdów elektrycznych (V2G) przez OSD nie jest obecnie możliwe w zakresie prawnym.

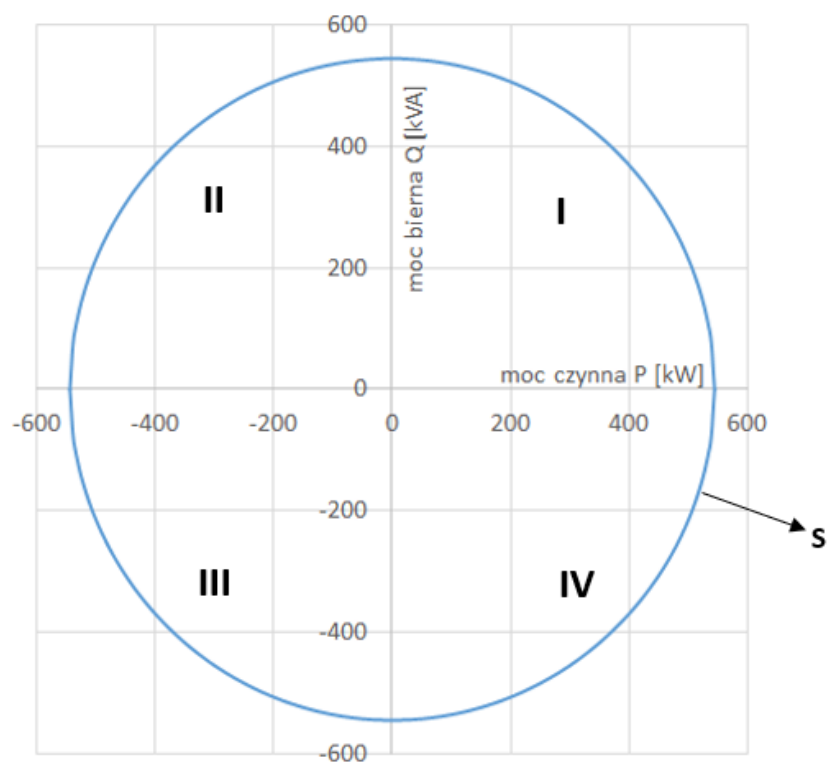
Obecnie na realizację usług opartych o V2G pozwala jedynie standard ładowania CHAdeMO. Ma on bowiem zaimplementowaną dwukierunkową komunikację między

samochodem a ładowarką. Udostępnione są bezpośrednio zaciski stałoprądowe akumulatora trakcyjnego z odpowiednimi zabezpieczeniami. Aby można było potraktować te akumulatory jako rodzaj mobilnych bateryjnych magazynów energii podstawowym warunkiem jest trwałe połączenie z siecią elektroenergetyczną poprzez stacje ładowania pojazdów elektrycznych, umożliwiające dwukierunkowy przepływ energii. Parametry takich układów, ich funkcjonalność, wady, zalety są tożsame z charakterystykami bateryjnych magazynów energii (głównie Li-Ion). Należy jednak zaznaczyć, że podstawową funkcją tych akumulatorów jest zapewnienie zasilania pojazdu, w stopniu pozwalającym na swobodne poruszanie się użytkownikowi po drogach. Z powodu dużej liczby ograniczeń możliwości wykorzystania rozwiązań technologii V2G należy ją traktować jako dodatkową szansę na poprawę pracy sieci, a nie jako główny mechanizm, na którym opierać się będzie w przyszłości stabilność sieci dystrybucyjnych. Vehicle-to-Grid/-to-Home jest sposobem na wykorzystanie potencjału do magazynowania energii, który będzie się zwiększał w sieci niejako „samoistnie” wraz z postępującym rozwojem elektromobilności, podczas gdy stacjonarne magazyny są rozwiązaniem dużo bardziej niezawodnym i stanowić może standardowy element nowoczesnej infrastruktury elektroenergetycznej [10].

Aby możliwe było zastosowanie komercyjne technologii V2G wymagane są trzy elementy [4]:

- połączenie z siecią OSD, niezbędne do przepływu energii elektrycznej od pojazdu do sieci;
- sterowanie lub logika, potrzebne operatorowi sieci do określić dostępnej ilości możliwej do wykorzystania przez OSD;
- dokładny pomiar energii dostępnej w pojeździe.

Na rysunku 3 przedstawiono obszar pracy układu V2G, tj. obszar pracy układu ładowania pojazdu, które ograniczone są mocą pozorną ( $S$ ). Na rysunku obszar I oraz IV odpowiada za ładowanie a II i III za oddawanie energii do sieci.



**Rys. 3. Obszar pracy układu V2G, gdzie: S-moc pozorna, obszar I i IV odpowiada za ładowanie, obszar II i III za oddawanie energii do sieci.**

Włączenie systemów ładowania pojazdów do sieci dystrybucyjnej i zapewnienie ciągłości dostaw klientom stawia również przed operatorami systemów dystrybucyjnych szereg nowych wyzwań związanych z rozbudową sieci, a także zapewnianiem odbiorcom dostaw energii w sposób ciągły. Kolejnym zadaniem OSD wynikającym z wdrożenia stacji ładowania pojazdów w sieci niskiego napięcia jest potrzeba dynamicznej rekonfiguracji sieci elektroenergetycznej [89]. Podejmowanie właściwych decyzji dotyczących przełączania wymaga zastosowania technologii Smart Grid, w tym gromadzenia danych przesyłanych zdalnie i ich analizy

Dynamiczny rozwój systemów ładowania pojazdów nie będzie możliwy bez postępu w budowie stacji ładowania przystosowanych do dwukierunkowego przepływu energii, ale także nie będzie możliwy bez zmiany nawyków użytkowników pojazdów elektrycznych i zmian legislacyjnych skorelowanych z tym zjawiskiem.

## 2.4 Sposoby sterowania zasobnikami energii

Potencjalne scenariusze związane ze sterowaniem i pracą zasobników energii muszą uwzględniać wiele zmiennych i dokonywać ich analizy często na podstawie wielu kryteriów,



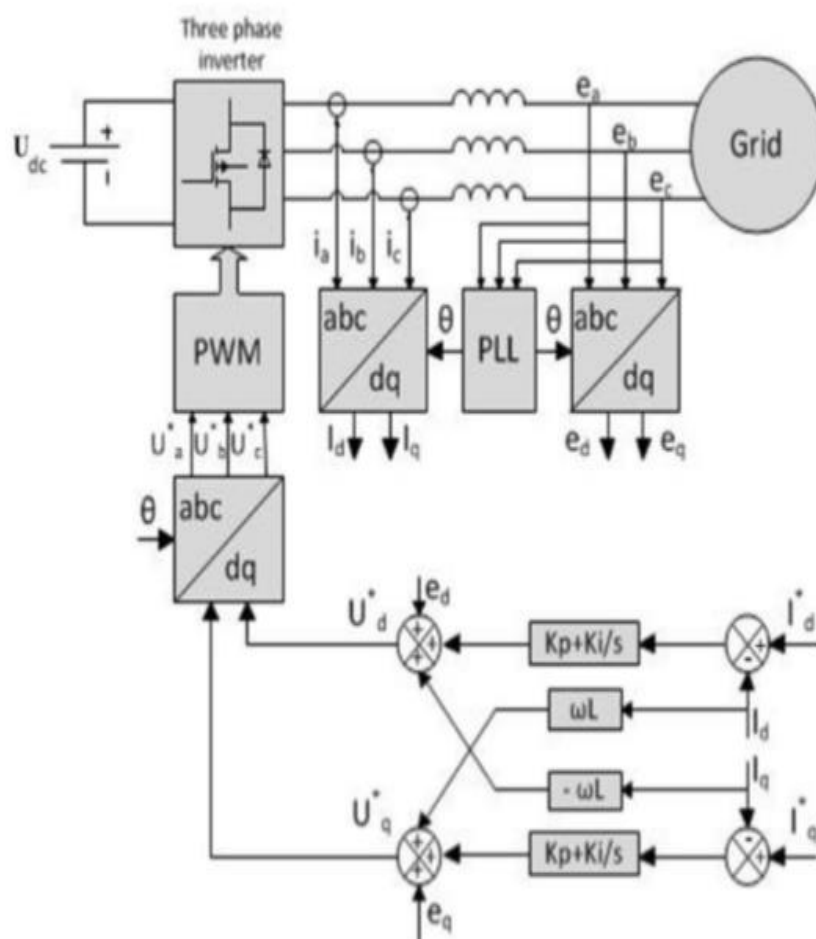
takich jak: straty energii, poziomy napięcie, niezawodność zasilania itp. Dodatkowo oprócz aspektów technicznych istotne są czynniki ekonomiczne determinujące w dłuższym horyzoncie czasowym opłacalność inwestycji.

O przepływie energii z magazynu energii do systemu elektroenergetycznego, jej wielkości i kierunku zawsze decyduje urządzenie sprzęgające element magazynujący z siecią. W dużych układach elementem sprzęgającym mogą być turbozespoły, zaś w mniejszych, są to przekształtniki energoelektroniczne. Źródła takie jak moduły fotowoltaiczne, ogniwa paliwowe, zasobniki czy mikroturbiny są zwykle przyłączane do sieci przez dedykowany przekształtnik przetwarzający prąd stały, wytwarzany przez te źródła w prąd przemienny [3]. Zaawansowane układy energoelektroniczne pozwalają na coraz lepsze przystosowanie wymienionych źródeł do pracy w sieci energetyki zawodowej i są projektowane tak, aby maksymalnie wykorzystać charakterystykę danego mikroźródła oraz zapewnić bezpieczną pracę zarówno samego urządzenia jak i sieci zasilającej. Dzięki takiemu podejściu do projektowania przekształtników, możliwa jest wysokosprawna transformacja energii. Dodatkowo przekształtniki powinny spełniać szereg wymagań, m.in. umożliwiać śledzenie mocy generatora i regulację napięcia, umożliwiać konwersję DC/AC, posiadać interfejs synchronizacji z siecią, system sterowania i nadzoru oraz systemy zabezpieczeń.

Konieczność stosowania energoelektronicznych urządzeń sprzęgających i rosnąca ich liczba w sieci wpływa na parametry jakościowe sieci zasilającej, w tym na zwiększanie się odkształceń napięcia [28]. Mimo stosowania w przekształtnikach filtrów wyższych harmoniczych nie jest możliwa ich całkowita eliminacja. Pozytywnym zjawiskiem w tej sytuacji jest zmniejszanie się impedancji zwarciowej dla kolejnych wyższych harmoniczych przez generatory synchroniczne i indukcyjne połączone bezpośrednio z siecią, co prowadzi do ograniczenia zawartości wyższych harmoniczych w przebiegu napięcia. Zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego do podłączenia mikroźródła do sieci wpływa na możliwości jego przeciążania. Przekształtniki energoelektroniczne są bardzo czułe na przeciążanie. W zależności od klasy przekształtnika tolerowane jest jego krótkotrwałe przeciążenie wynoszące z reguły nie więcej niż dwukrotna wartość prądu znamionowego w czasie kilku sekund. Zmniejszenie stopnia przeciążenia wydłuża dopuszczalny czas pracy przekształtnika, zmiana ta jednak nie jest duża, ze względu na ograniczoną pojemność cieplną elementów półprzewodnikowych.

Podstawowym typem przekształtnika stosowanym w mikro źródłach jest dwukierunkowy falownik napięcia, który może pracować zarówno jako generator i odbiornik. W układach stosowanych w zasobnikach energii falownik oprócz mocy czynnej może generować lub

pobierać także moc bierną. O amplitudzie i przesunięciu przepływającego prądu decydują specjalizowane układy sterowania, które zawierają w sobie regulatory prądu, napięcia i mocy. Od strony elementu magazynującego falownik wymusza ładowanie bądź rozładowanie poprzez zmianę poziomu napięcia obwodu prądu stałego, co pociąga za sobą zmianę kierunku przepływu mocy. Żeby jednak ten proces mógł być realizowany, do układów regulacji należy przesłać informację o zadanej wielkości mocy, głównie czynnej, ale również biernej. Na podstawie wielkości zadanych oraz bieżących pomiarów stanu układu oraz z uwzględnieniem ograniczeń wewnętrznych (np. prądów maksymalnych urządzeń magazynujących) realizowane jest sterowanie tranzystorami przekształtnika, które ma dać oczekiwany rezultat w postaci przepływu mocy. W wypadku falowników instalowanych w zasobnikach energii, pracujących synchronicznie z siecią, najczęściej stosuje się metodę regulacji mocy PQ. Zapewnia ona łatwą kontrolę nad przepływem określonej mocy do lub z sieci. Metoda ta polega na zadaniu bezpośrednio dwóch niezależnych wartości: mocy czynnej oraz mocy biernej. Następnie wartości te są przeliczane na odpowiednie składowe prądu: składową czynną, będącą w fazie z napięciem sieci, oraz składową bierną, przesuniętą względem napięcia sieci o  $90^\circ$ . Do wykonania obliczeń niezbędne jest zastosowanie przekształceń Clarke i Parka. Przy tym sterowaniu falownik zachowuje się jak generator synchroniczny, w którym bezpośrednio reguluje się kąt napięcia generatora względem napięcia sieci. Ta technika jest nazywana VOC, ang. voltage oriented control i została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania falownika metodą VOC [44]

Najprostszym sposobem systemowego sterowania układem zasobnikowych jest zadawanie wartości kluczowych parametrów z systemów dyspozytorskich, gdzie wylicza się wartości zadane dla wszystkich jednostek generacyjnych. Jednak w wypadku małych systemów proces ten musi odbywać się automatycznie. W wypadku zasobnika energii sprawa nie jest tak prosta, ponieważ cel regulacji nie jest oczywisty. Wszystkie sposoby sterowania układem wymagają, żeby zasobnik mógł wykonywać pomiary mocy i napięcia w wybranych punktach sieci, również oddalonych od zasobnika. Głównym parametrem wymagającym nadzoru podczas pracy układów magazynowania jest kontrola stanu naładowania układu, tzw State of charge (SOC) [74]. Niezależnie od wybranej technologii autorzy rekomendują taką pracę układu, aby wartość naładowania mieściła się w granicach 30-70%. Autorzy proponują aby algorytm sterujący śledził wartość SOC oraz prąd pobierany z magazynu i porównywał z dopuszczalnymi, zadanymi wartościami.

Zasobniki często też są wykorzystywane do szybkiej regulacji częstotliwości. Zadawanie mocy czynnej odbywa się z wykorzystaniem statycznej charakterystyki uchybowej, która wiąże moc czynną ze zmianą częstotliwości. Sterowanie mocą czynną może być uzupełnione o element regulacji mocy biernej poprzez implementację zależności napięcia w węźle przyłączenia i mocy biernej.

Innym sposobem jest bezpośrednia regulacja mocy w danym węźle. Ładowanie magazynu powiązane jest z parametrami wewnętrznymi układu oraz założonej mocy jaka ma być wymieniana w zdefiniowanym węźle. Zasobnik mierzy moc czynną i generuje bądź pobiera moc czynną tak, aby moc w węźle:

- pozostawała na zadanym poziomie,
- była nie niższa niż zadana wartość,
- była nie wyższa niż zadana wartość.

Zgodnie z [93], od 2016 na terenie całej Unii Europejskiej implementowany jest kodeks NC RfG. Kodeks ten określa wymagania dotyczące przyłączania do sieci modułów wytwarzania energii, a mianowicie synchronicznych modułów wytwarzania energii, modułów parku energii oraz morskich modułów parku energii, do systemu wzajemnie połączonego. Kodeks ustanawia obowiązki zapewniające właściwe wykorzystanie zdolności modułów wytwarzania energii przez operatorów systemów w przejrzysty i niedyskryminacyjny sposób w celu zapewnienia równych szans podmiotom w całej Unii.

Warto tu zwrócić uwagę, że w świetle obowiązującego prawa, falowniki zasobnika muszą pozwalać na implementację sterowania mocą czynną i bierną według wymagań kodeksu sieciowego NC RfG. Działanie to powinno być niezależne od sterowania mocą, wynikającego z realizacji funkcji zasobnika [89]. Kodeks sieci NC RfG w zależności od wielkości zasobnika narzuca reakcję na podwyższenie/obniżenie napięcia zasilającego, określa kształt wymaganego profilu pozostania w pracy podczas zwarcia (krzywa LVRT, ang. low voltage ride through) czy też zadziałanie zabezpieczeń urządzenia

Może też wystąpić konflikt pomiędzy realizacją założonych funkcji przez użytkownika zasobnika, a realizacją wymagań kodeksu RfG. Obowiązek implementacji i potwierdzenia zgodności falowników z kodeksem NC RfG poprzez dostarczenie certyfikatu potwierdzającego spełnienie wymogów kodeksu NC RfG weszło w życie 1 maja 2022 r.

W literaturze [47], przedstawiony został przykładowy algorytm sterowania zasobnikiem w układzie z generacją rozproszoną i wymianą energii z systemem dystrybucyjnym, dzięki

któremu, przy odpowiednio skorelowanych i dobranych parametrach, możliwe jest sterowanie przepływem energii w węźle tak aby minimalizować wahania mocy czy też pobierać stałą moc z systemu elektroenergetycznego. Wariacja powyższego sposobu jest tzw. regulacja nachylenia mocy (ang. ramp rate control). Polega ona na takim sterowaniu zasobnikiem, żeby moc przepływająca w węźle zmieniała się z ograniczoną szybkością. Zadaje się dopuszczalna prędkość zmian mocy czynnej i zasobnik generuje lub pobiera moc tak, aby nie przekroczyć tych wartości. Dalszym krokiem jest implementacja bardziej zaawansowanych algorytmów. Można tu wymienić minimalizację współczynnika migotania światła. Zasobnik jest sterowany w ten sposób, żeby wartość tego współczynnika zmniejszała się.

Dodatkowo układ zarządzania zasobnikiem realizuje w różny sposób następujące funkcje, mające na celu ograniczenie starzenia elementów magazynujących i optymalizację kosztów:

- ograniczenie prądu ładowania, rozładowania do wartości wskazanych przez sterownik el. magazynującego,
- ograniczenie głębokości rozładowania,
- ograniczenie liczby cykli,
- ograniczenie kosztu energii pobranej z sieci.

Literatura, [87, 34], prezentuje też możliwość sterowania zasobnikami energii poprzez regulację napięcia w układzie DC czy też sterowanie ślizgiem (ang. sliding mode control). Jest to metoda sterowania układami nieliniowymi, która zmienia dynamikę układu nieliniowego poprzez zastosowanie nieciągłego sygnału sterującego. Autorzy [25, 41], prezentują dwukierunkowy układ, który kontrolowany jest z zastosowaniem histerezy tak aby wydłużyć ilość cykli ładowania zastosowanych baterii.

Znane są również inne, rzadko stosowane metody [64], które w swoich algorytmach mają za zadanie poprawę dynamiki pracy falowników. Są to metody:

- VFOC – virtual flux oriented control,
- ABH – adaptive band hysteresis,
- DPC – direct power control.

Metoda VFOC polega na całkowaniu sygnałów składowych  $d$  i  $q$  i dzięki temu eliminacji konieczności stosowania pętli PLL, co poprawia dynamikę. Metoda ABH pozwala na usunięcie regulatorów prądu i zmianę modulatora z wektorowego na histerezowy, co również poprawia dynamikę. Ostatnia metoda polega na wyeliminowaniu z VOC regulatorów prądu, co także poprawia dynamikę i zmniejsza niezbędne zasoby sterowników.

## 2.5 Koszty magazynowania energii

Ze względu na różnorakie zastosowanie systemów magazynowania energii oraz trudne do porównania wdrożenia, istotne jest właściwe określenie lokalizacji i pojemności takich układów. Zarówno inwestorzy jak i autorzy licznych publikacji [12, 54] zadają sobie często pytania: *jaki jest najlepszy harmonogram pracy układu aby zysk był jak największy? Jaki jest wpływ magazynowania energii na ograniczenia sieciowe?* Odpowiedzi na te pytania zależne są przede wszystkim od lokalizacji geograficznej układu magazynowania, jego pojemności, efektywności zachodzących zjawisk oraz sposobu przyłączenia do sieci. Analizy literatury pokazują, że wyróżnić możemy następujące kluczowe aspekty ekonomiczne magazynów energii:

- wykorzystanie magazynów do poprawy niezawodności pracy sieci na poziomie sieci dystrybucyjnych i mikrosieci [16, 4];
- wykorzystanie magazynów energii do poprawy opłacalności ekonomicznej źródeł rozproszonych [31, 32];
- wykorzystanie magazynów do udziału w rynku energii [92,56,77].

Ocenę ekonomiczną i oczekiwaną pojemność ESS omówiono m.in. w [50, 43, 78]. W artykułach tych pokazano algorytm łączący wielopasmowe programowanie dynamiczne w celu maksymalizacji oszczędności kosztów i korzyści z powodu różnic cen energii między okresami obciążenia szczytowego i obciążenia w dolinach. Badania w [92] oraz [14] przedstawiły metodologię optymalizacji lokalizacji i analizę opłacalności urządzeń do przechowywania energii w niskonapięciowym ~~prądowym~~ systemie mikrosieci. W [13] przedstawiono skuteczną technikę optymalizacji algorytmu genetycznego (GA) opartą na funkcji wielu celów, celem dokonania oceny wpływ kosztów związanych z magazynowaniem energii na bieżącą wartość netto instalacji magazynowania energii w stacjach elektroenergetycznych.

Nie bez znaczenia dla istoty problemu kosztów związanych z magazynowaniem stają się koszty związane z cyklami pracy układów [29]. Autorzy przedstawili zależności między częstością ładowania i rozładowania układu a czasem życia. Dodatkowo zależności te zostały wprowadzone do modelu pozwalającego zmaksymalizować korzyści na rynku dnia następnego. Pozwoli to inwestorom na podjęcie lepszych decyzji związanych z rynkiem energii z uwzględnieniem kondycji układu, jego pojemności oraz wartości ekonomicznej.

Integracja rozproszonych źródeł z siecią elektroenergetyczną może potencjalnie wpłynąć na działanie systemów dystrybucyjnych, wpływając na niezawodność pracy sieci jak i na jakość zasilania klienta końcowego. W artykule [56] autorzy zaprezentowali sposób na dostosowanie stochastycznego charakteru źródeł OZE ze stabilną siecią dystrybucyjną za pomocą systemów magazynowania energii, zapewniając ekonomiczne korzyści dla systemów dystrybucji. W artykule przedstawiono nowatorskie podejście do skutecznego wykorzystania systemu magazynowania energii w celu złagodzenia zmiennej natury wytwarzania energii z fotowoltaiki (PV) poprzez wdrożenie systemu magazynowania energii opartego na litowo-jonowym systemie magazynowania energii w celu zwiększenia korzyści w zasilaczu dystrybucyjnym. W tym celu wykorzystano model optymalizacji wypukłej, którego praca charakteryzowała się:

- unikaniem pozostawiania akumulatora w stanie wysokiego naładowania przez długi czas, co mogło wpływać to na cykl życia akumulatora;
- unikaniem wysokiego tempa ładowania/rozładowania;
- unikaniem częstych zmian szybkości ładowania/rozładowania;
- unikaniem ładowania/rozładowania dwa razy dziennie [56].

Nakłady niezbędne do wykorzystania technologii magazynowania energii są w dużej mierze zależne od wybranej technologii i skali przedsięwzięcia. *Magazynowanie jest opłacalne wówczas, gdy końcowy koszt wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach cieplnych szczytowych jest większy niż wynosi koszt przechowywania i odzyskiwania energii powiększony o koszt energii która tracona jest w procesie magazynowania* [48]. Finalny koszt produkcji energii elektrycznej jest zmienny i zależny od źródła jego generacji. Elektrownie jądrowe i węglowe produkują taną energię z uwagi na cenę paliwa a głównym składnikiem ceny produkowanej energii jest wartość amortyzacji elektrowni. Dodatkowo pracują one w podstawie obciążenia systemu. Układy oparte o turbiny gazowe produkują droższą energię z uwagi na pracę interwencyjną w szczycie obciążenia systemu oraz wysoką cenę paliwa gazowego. Zaś źródła odnawialne, oparte o niestabilne, szybkozmienne i trudne do przewidzenia warunki atmosferyczne potrafią zarówno powodować wzrost cen energii jak też i spadek z uwagi na nadpodaż. Z uwagi na te czynniki istotne jest określenie czy zastosowanie układów magazynowania w systemie elektroenergetycznym jest opłacalne.

W ślad za literaturą [81] koszt magazynowania energii można odnieść do okresu eksploatacji LCOES (ang. Levelized Cost of Energy Stored) i można obliczyć z formuły:

$$LCOES = \frac{CAPEX}{qN} \quad (1)$$

gdzie:

CAPEX – nakłady inwestycyjne [PLN]

$q$  – zdolność magazynowania [MWh/cykl]

$N$  – [liczba cykli w roku].

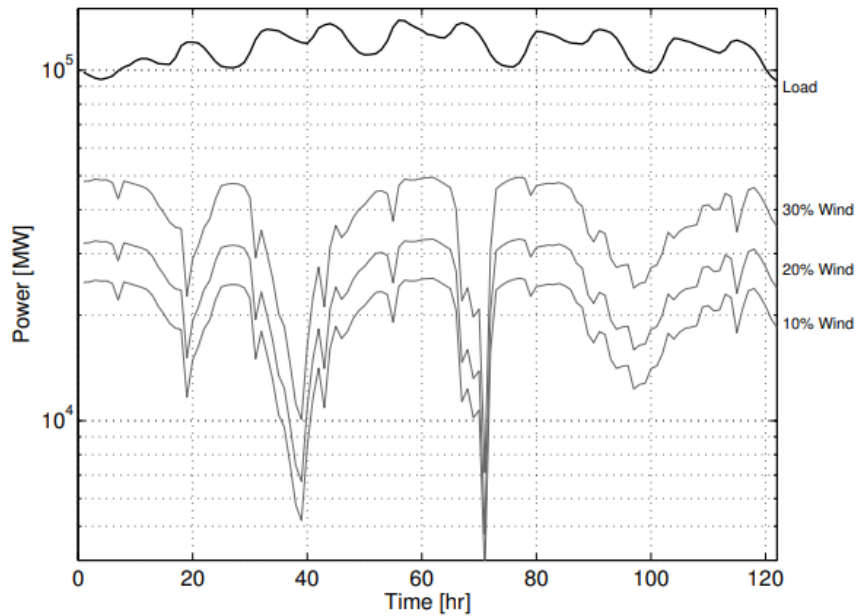
W pracy [81] autorzy przykładowo podają, że, jeśli cena energii elektrycznej w godzinach szczytu sięga 800 zł/MWh, a w nocy spada do 80 zł/MWh, to różnica w wysokości 720 zł/MWh może być potencjalnym zyskiem magazynu energii. Magazyn energii działający z efektywnością 70% będzie opłacalny, jeśli jego koszt użytkowania będzie mniejszy niż 504 zł/MWh.

Większość obecnej literatury, traktuje magazynowanie energii jako układy o stałej efektywności zachodzących procesów i zerowych kosztach operacyjnych [60,79,45]. Zasadne jest zastosowanie takich modeli kosztowych działania układów, które w swych parametrach obejmować będą nie tylko liczbę cykl, ale również stan życia układu (ang. State Of Health) i koszty operacyjne jako funkcję od efektywności zachodzących procesów w układzie.

Z punktu widzenia OSD nie jest to właściwe podejście, gdyż budowa zasobników energii jako proces inwestycyjny wiąże się z dodatkowymi kosztami powiązanymi z budową układu (prace projektowe, zezwolenia, zakup i montaż urządzeń, etc), ale również generuje koszty związane z pracą zasobników czasie.

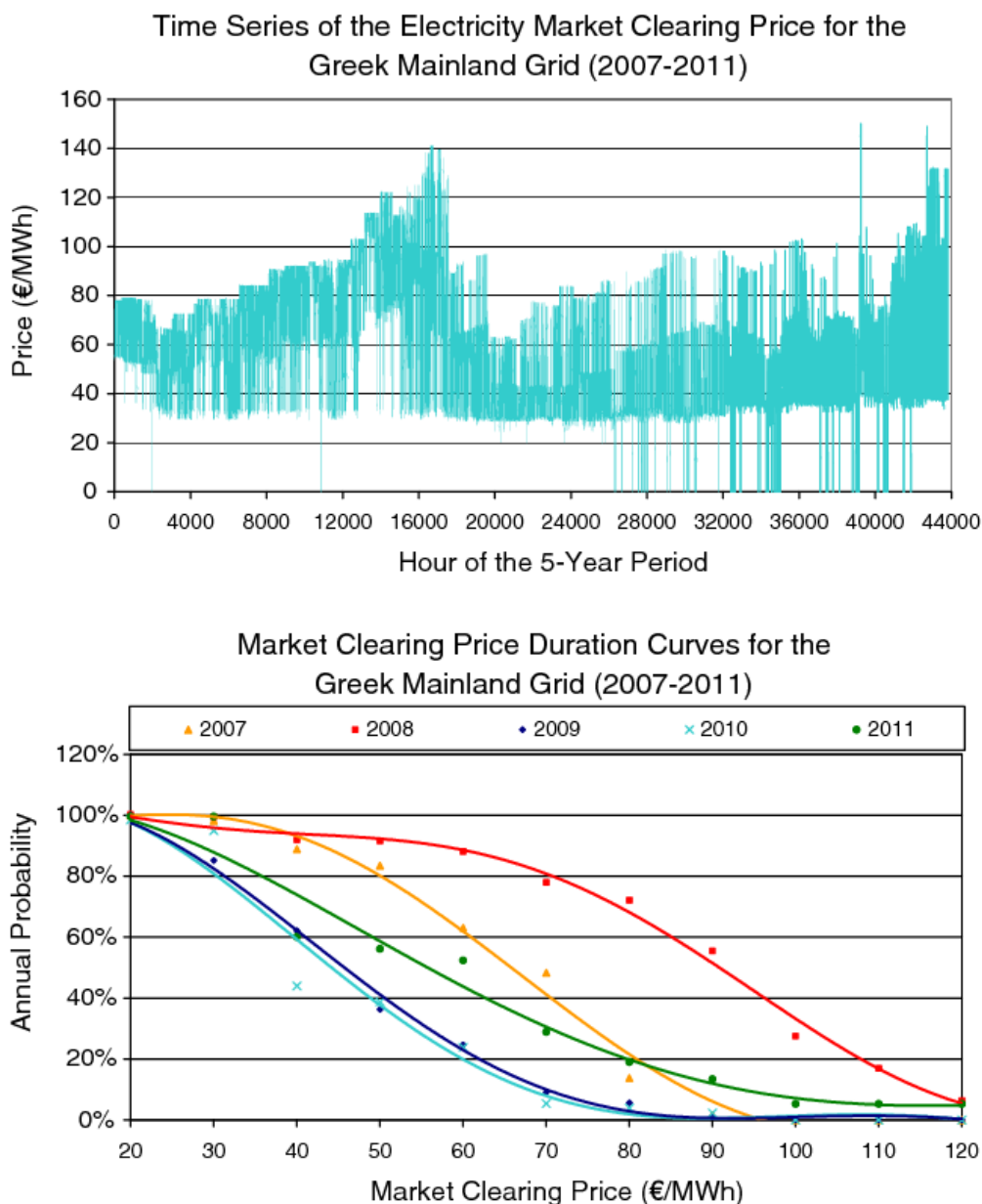
Autorzy pracy [45] przedstawili skalowalne podejście i implementację do rozwiązywania problemów systemów energetycznych w warunkach nieciągłości przepływu energii. Programowanie stochastyczne służy do podejmowania decyzji w teraźniejszości przy jednoczesnym wprowadzeniu modelu niepewności co do przyszłych wydarzeń, których z czasem może przybywać. W związku z tym, może to powodować konieczność zastosowania obliczeń równoległych, uwzględniających złożoność systemu i planowania. W tym celu autorzy [45] przedstawili nowatorskie rozwiązanie wykorzystujące hybrydową implementację równoległą PIPS, która jest oparta na metodach punktów wewnętrznych i wykorzystuje godzinowe prognozy wiatru i szczegółowy fizyczny model przepływu mocy, co zostało przedstawione na rysunku 5.





Rys. 5 Charakterystyka zmienności wiatru od mocy

Autorzy [88] wyraźnie podkreślili rolę magazynowania energii w łańcuchu dostaw energii elektrycznej. Jednakże brak zintegrowanych ram wyceny usług świadczonych przez technologie magazynowania energii, głównie ze względu na ich złożoność i niestabilność, przyczyniły się do rezygnowania z tych inwestycji. W tym celu autorzy podjęli się zbadania wykonalności alternatywnej strategii działania systemów magazynowania energii (ESS), opartej na wykorzystaniu nadwyżki energii wiatru. Dokładniej rzecz ujmując, wycenę dostępnych opcji polityki promowania ESS opartych na energii wiatrowej przeprowadza się poprzez zastosowanie po raz pierwszy kompleksowego społeczno-ekonomicznego modelu kosztów i korzyści, który uwzględnia m.in. dotacje na inwestycje początkowe i taryfy gwarantowane (FiT) dla ESS. Przeanalizowano magazynowanie energii pompowanej wody i sprężonego powietrza pokrywające zapotrzebowanie szczytowe, wykazując, że takie systemy mogą okazać się opłacalne. Na rysunku 6 przedstawiono zmianę ceny rozliczeniowej rynku energii elektrycznej w latach 2007–2011.



Rys. 6 Godzinowa zmiana ceny rozliczeniowej rynku energii elektrycznej w latach 2007–2011, [88]

Autorzy [90] stwierdzili, że stosowanie na dużą skalę przerywanej/nie stabilnej energii odnawialnej może wiązać się z nowymi wyzwaniami w systemach elektroenergetycznych i większą zmiennością cen energii na zliberalizowanych rynkach energii elektrycznej. Taką nierównowagę może zmniejszyć magazynowanie energii, zmniejszając przeciążenie sieci i promując wytwarzanie rozproszone. Jednakże, wiele autorów literatury podaje, że ekonomiczne aspekty technologii magazynowania energii elektrycznej na skalę sieciową są niejasne dla ekspertów, operatorów sieci energetycznych, regulatorów i producentów energii. W tym celu, autorzy [90] dokonali analizy istniejącej literatury dotyczącej kosztów cyklu życia systemów magazynowania energii elektrycznej na skalę użytkową, zapewniając

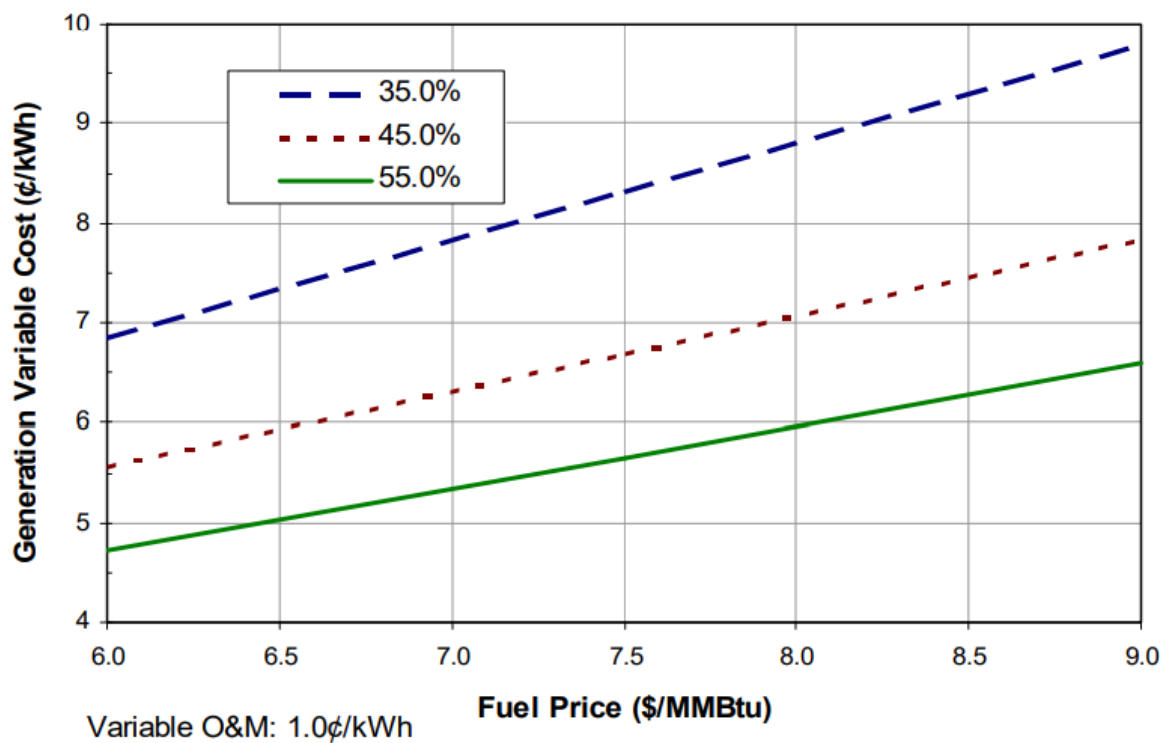
zaktualizowaną bazę danych elementów kosztów (koszty kapitałowe, koszty operacyjne i koszty utrzymania oraz koszty wymiany). Ponadto przeanalizowane zostały koszty cyklu życia i uśredniony koszt energii elektrycznej dostarczanej przez magazyny energii elektrycznej, z wykorzystaniem metody Monte Carlo w celu uwzględnienia niepewności/nieciągłości. Badane technologie magazynowania energii dotyczyły magazynowania energii w elektrowniach wodnych, magazynowanie energii sprężonego powietrza (CAES), koło zamachowe, akumulatory elektrochemiczne (np. kwasowo-ołowiowe, NaS, Li-ion i Ni-Cd), akumulatory przepływowe (np. wanadowo-redoks), nadprzewodnictwo magazynowanie energii magnetycznej, superkondensatory i magazynowanie energii wodorowej (technologie power to gas). Przedstawione wyniki ilustrują ekonomiczność różnych systemów magazynowania dla trzech głównych zastosowań: masowe magazynowanie energii, usługi wsparcia oraz regulacja częstotliwości. W tabeli 3 przedstawiono całkowity koszt kapitału systemów EES w skali sieciowej na podstawie przeglądu literatury.

**Tabela 3. Całkowity koszt kapitału (TCC) systemów EES w skali sieciowej na podstawie przeglądu literatury, [86]**

| EES technology  | Configuration                 | Total capital cost <sup>a</sup> (TCC), per unit of power rating €/kW |             |      | Total capital cost (TCC), per unit of storage capacity <sup>b</sup> €/kWh |             |       |
|-----------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|------|---------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|
|                 |                               | Min                                                                  | Average     | Max  | Min                                                                       | Average     | Max   |
| PHS             | Conventional                  | 1030                                                                 | <b>1406</b> | 1675 | 96                                                                        | <b>137</b>  | 181   |
| CAES            | Underground                   | 774                                                                  | <b>893</b>  | 914  | 48                                                                        | <b>92</b>   | 106   |
|                 | Aboveground                   | 1286                                                                 | <b>1315</b> | 1388 | 210                                                                       | <b>263</b>  | 278   |
| Flywheel        | High-speed                    | 590                                                                  | <b>867</b>  | 1446 | 1850                                                                      | <b>4791</b> | 25049 |
| Lead-acid       | Advanced                      | 1388                                                                 | <b>1923</b> | 3254 | 346                                                                       | <b>457</b>  | 721   |
| NaS             | –                             | 1863                                                                 | <b>2254</b> | 2361 | 328                                                                       | <b>343</b>  | 398   |
| ZEBRA           | –                             | 2279                                                                 | <b>3376</b> | 4182 | 596                                                                       | <b>699</b>  | 808   |
| Li-ion          | –                             | 874                                                                  | <b>1160</b> | 1786 | 973                                                                       | <b>1095</b> | 1211  |
| VRFB            | –                             | 2109                                                                 | <b>2512</b> | 2746 | 459                                                                       | <b>546</b>  | 560   |
| Zn–Br           | –                             | 1277                                                                 | <b>1360</b> | 1649 | 257                                                                       | <b>307</b>  | 433   |
| Fe–Cr           | –                             | 1099                                                                 | <b>1132</b> | 1358 | 170                                                                       | <b>220</b>  | 281   |
| Ni–Cd           | –                             | 927                                                                  | <b>1093</b> | 1308 | 1071                                                                      | <b>1147</b> | 1153  |
| PSB             | –                             | 1376                                                                 | <b>1400</b> | 1425 | 527                                                                       | <b>569</b>  | 611   |
| Zn–air          | –                             | 1313                                                                 | <b>1364</b> | 1415 | 262                                                                       | <b>271</b>  | 417   |
| Supercapacitors | Double-layer                  | 214                                                                  | <b>229</b>  | 247  | 691                                                                       | <b>765</b>  | 856   |
| SMES            | –                             | 212                                                                  | <b>218</b>  | 568  | 5310                                                                      | <b>6090</b> | 6870  |
| Hydrogen        | Fuel cell <sup>c</sup> (FC)   | 2395                                                                 | <b>3243</b> | 4674 | 399                                                                       | <b>540</b>  | 779   |
|                 | Gas turbine <sup>d</sup> (GT) | 1360                                                                 | <b>1570</b> | 2743 | 227                                                                       | <b>262</b>  | 457   |

Autorzy [23] wykazali, że całkowity koszt operacyjny magazynowania (w odróżnieniu od kosztu kapitałowego zakładu lub kosztów bilansowych) składa się z dwóch kluczowych elementów: 1) kosztów związanych z energią oraz 2) kosztów operacyjnych niezwiązanych z energią, tj.: robocizną związaną z eksploatacją, konserwacją, zużycie sprzętu oraz koszty likwidacji i utylizacji.

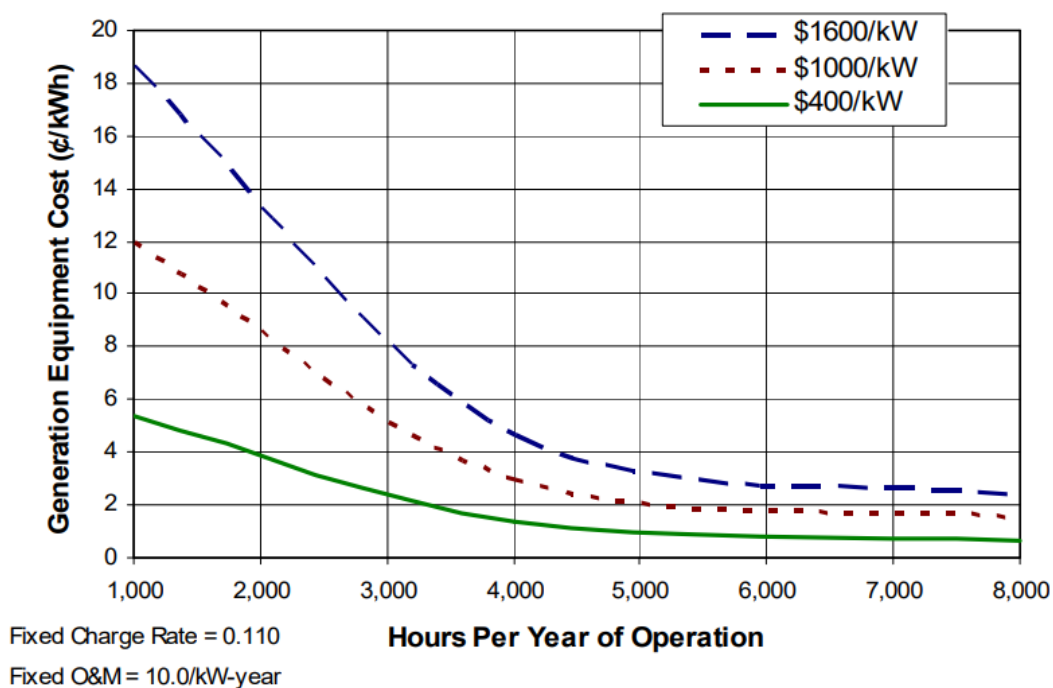
Na rysunkach 7 i 8 zostały przedstawione wartości ogólne dla dwóch kluczowych składników jednostkowego kosztu energii: paliwa i kosztu magazynowania.



Rys. 7 Charakterystyka wpływu ceny paliwa na cenę energii elektrycznej dla różnych sprawności konwersji, [23]

Rysunek 8 ilustruje, w jaki sposób cena paliwa i wydajność konwersji paliwa wpływają na cenę energii elektrycznej. Trzy wykresy na rysunku przedstawiają trzy wartości sprawności konwersji: 35%, 45% i 55%.

Rysunek 8 pokazuje, jak koszt kapitału zakładowego wpływa na cenę energii elektrycznej. Trzy wykresy na tym rysunku reprezentują trzy wartości kosztów instalacji generacji: 400 USD/kW, 1000 USD/kW i 1600 USD/kW.



Rys. 8 Charakterystyka wpływu kosztu kapitału zakładu produkcyjnego na cenę energii elektrycznej, [23]

W wielu pozycjach literatury, opracowane zostały specjalnie algorytmy i zalecenia w celu wykorzystania arbitrażu cenowego energii zmagazynowanej w różnych układach, które mogą służyć różnym aplikacjom, np. do:

- 1) zwiększenia pojemności sieci;
- 2) odciążenie transformatora stacji SN/nN;
- 3) poprawy niezawodność/ stabilności świadczonych usług;
- 4) poprawy jakości dostarczanej energii elektrycznej.

Analizując dostępne technologie oraz zmieniające się koszty magazynowania zauważalne jest, że zastosowanie technologii magazynowania energii może przynieść wszystkim uczestnikom rynku energii wiele korzyści.

### 3 CEL I ZAKRES PRACY

#### 3.1 Problem badawczy/ Teza

Praca jest opracowywana w ramach doktoratu wdrożeniowego w przedsiębiorstwie Stoen Operator i dotyczy regulacji przepływu energii w sieci nN za pomocą mobilnych i stacjonarnych zasobników energii. W związku z tym została przeprowadzona analiza potrzeb warszawskiego operatora systemu dystrybucyjnego w zakresie dostarczania energii do odbiorców końcowych o wysokich parametrach jakościowych. Ponadto, przeanalizowano dostarczanie energii w sposób ciągły i niezakłócony. Wyniki analizy wykazały potrzebę uzyskania odpowiedzi jak wykorzystać mobilne i stacjonarne zasobniki energii dla technicznej i ekonomicznej poprawy funkcjonowania warszawskiej sieci rozdzielczej.

W tym celu, została postawiona teza, że:

***wykorzystanie mobilnych i stacjonarnych bateryjnych zasobników energii w dystrybucyjnych sieciach elektroenergetycznych niskich napięć przyczyni się do technicznej i ekonomicznej poprawy funkcjonowania warszawskiej sieci rozdzielczej.***

#### 3.2 Cel i zakres pracy

Na bazie przeglądu literatury i aktualnie badanych, analizowanych zagadnień związanych z magazynowaniem energii, jak również trendów panujących w elektroenergetyce widać, że istnieje potrzeba znalezienia rozwiązania kilku podstawowych problemów funkcjonowania operatora systemu dystrybucyjnego takich jak:

- 1) dostarczanie energii do klientów końcowych w sposób niezakłócony/ ciągły/ stabilny;
- 2) zapewnienie jak najlepszych parametrów jakościowych dostarczanej energii;
- 3) dystrybucja energii powinna odbywać się w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony;
- 4) przyłączanie nowych odbiorców musi odbywać się w czasie i w sposób uzasadniony ekonomicznie.

W trakcie analizy funkcjonowania systemu elektroenergetycznego w Polsce można zauważyć, że istnieje coraz więcej problemów związanych m.in. z dynamicznym rozwojem odnawialnych źródeł energii, których pośrednim rozwiązaniem jest tymczasowe korzystanie z układów magazynowania energii. Efektem ubocznym stosowania tych narzędzi jest coraz

większy problem z regulacją przepływów mocy na wszystkich poziomach napięć, utylizacja baterii oraz zjawisko wstecznej transformacji (przepływ energii z sieci nN do sieci SN). W przypadku sieci nN, problem jest o tyle dotkliwy, że stan techniczny oraz jej rozległość w przypadku sieci warszawskiego OSD stanowić może barierę w przyłączaniu nowych odbiorców.

Celem pracy jest wykazanie, że regulacja przepływów energii w sieciach niskich napięć przy wykorzystaniu przez OSD zasobników energii może pozwolić na dowolne kształtowanie ilości przepływającej energii oraz poprawa jakości pracy sieci rozdzielczej. Zastosowanie zasobników umożliwi dostarczanie energii w sposób ciągły. Omówione zostaną w pracy zagadnienia związane z wdrożeniem, gdzie analizie zostaną poddane uwarunkowania prawne oraz techniczne wykorzystania zasobników energii przez OSD w głębi sieci. Omówione zostaną wady i zalety, koszty oraz korzyści z implementacji takich rozwiązań, w tym: analiza możliwości sterowania zasobnikami wraz z potencjalnymi strategiami pracy magazynów, porządkane topologie urządzeń oraz kryteria lokalizacji układów. Dokładne przeanalizowanie dostępnych usług i technologii na etapie projektów pilotażowych omówionych w tej pracy pomoże Stoen Operator w wyborze właściwych standardów dla przyszłych technologii i topologii budowy stacji SN/nN oraz pozwoli zidentyfikować wszelkie zagrożenia i ryzyko. Skala i szybkość wdrożenia układów magazynowania przez warszawskiego OSD z pewnością będą zależne od dojrzałości technologii oraz określenia źródeł ich finansowania.

W związku z tym, autor wyznaczył sobie cele cząstkowe, których realizacja będzie tożsama z udowodnieniem tezy:

1. analiza literaturowa zagadnień związanych z magazynowaniem energii;
1. przegląd dostępnych metod zarządzania i sterowania układami magazynowania energii oraz dostępnych konstrukcji zasobników energii;
2. opracowanie metody wyboru stacji transformatorowych, w których zabudowa stacjonarnych i mobilnych zasobników energii pozwoli na poprawę funkcjonowania warszawskiej sieci rozdzielczej;
3. opracowanie metody wyznaczania pojemności zasobnika dla danej stacji
4. badanie skuteczności oddziaływania zasobników energii na pracę stacji transformatorowej na wybranych przykładach aplikacyjnych.

### 3.3 Przyjęta metoda badawcza

Przeprowadzenie klasycznego eksperymentu naukowego jest w warunkach pracującej sieci rozdzielczej w praktyce niemożliwe ze względów prawnych, organizacyjnych, finansowych oraz natury obiektu, którym jest sieć rozdzielcza. Dlatego autor przyjął metodykę pracy polegającą na realizacji pracy w częściach:

1. analiza teoretyczna zagadnienia zastosowania zasobników w stacjach transformatorowych; realizacja celów cząstkowych 1 i 2, wyniki opisane zostały w rozdziałach 2 i 4;
2. opracowaniu metody wyboru stacji, w której należy zabudować zasobniki energii, i jej zastosowaniu do fragmentu sieci Stoen w dzielnicy Wawer; realizacja celu cząstkowego 3, wyniki opisane zostały w rozdziale 5
3. opracowaniu sposobu wymiarowania tych zasobników; realizacja celu cząstkowego 4, wyniki zostały opisane w rozdziale 5
4. przeprowadzeniu eksperymentów praktycznych, wykazujących skuteczność mobilnych i stacjonarnych zasobników energii dla kształtowania pracy stacji transformatorowej, realizowanych w ramach projektów badawczych (opisane w załączniku 1 i 2); realizacja celu cząstkowego 5, wyniki zostały opisane w rozdziale 6

Realizacja części 2 i 3 jest oparta na danych pomiarowych i statystycznych, zbieranych przez operatora na potrzeby bieżącej działalności.

Autor opiera dowód prawdziwości tezy na założeniu, że jeżeli zostaną spełnione jednocześnie następujące warunki:

- opracowana metoda doboru stacji do zabudowy zasobnika oraz zastosowanie jej do wybranego obszaru sieci da wyniki pozytywny w postaci wyróżnienia stacji, w których zasobnik poprawi warunki pracy,
- przeprowadzona analiza i opracowana metoda doboru wielkości zasobnika, zastosowana do wybranych stacji transformatorowych da wynik pozytywny – wyznaczone wielkości zasobników dadzą efekt i będą możliwe do aplikowania,
- eksperymenty praktyczne pokażą, że zasobniki podobnej wielkości są w stanie w wystarczający sposób oddziaływać na pracę stacji,

to oznacza, że zasobnikami stacjonarnymi i mobilnymi można w praktyce poprawić pracę sieci rozdzielczej.



Zaproponowana metoda badawcza znalazła zastosowanie z uwagi na analizę konkretnych projektów realizowanych przez Stoen Operator w zakresie magazynowania energii, a także pozwoliła wyczerpująco zbadać efekty wdrożenia tych urządzeń z uwagi na brak ścisłego i łatwego do przewidzenia zbioru rezultatów. Metoda ta pozwala także na uzyskanie rezultatów o dużym znaczeniu praktycznym i kompleksowym. Zastosowanie jej wynika także z faktu, że prowadzenie projektów wdrożeniowych w sieci dystrybucyjnej nie jest łatwe. Dążenie do zapewnienia niezawodności pracy sieci i dostarczania energii o najwyższych parametrach do klientów końcowych przez spółkę dystrybucyjną, sprawia, że wszystkie urządzenia muszą być niezawodne i odpowiednio wcześniej przebadane. Co jest sprzeczne z oczekiwaniami w stosunku do projektów badawczo-rozwojowych.

Wykorzystanie w badaniach empirycznych studium przypadku umożliwia sformułowanie konkluzji, które dają możliwość potwierdzenia, odrzucenia lub modyfikacji tezy, na podstawie, której zaprojektowano badanie. Co więcej, do zanegowania badanej teorii wystarczy tylko jeden przypadek, który jest z badaną teorią sprzeczny. Autor w swojej pracy posłużył się metodą wnioskowania indukcyjnego, gdzie przy wykorzystywaniu eksperymentów i obserwacji zjawisk zachodzących podczas tych działań dokonywano oceny przydatności i prawdziwości otrzymywanych wyników i wnioskowań.

### **3.4 Podejście nowatorskie w pracy**

Autor pracy szczególnie nacisk położył na opracowanie metody doboru wielkości, kryteriów, rozmieszczenia stacjonarnych zasobników energii i punktów ładowania pojazdów elektrycznych celem wsparcia miejskiej sieci elektroenergetycznej i poprawy niezawodności zasilania odbiorców. Opracowane zostaną wymagania dla zastosowania zasobników w miejskiej sieci elektroenergetycznej, umożliwiającym spełnienie m.in. funkcji regulacyjnych w systemie, ale także poprawiającym funkcjonowanie systemu, czy też wpływające na długość procesu inwestycyjnego. Uwaga zostanie skupiona także na wykorzystaniu zasobników do kształtowania dobowego profilu mocy czynnej i pozornej stacji elektroenergetycznych SN/nN, jak również ocenie możliwości wykorzystania zasobników energii przez OSD do oferowania usług systemowych.

## **4 REGULACJA PRZEPŁYWÓW ENERGII W SIECIACH NISKICH NAPIĘĆ I POPRAWA NIEZAWODNOŚCI PRACY SIECI**

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [51] operator systemu dystrybucyjnego zobowiązany jest do bilansowania mocy czynnej i biernej na obszarze swojej działalności z uwzględnieniem warunków technicznych pracy sieci dystrybucyjnej i współpracy z operatorem systemu przesyłowego. Takie regulowanie i zarządzanie przepływami energii w sieci oraz jej bilansowanie ma charakter pasywny [84] i bazuje przede wszystkim na aktualnych pomiarach i zdarzeniach w sieci, ale nie poprawia efektywności jej funkcjonowania. Jednym z głównych kryteriów uwzględnianym podczas pracy jest bilansowanie obszarowe zapotrzebowania na moc poprzez zmianę generacji w mikroźródłach bądź zrzut obciążenia.

Regulacja przepływów w sieci niskiego napięcia może odbywać się tak, aby bilans mocy w sieci był zerowy, tzn. zapotrzebowanie odbiorców było kompensowane przez generację wewnętrzną. Aby tego dokonać, należy ocenić jak duże jest niezbilansowanie mocy oraz jakie są możliwości regulacji w mikro źródłach. Ocena niezbilansowania mocy może polegać na odczycie ostatniego dostępnego pomiaru mocy. Jeśli nie jest to pomiar zbyt odległy w czasie od chwili rozważanej, to można przyjąć, że niezbilansowanie mocy jest równe pomiarowi mocy wymiany. Jeśli nie jest dostępny „odpowiednio dobry” pomiar mocy wymiany, niezbilansowanie mocy można próbować oceniać na podstawie wielkości zmiany napięcia w miejscu przyłączenia do sieci zewnętrznej [84].

Ocena zakresu możliwości regulacji nastaw w mikroźródłach polega na określeniu aktualnie generowanej mocy oraz wyznaczeniu zakresu minimalnej i maksymalnej mocy, którą mogą wytwarzać aktualnie pracujące mikroźródła. Należy także wyznaczyć, jakie są możliwości pracy zasobnika energii (stacjonarnego i mobilnego). Przede wszystkim kluczowa jest informacja ile energii jest w nim zgromadzone oraz czy możliwa jest praca w trybie magazynowania energii bądź praca w trybie oddawania energii.

W przypadku gdy niezbilansowanie jest niewielkie, może okazać się, że jest wystarczająco duży zapas generacji w mikroźródłach już pracujących i pokryją one niezbilansowanie. W

takiej sytuacji wystarczy wyznaczyć nowe punkty pracy pracujących mikroźródeł. Jeśli ubytek mocy jest większy, należy liczyć się z koniecznością zmiany trybu pracy elementów mikrosieci. Jeśli znajdujący się w zdefiniowanym obszarze zasobnik nie pracował, lub pracował w trybie magazynowania energii, przejście w stan oddawania energii może spowodować, że niebilansowanie zostanie zrównoważone. Przejście do pracy generacyjnej jest możliwe tylko wtedy, jeśli zasobnik jest choć w pewnym stopniu naładowany. Jeśli zasobnik pracował już wcześniej jako źródło energii, to jego udział był już szacowany w pierwszym kroku. Warto zauważyć, że zmiana trybu pracy zasobnika z ładowania na generację zmniejsza zapotrzebowanie na moc (zasobnik pobierał energię) i zwiększa generację. Jeśli zmiana trybu pracy zasobnika nie zaspokaja w pełni potrzeb, należy dokonać analizy, czy są źródła, które można załączyć. Jeśli takie istnieją, szacuje się jaką moc mogą one dostarczyć. Jeśli brak jest dodatkowych źródeł lub moc jaką mogą one dostarczyć w dalszym ciągu nie pokryje zapotrzebowania, zasadnym jest redukcja obciążenia.

Redukcja obciążenia oznacza, że zostanie określona lista odbiorów, które zostaną wyłączone zdalnie. Dobór odbiorów, które mają być wyłączone świadczy o ich randze i ważności w sieci. Odbiory na początku listy mają najniższy priorytet i będą wyłączane najwcześniej. Drugi sposób to przyjęcie zasady, że nie ma wśród odbiorów żadnych odbiorów uprzywilejowanych. W takiej sytuacji odłączone zostaną te odbiory, których wartość mocy jest najbliższa deficytów.

Korzystając z równań matematycznych oraz założeń klasycznej elektrotechniki można przyjąć, że dla całej sieci można wskazać równanie:

$$I = Y * U \quad (2)$$

gdzie:

$I$  – wektor prądów węzłowych,

$U$  – wektor napięć węzłowych,

$Y$  – macierz admitancyjna sieci.

Macierz admitancyjna sieci ma wymiar zależny od ilości węzłów sieci oraz składa się z admitancji własnych i wzajemnych

$$Y_{ij} = G_{ij} + j * B_{ij} \quad (3)$$

zaś moc węzła:

$$S_i = U_i + I_i \quad (4)$$

gdzie:

$i=1,2,3 \dots n$  – numery porządkowe kolejnych węzłów

Na bazie powyższych wyprowadzeń moc w dowolnym węźle sieci jest zgodna z zależnością:

$$S_j = P_i + j * Q_i = U_i * Y_{ii} * U_i + U_i * \sum_{j \in n_i} Y_{ij} * U_j \quad (5)$$

Uwzględniając w powyższym równaniu napięcia w postaci biegunowej, a admitancje w postaci algebraicznej uzyskuje się podstawowe równania mocowo-napięciowe dla mocy czynnej (6) oraz biernej (7), składające się z części rzeczywistej i urojonej wyrażenia dla mocy pozornej. Moc czynna reprezentowana jest przez część rzeczywistą zaś moc bierna przez część urojoną.

$$P_i = U_i^2 * G_{ii} + \sum_{\substack{j \in n_i \\ j \neq i}} U_i * U_j * (G_{ij} * \cos(\partial_i - \partial_j) + B_{ij} * \sin(\partial_i - \partial_j)) \quad (6)$$

$$Q_i = -U_i^2 * B_{ii} + \sum_{\substack{j \in n_i \\ j \neq i}} U_i * U_j * (G_{ij} * \sin(\partial_i - \partial_j) - B_{ij} * \cos(\partial_i - \partial_j)) \quad (7)$$

Z równań mocowo-napięciowych można wyciągnąć wniosek, że dla każdego węzła sieci mamy cztery zmienne:  $P$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $\partial$ . Aby możliwe były obliczenia i rozwiązanie równań potrzebna jest znajomość minimum 2 zmiennych i poszukiwanie pozostałych. W sieciach dystrybucyjnych w klasycznych obwodach znane są wartości zapotrzebowania na moc czynną i bierną lub moc czynna i napięcie. Aby wyznaczyć poszukiwane zmienne zastosować należy jedną z metod obliczeniowych bazujących na równaniach mocowo-napięciowych węzła. Taka metodą jest metoda Newtona-Raphsona, gdzie układ wielu równań rozwijany jest w szereg Taylora.

$$\Delta P_i(U, \delta) = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{j \in n_i} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \frac{\partial P_i}{\partial U_i} \Delta U_i + \sum_{j \in n_i} \frac{\partial P_i}{\partial U_j} \Delta U_j \quad (8)$$

$$\Delta Q_i(U, \delta) = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i + \sum_{j \in n_i} \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} \Delta U_i + \sum_{j \in n_i} \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j \quad (9)$$

Lewa część przestawionych równań (8) oraz (9) odpowiada za wartość różnicy między mocą zadaną, a mocą obliczoną z równań mocowo-napięciowych. Zatem dla danego stanu sieci można napisać równanie przyrostów w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_l \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_l \\ \vdots \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial U_j} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta_l \\ \vdots \\ \Delta \delta_{n-1} \\ \Delta U_l \\ \vdots \\ \Delta U_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie elementy macierzy należy obliczać z poniższych zależności:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i * U_j * [G_{ij} * \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} * \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad i \neq j \quad (11)$$

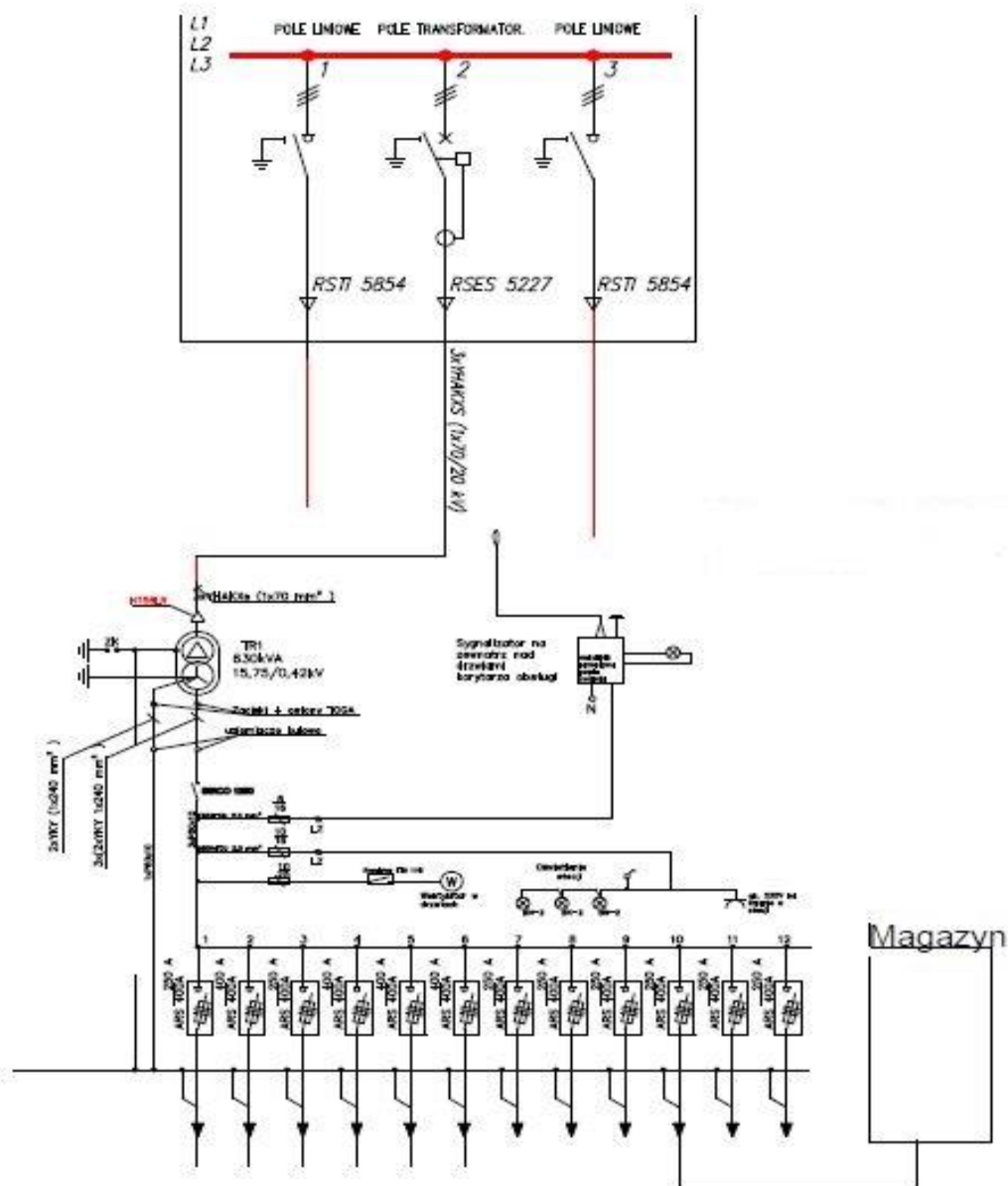
$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{j \in n_i} U_i * U_j * [G_{ij} * \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} * \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (12)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i * [G_{ij} * \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} * \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad i \neq j \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2 * U_i * G_{ii} + \sum_{j \in n_i} U_j * [G_{ij} * \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} * \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (14)$$

Właściwy dobór parametrów elementów składowych algorytmu sterowania zasobnikiem oraz opracowanie i zweryfikowanie tego algorytmu jest zadaniem czasochłonnym i trudnym. Potencjalne scenariusze związane ze sterowaniem i pracą zasobników energii muszą uwzględniać wiele zmiennych i dokonywać ich analizy często na podstawie wielu kryteriów, takich jak: straty energii, poziomy napięć, niezawodność zasilania itp. Dodatkowo oprócz aspektów technicznych istotne są czynniki ekonomiczne determinujące w dłuższym horyzoncie czasowym opłacalność inwestycji [33].

Głównym zadaniem strategii zarządzania przepływami energii przy autonomicznej pracy źródeł jest zapewnienie bilansu mocy czynnej i biernej a przez to utrzymanie zadanej wartości częstotliwości i napięcia [67]. Zasobnik przy takim reżimie pracuje najczęściej jako źródło referencyjne, co wymusza kontrolowanie przez przekształtnik zasobnika amplitudy i częstotliwości napięcia (VC) (charakterystyka sterowania U-f) oraz zapewnienie dostępnej mocy w punkcie przyłączenia. W trybie tym sygnał sterujący powstaje w oparciu o zmierzone prądy obciążenia oraz o wartości zadane z regulatorów stabilizujących poszczególne składowe odbiornika [33].



Rys. 9 Uproszczony schemat stacji SN/nN z zasobnikiem [oprac. własne]

Na rysunku 9 przedstawiono układ magazynowania energii zbudowany w ramach realizowanego przez Spółkę projektu badawczego [załącznik A]. Układ powstał z baterii litowo-jonowych o pojemności ponad 30 kWh. Został on przyłączony bezpośrednio do szyn niskiego napięcia stacji transformatorowej. Opomiarowane zostały wszystkie odpływy, a tuż za transformatorem zainstalowane zostały przekładniki pomiarowe monitorujące całkowity bilans energii wpływający z sieci SN. Układ taki był przedmiotem badań w Stoen Operator.

Badania przeprowadzone podczas testów układu, pozwoliły wysnuć wniosek, że najprostszym sposobem sterowania układem zasobnikowych jest zadawanie wartości

kluczowych parametrów z systemów dyspozytorskich, gdzie wylicza się wartości zadane dla wszystkich jednostek generacyjnych. W przypadku zasobnika energii sprawa nie jest tak prosta, ponieważ cel regulacji nie jest oczywisty. Wszystkie sposoby sterowania układem wymagają, żeby zasobnik mógł wykonywać pomiary mocy i napięcia w wybranych punktach sieci, również oddalonych od zasobnika. Dodatkowo badania pokazały, że w przypadku pracy układu połączonego trwale z siecią (synchronizacja z napięciem sieciowym), układ zasobnikowy realizuje strategię P-Q, tzn. dąży do uzyskania odpowiednio zadanych wartości mocy czynnej i biernej, co przekłada się na regulację prądu na podstawie mierzonych wartości napięcia. Dla zasobnika przyłączonego bezpośrednio do szyn nN stacji transformatorowej, przekształtnik pracuje zatem w trybie CC (sterowanie prądowe). Na podstawie zadanych wartości mocy czynnej i biernej wyznaczane są składowe prądów sieci. Dzięki zastosowaniu w algorytmach sprzężeń zwrotnych, każda zmiana wartości prądów jest niezwłocznie kompensowana.

#### **4.1 Regulacja mocy czynnej**

W stanie pracy normalnej sieci dystrybucyjnej przepływy mocy w niektórych liniach są znacznie poniżej ich normalnych przepustowości, inne zaś są przeciążone, co ma ogólny wpływ na pogorszenie profili napięcia oraz zmniejszenie stabilności i bezpieczeństwa systemu. Z tego powodu istotne staje się kontrolowanie przepływu mocy wzdłuż tych linii tak, aby zaspokoić potrzeby przenoszenia mocy. Z definicji przepływ mocy jest funkcją impedancji linii elektroenergetycznej, wielkości napięć końca wysyłającego i odbierającego oraz kąta fazowego między napięciami. Kontrolując jeden lub kombinację układów przepływu mocy, możliwe jest sterowanie aktywnym, a także reaktywnym przepływem mocy.

##### Sterowanie przepływami energii na przykładzie wdrożenia w innogy Stoen Operator [71]

Nadrzędnym celem implementacji układu zasobnika w stacji SN/nN w ramach prac badawczo rozwojowych jest włączenie magazynu energii w topologię stacji, tak aby dokonać kompensacji obciążeń szczytowych, jak również zmniejszenia współczynnika szczytu mocy czynnej (stosunku dobowej mocy czynnej maksymalnej do średniej dobowej), czyli „spłaszczenia” profilu mocy w polu zasilającym. W ramach projektu do typowej dla obszaru Warszawy miejskiej stacji transformatorowej wyposażonej w transformator 630 kVA przyłączono zasobnik energii o mocy 30 kW i pojemności 30 kWh. Z uwagi na fakt, że moc

zwarciowa w miejscu przyłączenia jest wielokrotnie wyższa niż moc zasobnika, metoda sterowania magazynem wymaga realizowania dodatkowych pomiarów w polu transformatora [2]. Sterowania od zmian wartości napięcia nie jest bowiem możliwe, ponieważ sterowania uchybowe wymagają bardzo dużych mocy zasobników, żeby zobaczyć wpływ na sieć. Wartości te pozwalają na wyznaczenie wartości zadanych mocy - czynnej  $P_{bat}^*$  i biernej  $Q_{bat}^*$  zasobnika na podstawie zmierzonych wartości mocy w polu transformatorowym  $P_{tr}$  i  $Q_{tr}$ . Traktując przyłączony zasobnik jako sterowalne źródło energii, można przyjąć, że w węźle stacyjnym zachowane są następujące równości:

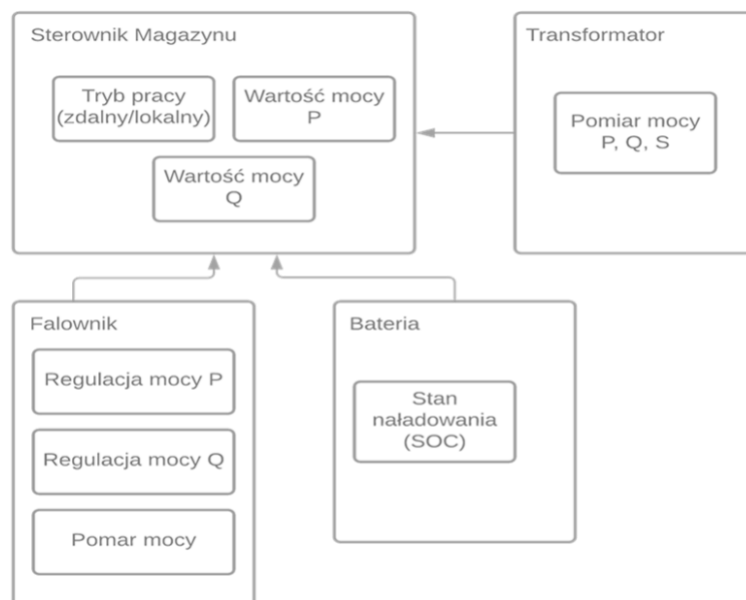
$$S_{obc} = S_{Tr} + S_{BAT} \quad (15)$$

$$P_{obc} = P_{Tr} + P_{BAT} \quad (16)$$

Ponieważ celem układów sterowania było kształtowanie profilu obciążenia całej stacji, do regulacji członów sterowania układu należało przyjąć, że moc odbiorów ( $P_{obc}$ ) to suma mocy w polu transformatora oraz mocy wyjściowej zasobnika.

Całkowita moc nastawiana przez algorytm sterujący, określona jest na bazie następującej kolejności:

1. Zadanie wartości mocy czynnej przez użytkownika (rysunek 10)



**Rys. 10 Przykładowy schemat sterowania zasobnikiem**

2. Wyliczenie mocy zadanej na podstawie bieżących pomiarów oraz stopnia niezbilansowania węzła.



3. Korekta zadanej wartości mocy czynnej ze względu na wartość SOC (poziom naładowania baterii).

Analogiczne postępowanie realizowane jest dla wyznaczenia wartości mocy biernej  $Q$ . Wartości określone na bazie powyższych założeń utrzymywane są tak długo, aż zasobnik osiągnie stan naładowania lub rozładowania (ewentualnie w przypadku ręcznej zmiany przez operatora).

Opracowany na potrzeby badawcze układ sterowania zasobnikiem, zgodnie z rysunkiem powyżej zakłada, że magazyn energii jest permanentnie włączony, a o przepływie mocy decydują wielkości zadane  $P$  i  $Q$  wynikające z trybu, w jakim układ pracuje (zdalny, lokalny). Dodatkowo, może wystąpić stan, gdy układ pracuje w trybie gorącej rezerwy (zasobnik pobiera energię tylko na własne potrzeby) oraz stan zimnej rezerwy, magazynu energii uwarunkowany jest głównie charakterem realizowanej aplikacji, gdy załączony jest tylko układ sterowania zasobnikiem

Aby maksymalnie przedłużyć żywotność zainstalowanych w układzie ogniów, pojemność baterii jest przewymiarowana, tzn. zakładana w projekcie pojemność 30 kWh stanowi ~90% pojemności wynikającej z pojemności nominalnych wszystkich ogniów.

#### **4.2 Propozycje formalnych zmian w funkcjonowaniu usług systemowych i poprawa niezawodności pracy sieci**

Poprawa niezawodności pracy sieci może być także zależna od magazynowania energii. Jednakże, należy pamiętać, że przy kontraktowaniu usług związanych z magazynowaniem energii szczególnie z dla usług typu peak shaving lub peak shifting kontraktowanie opiera się głównie o umowy handlowe dotyczące obrotu energią a nie jej dystrybucji, a strony kontraktujące nie mogą swobodnie w tym zakresie kształtować stawek dystrybucyjnych ponieważ za nie odpowiada regulator rynku.

Usługi świadczone przez magazyny mogą różnić się od siebie i mogą być dzielone pomiędzy różne rodzaje podmiotów oraz realizowane w różnych lokalizacjach:

- po stronie wytwórcy (arbitraż cenowy, optymalizacja produkcji własnej, rozwiązania hybrydowe);
- w sieci przesyłowej (rynek mocy, regulacja częstotliwości, napięcia, stabilizacja fazowa, ograniczenie strat energii, zwiększenie możliwości przesyłu, uniknięcie inwestycji);

- w sieci dystrybucyjnej (zasilanie rezerwowe, regulacja napięcia, regulacja mocy biernej, minimalizacja strat energii, jakość energii, lokalne bilansowanie energii, awaryjna praca sieci, zwiększenie przepustowości, uniknięcie inwestycje;
- przy rozproszonych źródłach energii (wsparcie usług pomocniczych, wygładzanie wahań wytwarzania, ograniczanie przerw w dostawach energii, przesunięcie w czasie, wzmocnienie zasilania, bilansowanie mikrosieci i bilansowanie lokalne;
- po stronie użytkownika końcowego (ograniczenie szczytów obciążeń, optymalizacja czasu wykorzystania, wsparcie DR, jakość energii na potrzeby użytkownika oraz OSD, zabezpieczenie właściwej pracy wrażliwych linii produkcyjnych, UPS użytkownika końcowego, ograniczanie mocy biernej, infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych).

Biorąc pod uwagę aspekt możliwego czasu oddawania energii przez system magazynowania należy stwierdzić, że nie każdy magazyn spełnia funkcję generacji energii. Nie każdy magazyn może też mieć wpływ na ceny energii elektrycznej. Za systemy magazynowania energii, które mogą być elementem w pełni zintegrowanym z siecią dystrybucyjną, mogą być szczególnie uznane rozwiązania umożliwiające krótszy czas pracy, niż czasy określone przez transakcje typu spot na rynku energii. Dlatego usługi realizowane przez systemy magazynowania energii w przeciągu kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu minut, nie mają możliwości wpływania w sposób negatywny na odbiorców jak i na rynek cen energii. Natomiast mogą zabezpieczyć poprawną pracę sieci w obszarach dużego nasycenia OZE. Przy kształtowaniu przyszłych stawek i mechanizmów związanych z usługami dystrybucyjnymi należy brać pod uwagę, czy wprowadzone usługi magazynowania mają pozytywny, negatywny czy też neutralny wpływ na inwestycje w sieć dystrybucyjną i przesyłową. W wypadku lokalnych zastosowań systemów magazynowania energii (np. klastry, spółdzielnie energetyczne) powinny to być przede wszystkim mechanizmy wspierające lokalną autokonsumpcję.

W zależności od formy świadczenia usług, odbiorca energii jest zobowiązany do zgłoszenia odpowiedniego poziomu mocy redukcji zapotrzebowania. W przypadku, gdy odbiorca energii elektrycznej posiada mniejsze możliwości redukcyjne, może zgłosić się do tzw. agregatora, czyli podmiotu gromadzącego mniejsze podmioty i reprezentującego przy kontaktach ze spółką przesyłową. Można zwrócić uwagę na dość duże zróżnicowanie usług DSR. Należy jednak podkreślić, że obecnie przepisy nie regulują wprost, czy wprowadzenie energii do sieci i utrzymanie dodatniego bilansu energii (tj. gdy energia oddawana do sieci  $\geq$  energii pobranej z sieci) w ramach agregatora jest wystarczające do świadczenia usług redukcji – zmniejszenie zapotrzebowania przez agregatora (np. spółkę obrotu). Wydaje się, że usługa redukcji

zapotrzebowania jest realizowana przez fizyczne zmniejszenie zapotrzebowania na moc. W przypadku usług dla mobilnych magazynów energii wymagałoby to wprawdzie zaplanowania grafików ładowania pojazdów na danym obszarze, a następnie redukcję tego zapotrzebowania przez dostarczanie energii do sieci. Dodatkowo od 2019 r. wprowadzono możliwość redukcji mocy na danym obszarze. Oznacza to, że aktywacja usługi redukcji będzie dotyczyła wybranego przez OSP regionu Polski. W kontekście mobilnych magazynów energii taki stan rzeczy pozwala na łatwiejsze zgrupowanie pojazdów elektrycznych i umożliwienie im oddawania energii do sieci.

Alternatywą dla programów DSR jest Rynek mocy. Jest to mechanizm, który wprowadza wynagrodzenie za gotowość do dostarczenia mocy lub też jej redukcji. Rynek mocy działa jednak z pewnym wyprzedzeniem. Procesy kwalifikacyjne oraz aukcje główne odbywają się 5 lat przed faktycznym okresem dostaw mocy do KSE. Rynek mocy jest neutralny technologicznie tj. każdy typ technologii może brać w nim udział.

Jak zostało wspomniane w przypadku chęci wykorzystywania przez OSD potencjału energetycznego z mobilnych magazynów energii, wymagane jest **dostosowanie usług systemowych do możliwości techniczno-organizacyjnych.**

Główną zmianą w funkcjonowaniu rynku usług systemowych jest przeniesienie tych usług na poziom działania OSD, tzn. usługi systemowe powinny być kontraktowane na wypełnianie potrzeb lokalnych sieci elektroenergetycznych. **Od strony formalnej wymaga to aktualizacji Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD) w zakresie wprowadzenia katalogu usług systemowych świadczonych na potrzeby właściwego OSD.** Należy zwrócić uwagę, że w przypadku wykorzystania mobilnych magazynów energii przez OSD, usługi systemowe są zintegrowane z propozycjami usług V2G. Kontraktowanie ich będzie jednocześnie realizacją programu V2G przez jego uczestników. W związku z tym zapisy w IRiESD powinny uwzględniać możliwość wykonywania danej usługi systemowej przez mobilny magazyn energii. W tabeli 4 przedstawiono propozycję zmian w usługach systemowych.

**Tabela 4. Propozycje zmian w usługach systemowych**

| Usługi magazynów energii                        | Nazwa istniejącej usługi systemowej                                                  | Główne zmiany w porównaniu do istniejącego odpowiednika usługi systemowej                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Usługi magazynów energii                        | Operacyjna rezerwa mocy                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• wszystkie usługi wymagają dyspozycyjności do realizacji usługi systemowej</li> <li>• koordynacja usługi przez OSD a nie przez OSP</li> <li>• lokalny charakter działania</li> <li>• nowa definicja JG<sub>WA</sub> w kontekście V2G</li> <li>• mobilność realizacji usługi</li> </ul> |
| Poprawa parametrów jakości energii elektrycznej | Udział w automatycznej regulacji napięcia i mocy biernej                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• lokalny charakter działania (tylko w miejscu wystąpienia przekroczeń wartości dopuszczalnych)</li> <li>• zmiana przepisów dopuszczająca udział mobilnych magazynów energii</li> <li>• poszerzenie zakresu realizacji usługi o inne parametry JEE</li> </ul>                           |
| Praca interwencyjna na potrzeby sieci OSD       | Regulacyjne usługi systemowe w zakresie rezerwy interwencyjnej – Praca interwencyjna | <ul style="list-style-type: none"> <li>• zmiana przepisów dopuszczająca udział mobilnych magazynów energii</li> <li>• realizowane dla potrzeb danego obszaru a nie całego systemu (w tym przypadku sieci OSD)</li> <li>• realizacja usługi nie tylko na potrzeby OSD, ale także na potrzeby odbiorców</li> </ul>               |
| Opłata za zaniechanie pracy                     | Redukcja zapotrzebowania na polecenie OSP                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• wyznaczanie okresów redukcji zapotrzebowania za pomocą algorytmów inteligentnych a efekt redukcji ma charakter lokalny a nie systemowy</li> </ul>                                                                                                                                     |

#### 4.3 Koncepcja doboru mocy i lokalizacji mobilnych i stacjonarnych magazynów energii

Strategia wyboru lokalizacji i wielkości zasobnika polega na wyznaczeniu takiej wielkości zasobnika oraz na określeniu jego lokalizacji w taki sposób, aby zakładane wskaźniki jakościowe w sieci na zdefiniowanym obszarze były najmniejsze. Wraz ze zmianą lokalizacji zasobnika mobilnego, moc, generowana z zasobnika podczas rozładowywania, może być dostarczana w różnych miejscach, a podczas ładowania zasobnika, może być pobierana z różnych punktów sieci. Taka zmiana lokalizacji wpływa znacząco na rozptył prądów, a co za tym idzie na wielkość strat mocy czynnej. Zmiana wielkości zasobnika energii wpływa na jego

parametry pracy. W zależności od ilości możliwej do przechowania energii oraz mocy urządzeń przekształcających, zasobnik będzie wpływał na rozptyw prądów w mniejszym lub większym stopniu.

Główną ideą proponowanej metody jest wyznaczenie właściwej, z punktu widzenia OSD ilości zasobników w stacjach SN/nN w rozróżnieniu na zadania jakie mają spełniać, tzn. czy praca zasobników determinowana będzie skutkami awarii występującymi w sieci SN (wyłączenie transformatora) czy też działaniami planowymi. Na bazie metodologii przedstawionej w artykule [95] autor zmodyfikował przedstawione tam wzory bazując na analogii między mobilnymi zasobnikami V2G a zasobnikami stacjonarnymi. Aby obliczyć liczbę zasobników we wskazanej pętli SN/nN przyjmijmy, że danymi wejściowymi są: zmienna  $E_d''$ , która oznacza wolumen energii elektrycznej konieczny do dostarczenia aby umożliwić dojazd pogotowia energetycznego do miejsca awarii oraz  $N_{uEV}^{REQ''}$ , czyli poszukiwana liczba zasobników w danej pętli. Wartości te są wyrażone w następujący sposób:

$$\bigvee_{N_{uEV}^{REQ''} \leq n_{cs}} N_{uEV}^{REQ''} = \begin{cases} \frac{E_d''}{E_{BESS}}, & \text{dla zdarzeń planowych} \\ N_{uEV}^{REQ'}, & \text{dla awarii} \end{cases} \quad (17)$$

$$E_d'' = \begin{cases} E_d' - E_{E-B}, & \text{dla zdarzeń planowych} \\ E_d', & \text{dla awarii} \end{cases} \quad (18)$$

gdzie:

$E_{E-B}$  – całkowity wolumen energii elektrycznej (obciążenie stacji), wyrażony w kWh;

$E_d'$  – wolumen energii elektrycznej wymagany do zasilenia kluczowych odbiorców, wyrażony w kWh;

$E_d''$ , która oznacza wolumen energii elektrycznej konieczny do dostarczenia

$E_{BESS}$  – Planowana ilość energii dostępnej w zasobniku

$N_{uEV}^{REQ''}$  - poszukiwana liczba zasobników w danej pętli

Niech  $G$  oznacza obszar oddziaływania wytypowanej pętli SN. W związku z tym w obszarze  $G$  można wyróżnić punkty  $g$ , które określają położenie magazynu energii za pomocą współrzędnych geometrycznych. Należy podkreślić, że te współrzędne geometryczne mają także przypisane współrzędne geograficzne. Można je określić w następujący sposób:

$$g(x_g, y_g) \in G \quad (19)$$

gdzie:

$x_g$  i  $y_g$  – współrzędne geometryczne wybranego punktu  $g$ .

W analizowanym obszarze należy również scharakteryzować stacje SN/nN oraz magazyny energii. Należy przypomnieć, że  $N_{BESS}^{SN}$  będzie oznaczać zbiór wszystkich magazynów świadczących usługi podtrzymania zasilania w obszarze danej pętli SN, a kolejny BESS oznaczamy przez  $n$ . Oznacza to, że moc zbioru  $N_{BESS}^{SN}$  będzie oznaczać liczbę wszystkich zasobników w danym obszarze (danej pętli SN). Należy podkreślić, że każdy zasobnik należy opisać w dokładny sposób, tak aby OSD posiadał pełny obraz co do jego stanu. Zatem możemy zdefiniować wektor zmiennych, które pozwolą opisać  $n$ -ty zasobnik świadczący usługi. Został on określony równaniem (20).

$$BESSV_n = [ID_n, x_n, y_n, SOC_{akt,n}, C_n, P_{BESS,n}^{MAX}, TV_n, t_{BESS,n}^{SN}, M_n] \quad (20)$$

gdzie:

$ID_n$  – numer identyfikacyjny zasobnika;

$x_n, y_n$  – współrzędne geometryczne/geograficzne,

$SOC_{akt,n}$  – aktualny poziom naładowania baterii wyrażony w %;

$C_n$  – pojemność baterii magazynu, wyrażona w kWh;

$P_{BESS,n}^{MAX}$  – maksymalna moc przesyłana z  $n$ -tego zasobnika, wyrażona w kW.

$TV_n$  – typ baterii;

$t_{BESS,n}^{SN}$  – maksymalny czas podtrzymania oferowany przez  $n$ -ty zasobnik, wyrażony w godzinach;

$M_n$  – tryb świadczenia usługi (awaryjny – OA lub planowy – OP).

Aby zaliczyć dany zasobnik do zbioru wszystkich zasobników w danej pętli musi on spełniać następującą zależność:

$$BESSV_n \in N_{BESS}^{SN} \quad (11)$$

Zatem można określić macierz wszystkich zasobników znajdujących się w obszarze w danej pętli jako:

$$N_{BESS}^{SN} = \begin{bmatrix} ID_1 & x_1 & y_1 & SOC_{akt,1} & C_1 & P_{uEV,1}^{MAX} & TV_1 & CS_1 & t_{s,1}^{uEV} & M_1 \\ ID_2 & x_2 & y_2 & SOC_{akt,2} & C_2 & P_{uEV,2}^{MAX} & TV_2 & CS_2 & t_{s,2}^{uEV} & M_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ID_n & x_n & y_n & SOC_{akt,n} & C_n & P_{uEV,n}^{MAX} & TV_n & CS_n & t_{s,n}^{uEV} & M_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

Na podstawie macierzy z równania (22) określa się zbiór zasobników zdolnych do świadczenia usług w obszarze danej pętli SN

Na podstawie pozyskanych historycznych danych z liczników bilansujących co do uśrednionego zapotrzebowania na energię  $E_{us_{BESS,n}}$  oraz obliczonej prognozowanej wartości zapotrzebowania na energię w danej lokalizacji, oblicza się maksymalną możliwą pojemność baterii w danej lokalizacji, biorąc pod uwagę ograniczenia związane z minimalnym poziomem SOC.

Określono tę wartość za pomocą równania (23).

$$C_{of_{HIST,n}}^E = C_n \cdot \left( \left( SOC_{akt,n}^{E-Bh} (t_{of_{FIN}}^{E-B}) - \frac{E_{us_{BESS,n}} \cdot DIST_{E-B,n}^{HIST}}{C_n} \right) - SOC_{min,n} \right) \cdot \eta_d \quad (23)$$

gdzie:

$C_{of_{HIST,n}}^E$  – wolumen energii elektrycznej planowany do dostarczenia przez zasobnik, wyrażony w kWh.

$C_n$  – pojemność baterii magazynu, wyrażona w kWh;

$t_{of_{FIN}}^{E-B}$  – czas wystąpienia zakłócenia

$SOC_{akt,n}^{E-Bh} (t_{of_{FIN}}^{E-B})$  – aktualny poziom SOC

$SOC_{min,n}$  – minimalny poziom SOC

$E_{us_{BESS,n}}$  – uśrednione zapotrzebowanie na energię

$DIST_{E-B,n}^{HIST}$  – odległość do pokonania przez pogotowie energetyczne

W tej metodzie należy bazować na danych wyłącznie pozyskanych z systemów teleinformatycznych OSD i danych katalogowych oraz prognostycznych .

W momencie wystąpienia zakłócenia tj. do czasu  $t_{of_{FIN}}^{E-B}$ , wysyłana jest informacja o aktualnym SOC zasobnika. Niech  $SOC_{akt,n}^{E-Bh} (t_{of_{FIN}}^{E-B})$  oznacza ten poziom. Następnie oblicza się maksymalną wartość energii jaką w tym momencie może dany zasobnik zaoferować. Jest to możliwe, gdyż wyznacza się prognozowaną odległość jaką musi pokonać pogotowie energetyczne aby dokonać przełączeń w sieci. Proponuje się, aby okres uwzględniania danych historycznych wynosił 90 ostatnich dni kalendarzowych. Zatem prognozowaną odległość można wyznaczyć w następujący sposób:

$$DIST_{E-B}^{HIST} = \frac{1}{90} \sum_{d=1}^{90} DIST_d^h \quad (24)$$

gdzie:

$DIST_{E-B}^{HIST}$  – prognozowany przebieg pojazdu pogotowia, wyznaczony jako średnia arytmetyczna z ostatnich 90-tu dobowych przebiegów pojazdu, wyrażony w km;

$DIST_d^h$  – przebieg pojazdu pogotowia w dobie  $d$ , wyrażony w km.

Następnie można utworzyć ranking zasobników w danej pętli, budując macierz  $N_u^E$  (równanie (25)).

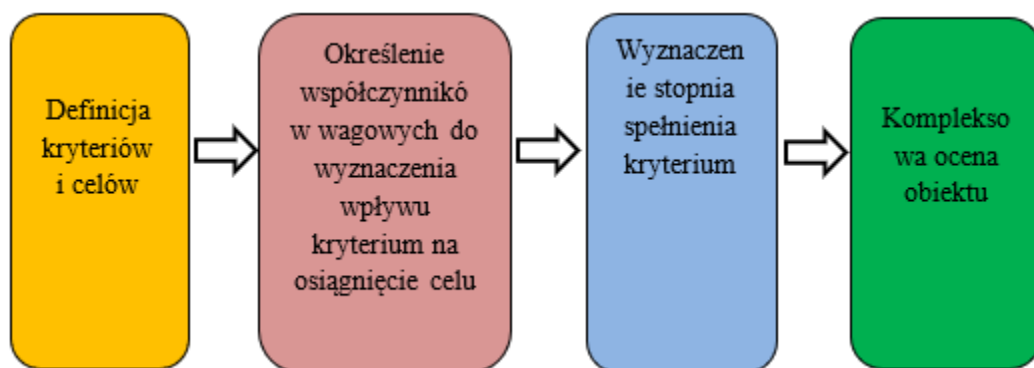
$$N_u^E = \begin{bmatrix} ID_1 & M_1 & C_{ofPL'/HIST',1}^E & t_{BESS,1}^{SN} & P_{uEV,1}^{MAX} \\ ID_2 & M_2 & C_{ofPL'/HIST',2}^E & t_{BESS,2}^{SN} & P_{uEV,2}^{MAX} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ID_n & M_n & C_{ofPL'/HIST',n}^E & t_{BESS,n}^{SN} & P_{uEV,n}^{MAX} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Następnie należy posortować rekordy macierzy  $N_u^E$ , zgodnie z przyjętymi zasadami.:

1.  $C_{ofPL'/HIST',n}^E$ : max  $\rightarrow$  min  $\rightarrow$  wolumen energii dostarczony przez zasobnik
2.  $P_{uEV,n}^{MAX}$ : max  $\rightarrow$  min;  $\rightarrow$  moc maksymalna z zasobnika
3.  $t_{BESS,n}^{SN}$ : max  $\rightarrow$  min.  $\rightarrow$  czas podtrzymania

W ramach pracy doktorskiej opracowana została zmodyfikowana (uproszczona) metodyka oceny wybranego obiektu w kontekście implementacji układu magazynowania. Modyfikacja obejmuje uproszczenie przedstawionej powyżej metody poprzez zastosowanie danych pomiarowych dostępnych w organizacji jak i wiedzy eksperckiej pracowników Spółki. Uproszczenie wynika z potrzeby dokonywania szybkich i szacunkowych analiz co do lokalizacji zasobników i podejmowania wstępnych strategii inwestycyjnych w tym zakresie. Dodatkowo do obliczeń w ramach modyfikacji wykorzystano arkusz kalkulacyjny MS EXCEL zastępujący skomplikowane i drogie oprogramowanie specjalistyczne. Podstawą uproszczenia jest zdefiniowanie odpowiednich kryteriów oceny lokalizacji zasobników w warszawskiej sieci dystrybucyjnej oraz celów funkcjonowania zasobników w wybranej lokalizacji. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie współczynników wagowych, które będą określać wpływ kryterium na realizację wybranego celu. Następnie sprawdzane jest, czy dany obiekt spełnia przyjęte kryteria jego oceny, a jeśli tak, to w jakim stopniu. Efektem końcowym jest całkowita ocena obiektu, która uwzględnia ww. etapy. Na rysunku 11 przedstawiono schemat blokowy opisanej metodyki.





Rys. 11 Metodyka oceny potencjalnej lokalizacji

### **Kryteria oceny lokalizacji i funkcjonowania układów**

Prawidłowa ocena lokalizacji w kontekście realizowania w niej usług magazynowania musi zostać poprzedzona zdefiniowaniem celów, jakie zostaną osiągnięte przez ulokowanie zasobników w określonym miejscu. W niniejszym opracowaniu zdefiniowano jedenaście takich celów, które zostały przedstawione w tabeli 5.

Tabela 5. Kryteria oceny wyboru stacji

| Lp. | Cel                                                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C1  | Minimalizacja czasu przejazdu Pogotowia do miejsca awarii (od momentu wysłania polecenia przez Dyspozytora) |
| C2  | Maksymalizacja dostaw energii elektrycznej w ramach świadczenia usługi                                      |
| C3  | Zabezpieczenie odbiorców priorytetowych                                                                     |
| C4  | Efekty wizerunkowy OSD                                                                                      |
| C5  | Wpływ na kształt lokalnego profilu zapotrzebowania na moc                                                   |
| C6  | Poprawa parametrów jakości energii elektrycznej                                                             |

Następnie zdefiniowano kryteria, które posłużą do oceny poszczególnych lokalizacji biorąc pod uwagę realizację ww. celów. Kryteria podzielono na cztery grupy:

- Kryteria Techniczne (KT),
- Kryteria Użytkowe (KU),
- Kryteria Organizacyjne (KO),
- Kryteria Finansowe (KF).

W tabelach 6, 7, 8 i 9 przedstawiono odpowiednio kryteria techniczne oceny lokalizacji, kryteria użytkowe oceny lokalizacji zasobników, kryteria organizacyjne oceny lokalizacji oraz kryteria finansowe oceny lokalizacji.

**Tabela 6. Zdefiniowane Kryteria Techniczne oceny lokalizacji**

| <b>Lp.</b> | <b>Kryterium Techniczne</b>                                                                       |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>KT1</b> | Przekroje linii zasilających SN                                                                   |
| <b>KT2</b> | Moc znamionowa transformatorów SN/nN                                                              |
| <b>KT3</b> | Istniejące ograniczenia sieciowe w obszarze jakości energii elektrycznej                          |
| <b>KT4</b> | Istniejące ograniczenia sieciowe w obszarze bezpieczeństwa zasilania odbiorców                    |
| <b>KT5</b> | Odległość od kluczowych obiektów infrastruktury elektroenergetycznej w Warszawie (GPZ, RPZ, RSM,) |
| <b>KT6</b> | Ryzyko występowania zakłóceń środowiskowych                                                       |
| <b>KT7</b> | Możliwość wykorzystania OZE w procesie ładowania układu magazynowania                             |
| <b>KT8</b> | Odległość od innego zasobnika energii                                                             |
| <b>KT9</b> | Odległość od potencjalnych źródeł OZE                                                             |

**Tabela 7. Zdefiniowane Kryteria Użytkowe oceny lokalizacji zasobników**

| <b>Lp.</b> | <b>Kryterium Użytkowe</b> |
|------------|---------------------------|
| <b>KU1</b> | Łatwość dojazdu do stacji |
| <b>KU2</b> | Dostępna pojemność układu |

**Tabela 8. Zdefiniowane Kryteria Organizacyjne oceny lokalizacji**

| <b>Lp.</b> | <b>Kryterium Organizacyjne</b>                                                          |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>KO1</b> | Odległość od strategicznych odbiorów na terenie m. st. Warszawy (np.: szpitale, urzędy) |
| <b>KO2</b> | Odległość od posterunku Pogotowia Energetycznego iSO                                    |
| <b>KO3</b> | Wyzwania związane z budową (roboty budowlane)                                           |

**Tabela 9. Zdefiniowane Kryteria Finansowe oceny lokalizacji**

| <b>Lp.</b> | <b>Kryterium Finansowe</b>                                                                     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>KF1</b> | Koszt kupna lub dzierżawy układu                                                               |
| <b>KF2</b> | Nakłady inwestycyjne na infrastrukturę dodatkową                                               |
| <b>KF3</b> | Wysokość potencjalnych szkód wynikających z awarii infrastruktury (np. eksplozja akumulatorów) |

#### Określenie współczynników wagowych

Ocena wpływu kryterium na osiągnięcie danego celu została wykonana przy pomocy współczynników wagowych w czterostopniowej skali ( $0 \div 1$ ), opisanych w tabeli 10.

**Tabela 10. Zastosowane współczynniki wagowe**

| <b>Waga (<math>w_k</math>)</b> | <b>Wpływ</b>      |
|--------------------------------|-------------------|
| <b>0</b>                       | brak              |
| <b>0,5</b>                     | znikomy pozytywny |
| <b>0,75</b>                    | znaczący          |
| <b>1</b>                       | kluczowy          |

Na podstawie zdefiniowanych kryteriów i celów zespół pracowników Operatora odpowiedzialnych za eksploatację, planowanie rozwoju sieci oraz ruch sieci elektroenergetycznej dokonał oceny wpływu grup kryteriów na osiągnięcie każdego z jedenastu celów. Kryteria oceniane ekspercko, tzw. kryteria miękkie to kryteria KU oraz KO oraz współczynniki wagowe obrazujące ich wpływ na wyniki. Narzędziem służącym do tej oceny była metoda ankietowa nie mniej *konieczne jest uwzględnienie zdarzeń losowych związanych z wybraną metodą i jej subiektywizmem. Oznacza to konieczność wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa wyboru kryteriów  $P(A)$ . Przez skuteczne wyznaczenie parametrów należy rozumieć otrzymanie wystarczającej liczby ocen ankietowych. W takim przypadku prawdopodobieństwo będzie składać się z dwóch niezależnych od siebie zdarzeń losowych: prawdopodobieństwo związane z realizacją ankiety przez wszystkich wskazanych*

pracowników  $P_{All}$  oraz prawdopodobieństwo nieobecności pracownika  $P_{vacat}$ . Przedstawiono to za pomocą równania

$$P(A) = P_{all}(A)_t \cdot P_{vacat}(A)_t \quad (26)$$

Jednakże warto podkreślić, że w czasie analizy zauważono problem z wyznaczeniem wartości startowych.

**Tab 11** Obliczone za pomocą metody „ankietowej” prawdopodobieństwa otrzymania oceny wpływu kryteriów

| <i>Dni</i>          | <i>Prawdopodobieństwo obecności</i> | <i>Prawdopodobieństwo wyboru kryteriów</i> |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| <i>Poniedziałek</i> | <i>0.246</i>                        | <i>0.347</i>                               |
| <i>Wtorek</i>       | <i>0.82</i>                         | <i>0.827</i>                               |
| <i>Środa</i>        | <i>0.92</i>                         | <i>0.973</i>                               |
| <i>Czwartek</i>     | <i>0.581</i>                        | <i>0.560</i>                               |
| <i>Piątek</i>       | <i>0.159</i>                        | <i>0.293</i>                               |

Dla pozostałych kryteriów zastosowana została metoda wyznaczania kryteriów na podstawie zarejestrowanych przez OSD danych

W tabelach 12 – 15 przedstawiono współczynniki wagowe dla poszczególnych rodzajów kryteriów.

**Tabela 12.** Współczynniki wagowe do oceny wpływu Kryteriów Technicznych na realizację założonych celów

| Kryterium |      |      |      |     |      |      |      |      |      |
|-----------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| Cel       | KT1  | KT2  | KT3  | KT4 | KT5  | KT6  | KT7  | KT8  | KT9  |
| <b>C1</b> | 0    | 0    | 0    | 0   | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>C2</b> | 0,75 | 0,75 | 0    | 0   | 0    | 1    | 0    | 0,75 | 0    |
| <b>C3</b> | 1    | 1    | 0,75 | 1   | 1    | 0,75 | 0,5  | 0    | 0,75 |
| <b>C4</b> | 0    | 0    | 0,75 | 1   | 0,75 | 0,75 | 0    | 1    | 0,5  |
| <b>C5</b> | 1    | 1    | 1    | 1   | 0,5  | 0,75 | 0,75 | 1    | 0,75 |

|           |   |   |   |   |   |      |      |      |   |
|-----------|---|---|---|---|---|------|------|------|---|
| <b>C6</b> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 1 |
|-----------|---|---|---|---|---|------|------|------|---|

**Tabela 13. Współczynniki wagowe do oceny wpływu Kryteriów Użytkowych**

| Kryterium |     |      |
|-----------|-----|------|
| Cel       | KU1 | KU2  |
| <b>C1</b> | 1   | 0,75 |
| <b>C2</b> | 1   | 0,75 |
| <b>C3</b> | 1   | 0,5  |
| <b>C4</b> | 1   | 0,75 |
| <b>C5</b> | 1   | 0,5  |
| <b>C6</b> | 0,5 | 0    |

**Tabela 14. Współczynniki wagowe do oceny wpływu Kryteriów Organizacyjnych**

| Kryterium |      |     |      |
|-----------|------|-----|------|
| Cel       | KO1  | KO3 | KO4  |
| <b>C1</b> | 1    | 1   | 0,75 |
| <b>C2</b> | 1    | 0   | 0    |
| <b>C3</b> | 1    | 1   | 1    |
| <b>C4</b> | 1    | 1   | 0,75 |
| <b>C5</b> | 1    | 0   | 0    |
| <b>C6</b> | 0,75 | 0,5 | 0,5  |

**Tabela 15. Współczynniki wagowe do oceny wpływu Kryteriów Finansowych**

| Kryterium |      |      |     |
|-----------|------|------|-----|
| Cel       | KF1  | KF2  | KF3 |
| <b>C1</b> | 0    | 0    | 0   |
| <b>C2</b> | 0    | 1    | 0,5 |
| <b>C3</b> | 0    | 0,75 | 1   |
| <b>C4</b> | 0,75 | 0,75 | 1   |

|           |      |   |   |
|-----------|------|---|---|
| <b>C5</b> | 0,75 | 1 | 0 |
| <b>C6</b> | 1    | 1 | 1 |

#### Całkowita ocena lokalizacji punktu w sieci dystrybucyjnej

Do uzyskania oceny lokalizacji należy najpierw sprawdzić stopień spełnienia danego kryterium przez obiekt. Do jej sporządzenia została opracowana czterostopniowa skala (-1 ÷ 2), która została opisana w tabeli 16.

**Tabela 16. Zastosowane wartości oceny stopnia spełnienia danego kryterium**

| Ocena ( $O_k$ ) | Stopień spełnienia kryterium |
|-----------------|------------------------------|
| <b>-1</b>       | Nie spełnia                  |
| <b>0</b>        | Nie dotyczy                  |
| <b>1</b>        | Spełnia częściowo            |
| <b>2</b>        | Spełnia całkowicie           |

Następnie, po ocenieniu w jakim stopniu dana lokalizacja spełnia wybrane kryterium należy uwzględnić obliczone współczynniki wagowe. Całkowita ocena obiektu pod kątem przyszłej instalacji dla wybranego celu została określona wzorem:

$$O_{ci} = \sum_{k=1}^n W_k * O_k \quad (27)$$

gdzie:

$O_{ci}$  – ocena obiektu dla wybranego celu;

$k$  – kryterium oceny;

$n$  – liczba kryteriów podlegające ocenie;

$W_k$  – współczynnik wagowy, określający wpływ danego kryterium na realizację celu;

$O_k$  – ocena stopnia spełnienia danego kryterium;

W prezentowanej metodyce założono, że im wyższa uzyskana całkowita ocena  $O_{ci}$ , tym bardziej dany obiekt nadaje się do realizacji wyznaczonego celu.

Ponadto, autor pracy założył, że oczekiwana pojemność zasobnika będzie określona jako:

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (28)$$

gdzie:

$Q_s$  - pojemność planowanego zasobnika [kWh]

$S_{TR}$  – moc transformatora [kVA]

$W_{sr}$  – stopień obciążenia stacji

$t$  – planowany czas podtrzymania [h]

Parametr  $S_{TR}$  jest to moc znamionowa transformatora SN/nN zainstalowana w stacji. Standardową jednostką dla sieci warszawskiej jest transformator 400kVA. Parametr  $W_{sr}$  wyznaczany jest z pomiarów realizowanych przez licznik bilansujący znajdujący się w stacji. Licznik ten jest zainstalowany tuż za transformatorem (patrząc od strony zasilania stacji) i jest ostatnim pomiarem sieciowym jakim na bieżąco dysponuje OSD. Parametr  $t$  jest zmienny i zależy od lokalizacji stacji i czasu niezbędnego przez brygady pogotowia do dotarcia w momencie awarii, a także ważności klientów jakich zasilą dany obiekt (szpital, ośrodek zdrowia, etc).

## **5 WDROŻENIE ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI STOEN OPERATOR CELEM REGULACJI PRZEPŁYWÓW W SIECI NISKIEGO NAPIĘCIA**

Zaopatrzenie województwa mazowieckiego oraz Warszawy w energię elektryczną odbywa się przede wszystkim w oparciu o klasyczne elektrownie systemowe zlokalizowane w województwie i poza nim. Istotne znaczenie mają także elektrociepłownie oraz lokalne elektrownie pracujące w sieciach dystrybucyjnych wysokiego napięcia 110 kV. Łączna moc elektryczna z istniejących źródeł energii jest niewystarczająca w stosunku do prognozowanych potrzeb województwa, a większość urządzeń wytwórczych w elektrowniach systemowych przekroczyła wiek 30 lat i powinna być zastępowana nowoczesnymi, wysokowydajnymi i niskoemisyjnymi źródłami energii. Sieci przesyłowe najwyższych napięć 400 kV i 220 kV oraz część ponadlokalnych sieci dystrybucyjnych wysokiego napięcia 110 kV nie zapewniają wymaganej przepustowości przesyłu energii i niezawodności działania, są również nierównomiernie rozmieszczone. Newralgicznym punktem zasilania elektroenergetycznego systemu przesyłowego jest nie w pełni domknięty pierścień linii najwyższych napięć wokół Warszawy.

W celu zapobieżenia ryzyku deficytu energii i wzrostu liczby awarii oraz ograniczenia uciążliwości dla środowiska, systemy produkcji, przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej wymagają szeregu działań inwestycyjnych w zakresie ich rozbudowy i modernizacji.

O jakości dostarczanej energii oraz niezawodności jej dostaw przede wszystkim decyduje niezawodność systemu elektroenergetycznego, czyli taki poziom funkcjonowania elementów systemu, który skutkuje dostarczeniem do odbiorców energii elektrycznej w wymaganej ilości i o parametrach mieszczących się w granicach ustalonych standardów. Dla systemu dystrybucyjnego obliczanymi wskaźnikami niezawodności są SAIDI, SAIFI i MAIFI.

Najczęściej przytaczany SAIDI to wskaźnik przeciętnego systemowego czasu trwania przerwy długiej i bardzo długiej, wyrażony w minutach na odbiorcę na rok, stanowiący sumę iloczynów czasu jej trwania i liczby odbiorców narażonych na skutki tej przerwy w ciągu roku podzieloną przez łączną liczbę obsługiwanych odbiorców.

Wskaźnik SAIDI nie obejmuje przerw krótszych niż 3 minuty i wyznaczany jest oddzielnie dla przerw planowanych i przerw nieplanowanych (z wyróżnieniem przerw katastrofalnych).



W tabelach poniżej podano dane poszczególnych rodzajów SAIDI dla obszaru Polski oraz Stoen Operator.(opracowanie własne)

**Tabela 17. Wartości SAIDI dla Polski (oprac. własne)**

| SAIDI         | 2011     | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|
|               | [minuty] |      |      |      |      |      |      |
| Nieplanowane  | 301      | 245  | 255  | 192  | 244  | 192  | 287  |
| Planowane     | 139      | 130  | 139  | 120  | 96   | 80   | 63   |
| Katastrofalne | 11       | 5    | 27   | 14   | 23   | 12   | 84   |
| Razem         | 452      | 380  | 421  | 325  | 363  | 272  | 433  |

**Tabela 18. Wartości SAIDI dla Stoen Operator (oprac. własne)**

| SAIDI         | 2011     | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|
|               | [minuty] |      |      |      |      |      |      |
| Nieplanowane  | 60,1     | 58,9 | 74,6 | 52,4 | 62,8 | 58,3 | 64,9 |
| Planowane     | 1,4      | 0,8  | 2,3  | 1,5  | 3,2  | 3,1  | 5,0  |
| Katastrofalne | 15,8     | 16,5 | 19,2 | 14,7 | 14,3 | 12,6 | 9,1  |
| Razem         | 60,1     | 58,9 | 74,6 | 52,4 | 62,8 | 58,3 | 64,9 |

Wpływ na wartości SAIDI ma charakterystyka sieci poszczególnych OSD (długość linii kablowych, izolowanych, stacje dwustronnie zasilane, itd.), automatyka szczególnie w sieci SN, efektywność operacyjna oraz w znacznym stopniu warunki atmosferyczne.

## 5.1 Opis sieci Stoen Operator

Stoen Operator w ramach posiadanej koncesji na dystrybucję energii elektrycznej dostarcza energię elektryczną przede wszystkim mieszkańcom Stolicy. W skład sieci elektroenergetycznej 110kV Stoen Operator wchodzi jedna stacja 220/110/15kV, czterdzieści jeden o górnym napięciu 110kV, blisko 200 km linii napowietrznych WN, w większości dwutorowych, i ok. 150 km linii kablowych WN.

Na dzień opracowywania niniejszej pracy stacja 220/110/15kV GPZ Towarowa zasilana jest napięciem 220 kV ze stacji GPZ Mory jednym torem dwutorowej linii napowietrznej 220 kV.

W stacji zainstalowany jest autotransformator 220/110kV oraz trzy transformatory 110/15kV. W warszawskiej sieci energetycznej jest obecnie ponad 6000 stacji elektroenergetycznych SN/nN. Stacje według typu dzielą się na wewnętrzne wolnostojące i wbudowane oraz napowietrzne słupowe. Na rysunku 12 przedstawiono rozmieszczenie stacji SN w Warszawie.



**Rys. 12 Rozmieszczenie stacji SN w Warszawie**

Stoen Operator eksploatuje głównie stacje wewnętrzne (przeszło 96%). Większość z nich to budynki wolnostojące wyposażone w 3-półową rozdzielnicę SN (2 pola liniowe i 1 pole

transformatorowe) transformator SN/nN standardowo o mocach 630 lub 800 kVA oraz 8 połową rozdzielnicę nN.

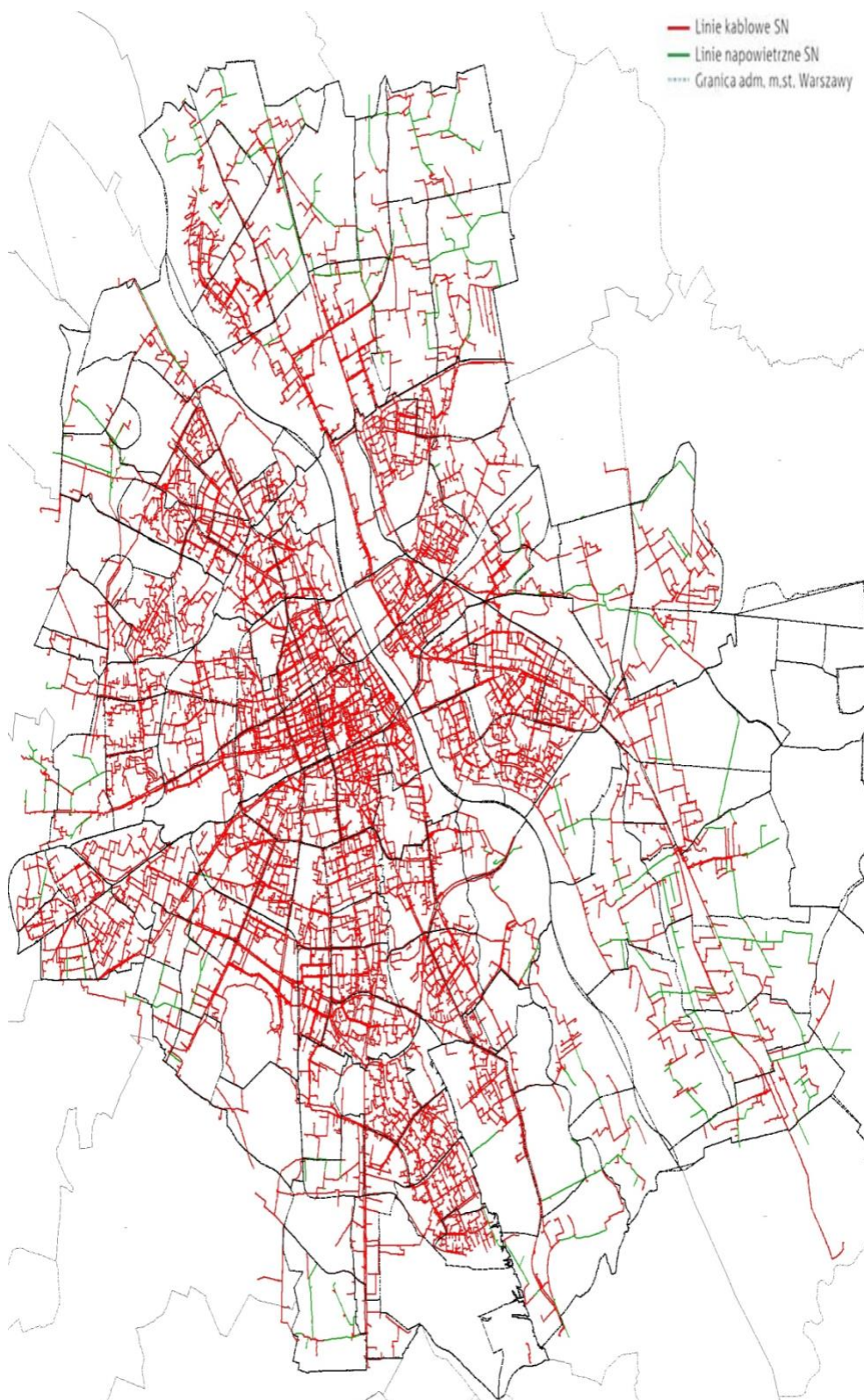
Rozbudowany układ SN stacji zazwyczaj skutkuje koniecznością zwiększenia liczby pól rozdzielnic nN. Budynek stacji, wyposażony już w rozdzielnice SN i nN, dostarczany jest jako prefabrykat na miejsce budowy i posadowiony na przygotowanym terenie w ramach jednej zakontraktowanej usługi. Transformator montowany jest w stacji już po jej posadowieniu. Budynki stacji są estetyczne, a dostęp do pomieszczeń został znacznie ułatwiony. Instalowane są również wskaźniki przepływu prądu zwarcia z sygnalizacją lokalną na elewacji oraz zdalną komunikacją do systemu SCADA pozwalającą dyspozytorom szybko zidentyfikować awarię i skierować brygady eksploatacji bezpośrednio w jej miejsce, co wpływa na znaczne skrócenie czasu usuwania przerw w zasilaniu.

Struktura sieci kablowej SN w Warszawie jest zróżnicowana zarówno pod względem wieku, jak i typu kabli. Łączna długość wszystkich odcinków sieci kablowej średniego napięcia to około 7 500 km. Większość to kable tradycyjne w nasyczonej olejem izolacji papierowej. Kable olejowe były układane w Warszawie od lat czterdziestych aż do końca ubiegłego wieku. Początkowo były to odcinki o przekrojach poniżej 70 mm<sup>2</sup>. W latach 90-tych nastąpił znaczny wzrost rozwoju sieci SN z wykorzystaniem kabli olejowych o przekrojach większych niż 70 mm<sup>2</sup>. W tym czasie budowano średnio 200 km linii rocznie, co stanowiło niemal czterokrotny wzrost w stosunku do poprzednich dziesięcioleci. Średni wiek dla tradycyjnych kabli SN o przekrojach do 70 mm<sup>2</sup> to przeszło 45 lat, a o przekrojach powyżej 70 mm<sup>2</sup> to około 30 lat.

W latach '80, '90, równoległe z kablami olejowymi, rozpoczęto stosowanie kabli w izolacji polietylenowej. Przez pierwszą dekadę, jako izolację kabli stosowano polietylen niesieciowany, który jednak okazał się materiałem mało wytrzymałym. Ze względu na wilgoć dostającą się do izolacji kabla niesieciowanego, powłoka ulegała zjawisku „drzewienia” – czyli powstawania mikropęknięć znacznie pogarszających stan izolacji. W kolejnych okresach inwestycyjnych tj. od lat '90 wprowadzono do użytku kable w izolacji z polietylenu usieciowanego, którego struktura jest znacznie bardziej odporna na warunki eksploatacyjne kabla ułożonego w ziemi.

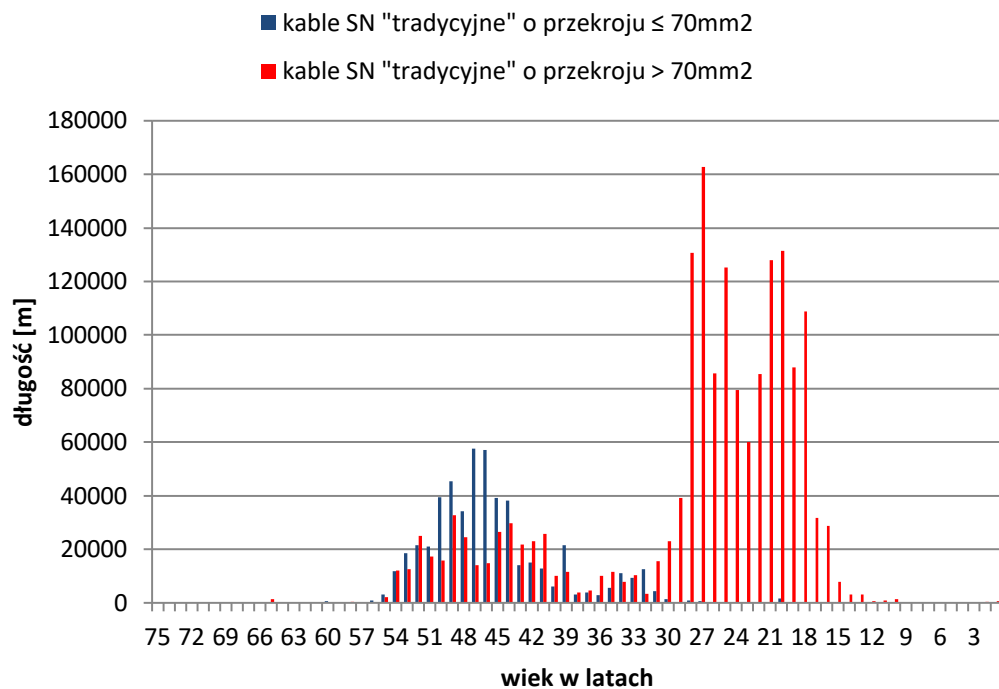
Na rysunku 13 przedstawiono przebieg linii SN w Warszawie.

Natomiast, na wykresach 1 i 2 przedstawiono strukturę wiekową olejowych kabli SN i kabli SN w izolacji polietylenowej.

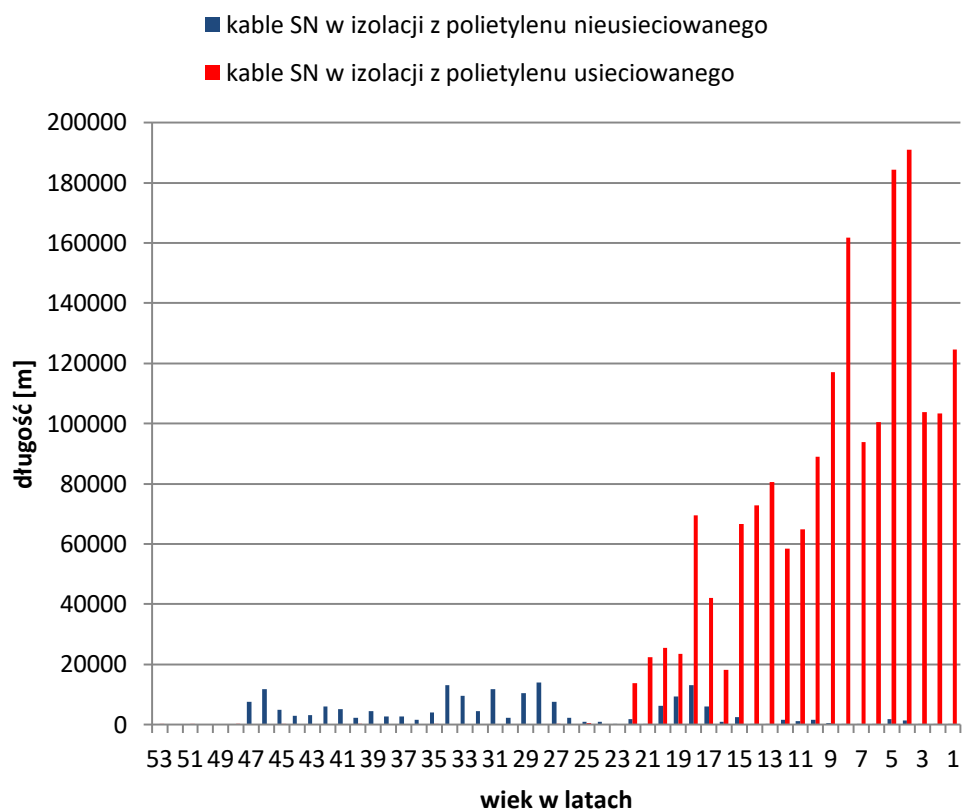


**Rys. 13 Przebieg linii SN w Warszawie**





Wykres 1. Struktura wiekowa olejowych kabli SN

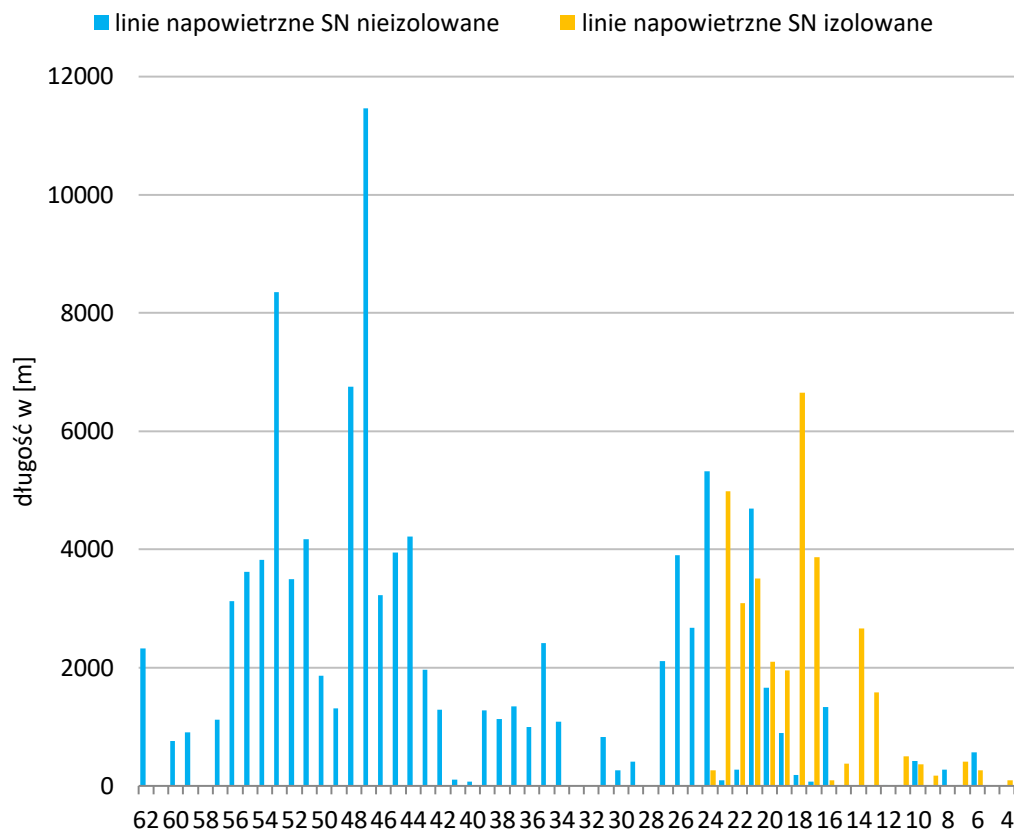


Wykres 2. Struktura wiekowa kabli SN w izolacji polietylenowej

Nasylenie dzielnic Warszawy siecią kablową odwzorowuje charakterystykę urbanistyczną miasta. Najwięcej linii kablowych ułożonych jest w najstarszych dzielnicach, w centrum miasta oraz bezpośrednio do niego przylegających obszarów, tj.: Śródmieście, Ochota, Wola, Mokotów, Praga Południe, Żoliborz, Praga Północ, Targówek oraz Bemowo. Dzielnice obrzeżne, charakteryzujące się młodszą zabudową, powstałą w ostatnim trzydziestoleciu, dysponują mniej zagęszczoną siecią kablową SN. Są to jednak obszary, które nadal będą się intensywnie rozwijać ze względu na ciągły przyrost liczby mieszkańców Warszawy.

Linie napowietrzne średniego napięcia stanowią około 2,5% warszawskiej sieci dystrybucyjnej SN w Warszawie. Praktycznie nie występują już w centrum miasta, ale w dzielnicach takich jak Wawer czy Białoleka stanowią jeszcze kilkanaście i więcej procent ogółu sieci SN i nadal pełnią funkcję sieci dystrybucyjnych. Ich odsetek stale się zmniejsza, ponieważ istniejące odcinki są sukcesywnie kablowane. Sieć napowietrzna jest zróżnicowana zarówno pod względem wieku jak i typu. Przeważają linie z przewodami nieizolowanymi. Linie napowietrzne, których kablowanie nie jest uzasadnione ekonomicznie, poddawane są modernizacji polegającej na wymianie przewodów na izolowane, dzięki czemu zmniejsza się ich awaryjność.

Struktura sieci kablowej i napowietrznej SN jest zróżnicowana w zależności od specyfiki obszaru. Centrum miasta charakteryzuje się bardzo gęstą siecią kablową o szerokim przedziale wiekowym, gdzie w jednej trasie leży zazwyczaj kilka linii kablowych, a linie napowietrzne praktycznie nie występują. Struktura rodzajowa kabli także jest zróżnicowana zarówno pod względem typu jak i przekrojów kabli. W dzielnicach przylegających do centrum Warszawy, gdzie nie występuje już tak gęsta zabudowa jak w centrum, infrastruktura elektroenergetyczna SN jest mniej złożona. Dla całej miejskiej sieci SN odsetek skablowania sieci wynosi ponad 97%.



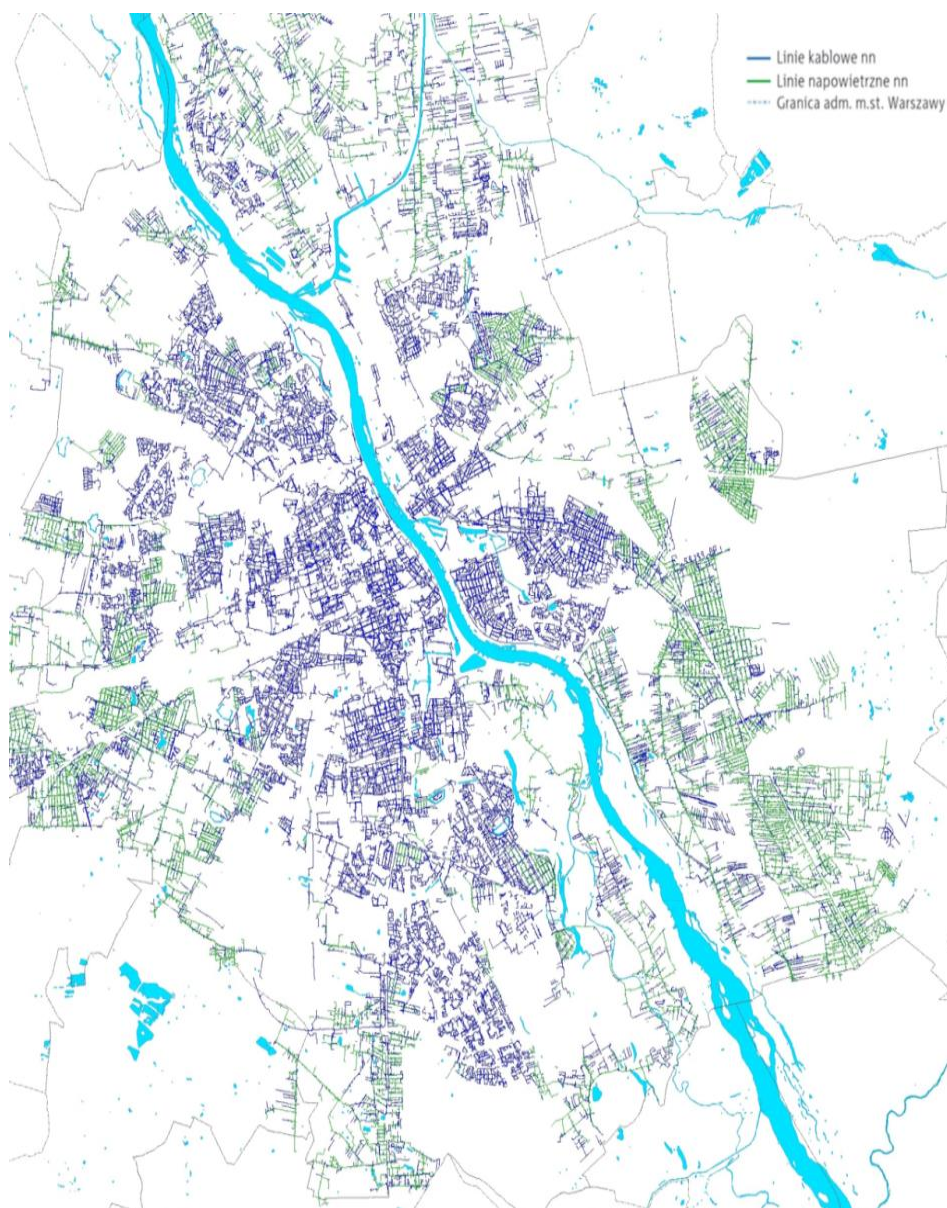
**Wykres 3. Struktura wiekowa linii napowietrznych SN**

Wyraźne różnice można zaobserwować zestawiając ze sobą lewobrzeżną i prawobrzeżną część miasta, co zostało przedstawione w tabeli 19. Po zachodniej stronie Warszawy sieci jest ponad dwa razy więcej niż po stronie wschodniej. Wynika to z większego zurbanizowania tego obszaru. Wschodnia strona Wisły to miejsce gdzie znajduje nadal wyraźny odsetek linii napowietrznych średniego napięcia, szczególnie w dzielnicach granicznych miasta. W przeciągu najbliższych lat większość pozostałych linii napowietrznych zostanie skablowana.

**Tabela 19. Procentowy udział sieci SN w podziale na część miasta**

|                       | lewobrzeżna<br>Warszawa | prawobrzeżna<br>Warszawa |
|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| linie kablowe SN      | 68,5 %                  | 30%                      |
| linie napowietrzne SN | 0,8 %                   | 1,7%                     |

Linie niskiego napięcia w Warszawie to głównie linie kablowe (ok. 80% całości), jednak w eksploatacji pozostaje jeszcze znaczna część linii napowietrznych. Sieć elektroenergetyczna niskiego napięcia w Śródmieściu oraz w pozostałych dzielnicach skupionych wokół centrum Warszawy to w większości linie kablowe zasilające złącza wolno stojące lub wbudowane w elewacje budynków. Większość linii napowietrznych zlokalizowana jest na skrajnych obszarach miasta, gdzie kablowanie nie było uzasadnione ekonomicznie oraz technicznie. W tych obszarach klienci zasilani są w większości przypadków z linii napowietrznych przez przyłącza napowietrzne nN. Na rysunku 14 przedstawiono przebieg linii nN w Warszawie.



**Rys. 14 Przebieg linii nN w Warszawie**



Na obszarach leśnych lub innych terenach podatnych w większym stopniu na zjawiska pogodowe takie jak silne wiatry, które mogą powodować przerwy w dostawie energii elektrycznej, stosuje się linię izolowaną lub kabluje się istniejącą linię napowietrzną. Takie standardy pozwalają utrzymać niski poziom awaryjności sieci nN.

W Warszawie z roku na rok zwiększa się liczba ludności, liczba mieszkań oddanych do użytkowania na 10.000 ludności, liczba zarejestrowanych samochodów osobowych na 1.000 ludności oraz liczba podmiotów gospodarki narodowej w rejestrze REGON na 10.000 ludności w wieku produkcyjnym. Na koniec 2017 r. ludność, która faktycznie zamieszkała w stolicy wynosiła 1,76 mln. Według opublikowanej w 2017 r. prognozy GUS do 2030 r. w Warszawie wciąż będzie przybywało mieszkańców, jednak w tempie wolniejszym niż do tej pory. Do 2020 r. dynamika wzrostu liczby mieszkańców będzie podobna do obecnie występującej (+0,5% rocznie). Natomiast, w kolejnych latach dynamika będzie maleć, aby w 2030 r. zanotować 0,2% wzrostu oraz liczbę mieszkańców na poziomie ok. 1,84 mln.

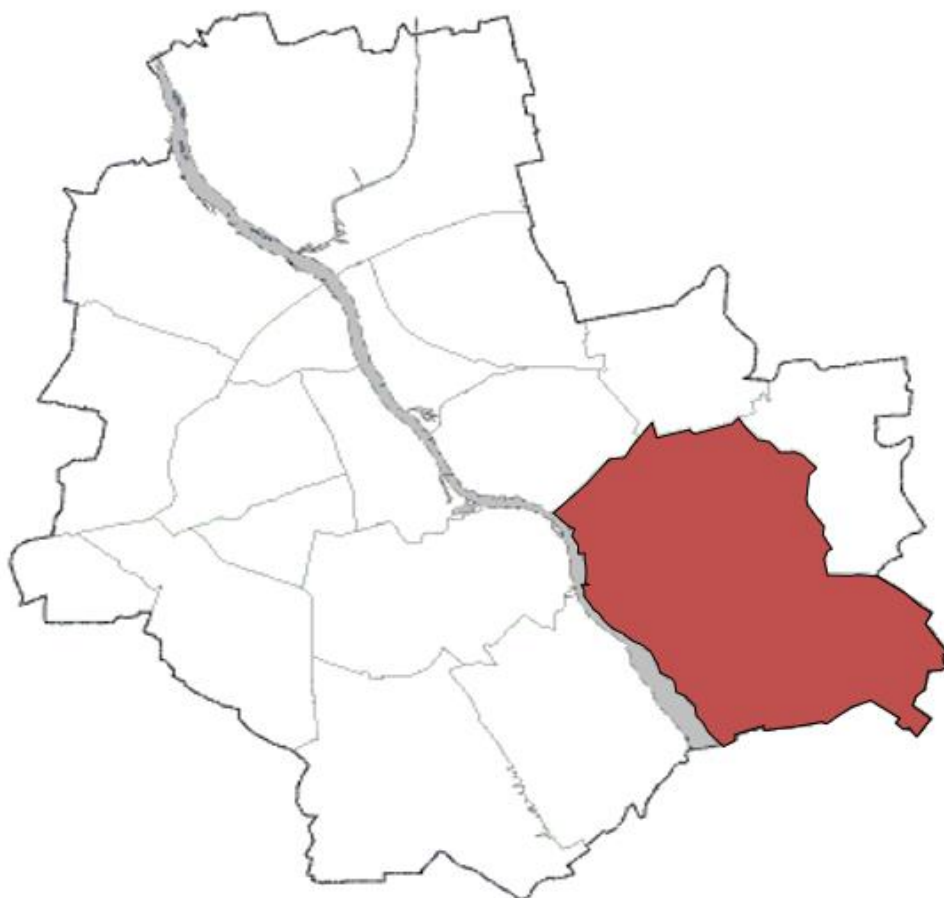
Analizując trendy rozwoju miasta i zapotrzebowania dzielnic stolicy na moc, widać, że w przyszłych latach obserwować będziemy wzrost mocy szczytowych, który wywołany będzie przede wszystkim czynnikami związanymi m.in. z elektromobilnością oraz ocieplaniem się klimatu i wykorzystywaniem klimatyzacji w obiektach zarówno biurowych jak i domowych. Łączna prognozowana zmiana zapotrzebowania na moc do 2030 roku, na którą wpływ będą miały powyższe czynniki, może wynieść wg najbardziej rozwojowego scenariusza nawet dodatkowe 190 MW do ogólnego bilansu energetycznego miasta [51, 53]. W rzeczywistości spodziewany przyrost mocy będzie niższy i zależny jest od zmiennej koniunktury gospodarczej i zjawiska niejednoczesności przebiegów dobowych poszczególnych grup odbiorców.

Z tego powodu niezbędne są działania polegające na zwiększeniu przekrojów przewodów w obszarach centralnych miasta, modernizacji istniejących stacji SN/nN, itp. pozwalające na zwiększenie dystrybucji energii do odbiorców końcowych. W ramach cyklicznych analiz monitorowane są profile obciążenia poszczególnych stacji i ciągów, tak aby programy modernizacyjne uwzględniały bieżące trendy i pozwoliły na tworzenie docelowych topologii sieciowych.

## **5.2 Koncepcja zastosowania zasobników energii w dzielnicy Wawer**

Wawer to dzielnica miasta położona w południowo-wschodniej części na prawym brzegu Wisły, przedzielona w relacji północ-południe torami kolejowymi (rysunek 15). Dzielnicę

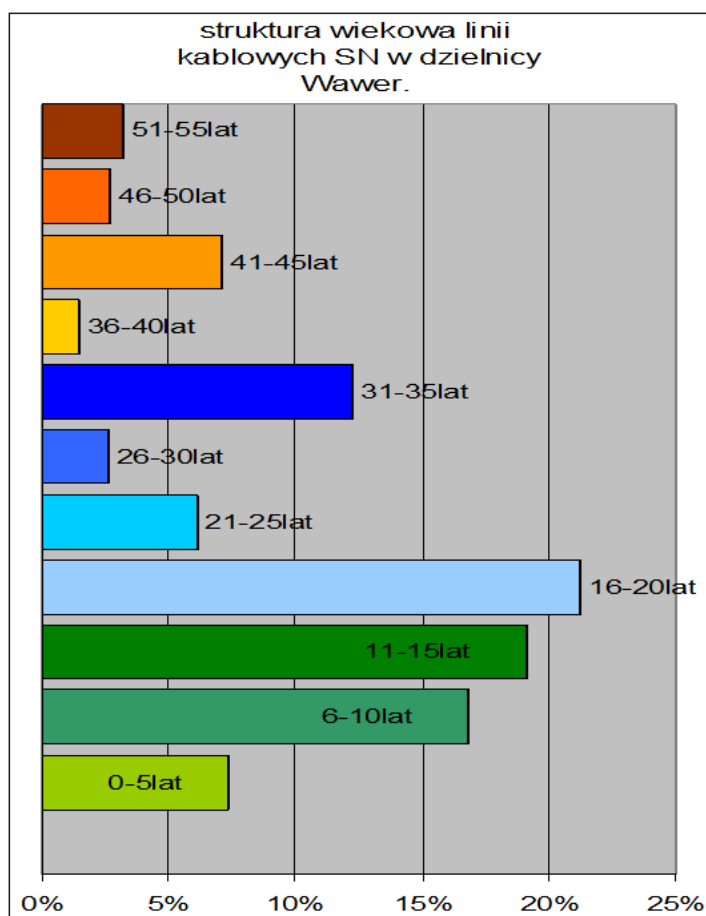
charakteryzuje niska zabudowa, głównie willowa (Anin) oraz brak dużych blokowisk i skupisk osiedli (wyjątkiem jest Marysin Wawerski). Wg danych GUS Wawer ma powierzchnię ponad 79 km<sup>2</sup> i liczy 68 815 mieszkańców, co przekłada się na gęstość zaludnienia równą 857 os/km<sup>2</sup>.



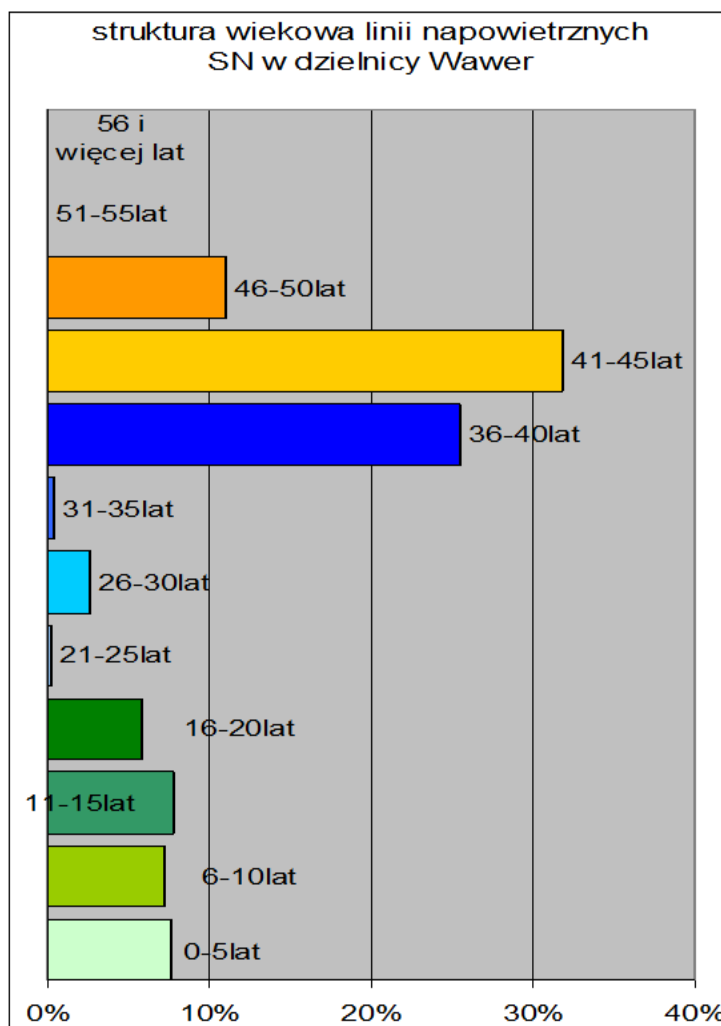
**Rys. 15 Lokalizacja dzielnicy na mapie Warszawy**

Zgodnie ze strukturą miejską i jej ukształtowaniem rozwija się także sieć elektroenergetyczna dzielnicy. Z uwagi, że początkowo zabudowa rozwijała się wzdłuż linii kolejowej, sieć elektroenergetyczna ma elementy charakterystyczne dla sieci terenowej. Zasilana jest z jednej stacji 110/15kV (RPZ Międzylesie) zlokalizowanej na północy dzielnicy, z której promieniowo odchodzą magistralne ciągi napowietrzne w kierunku południowym. Linie te zbiegają się w stacji RSM Falenica (15/15kV). Na obszarze Wawra można zlokalizować 3 linie napowietrzne SN stanowiące kręgosłup elektroenergetyczny dzielnicy. Długość sieci kablowej SN na tym obszarze to ponad 174 km. Większość stanowią kable olejowe o przekrojach powyżej 70 mm<sup>2</sup>, których wiek przekracza 20 lat. Sieć napowietrzna stanowi ponad 15%. Jej wiek sięga 40 lat. Dominują linie nie izolowane o przekroju 35 i 50

mm<sup>2</sup>. Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono strukturę wiekową sieci SN w dzielnicy Wawer, zarówno dla linii kablowych, jak i napowietrznych.



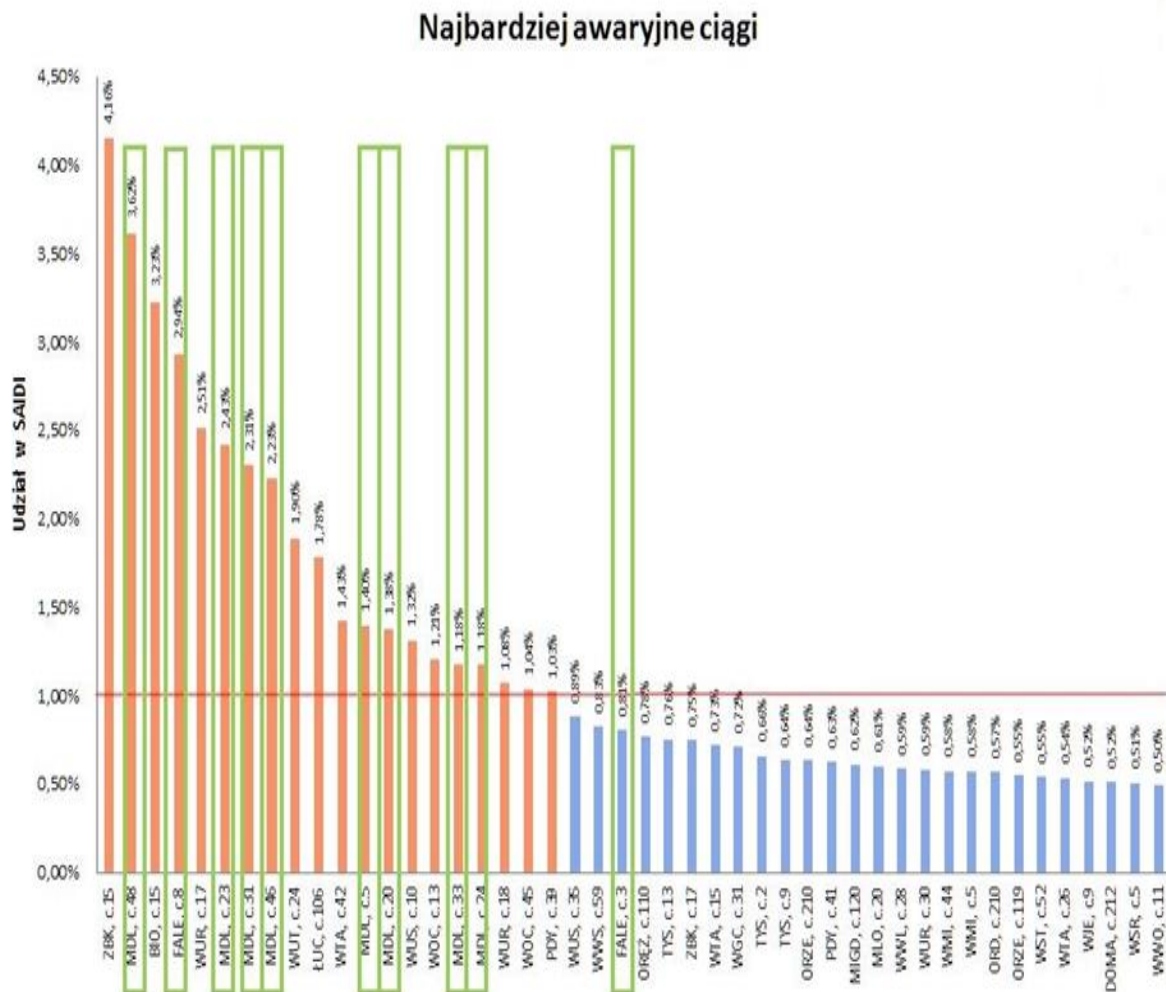
**Rys.16** Struktura wiekowa sieci SN w dzielnicy Wawer dla linii kablowych



**Rys.17 Struktura wiekowa sieci SN w dzielnicy Wawer dla linii napowietrznych**

Na bazie analizy awaryjności sieci SN na obszarze miasta oraz identyfikacji najbardziej awaryjnych pętli SN w roku 2018, zidentyfikowano ponad 40 ciągów liniowych, w których było najwięcej awarii. Dominują pętle o charakterze napowietrznym lub mieszanym jak również najstarsze linie SN. Wśród tej listy prawie 20% stanowiły linie zlokalizowane na terenie dzielnicy Wawer wychodzące z RPZ Międzylesie (MDL) oraz RSM Falenica (FALE). Każda z tych pętli ma ponad 1% udział w całkowitym rocznym SAIDI (przedział od 3,6% do 1,5%).

Na rysunku 18 przedstawiono strukturę awaryjności ciągów SN w 2018 r.



**Rys.18 Struktura awaryjności ciągów SN w 2018 r., zaznaczono ciągi wawerskie (oprac. własne)**

Zasadnym jest więc lokalizowanie zasobników energii w tych ciągach, w których spełnione są następujące kryteria:

- 1) udział danego ciągu SN w ogólnym SAIDI przekracza wartość 1%;
- 2) czas dojazdu od posterunku pogotowia energetycznego przekracza 10 min;
- 3) ciąg zasila wrażliwych i ważnych Klientów z punktu widzenia technicznego jak i wizerunkowego Spółki;
- 4) stacje napowietrzne wyposażone będą tylko w układy umożliwiające zastosowanie mobilnych zasobników energii (V2G).

Dla tak zaproponowanych warunków brzegowych na bazie metodologii przedstawionej we wcześniejszym rozdziale przygotowana została koncepcja rozmieszczenia zasobników w tej części stolicy.

### 5.3 Analiza zastosowania mobilnych i stacjonarnych magazynów energii na terenie dzielnicy Wawer

Dzielnica Wawer obejmuje prawie 400 stacji SN/ nN. Na bazie uwarunkowań funkcjonowania sieci dystrybucyjnej przygotowano listę wszystkich stacji SN/nN w zdefiniowanych ciągach SN.

Zgodnie z założoną metodologią wybrane zostały następujące ciągi:

1. MDL 48 – 19 stacji SN/nN w tym 0 stacji napowietrznych
2. FALE 8 – 15 stacji SN/nN w tym 5 stacji napowietrznych
3. MDL 23 – 8 stacji SN/nN w tym 0 stacji napowietrznych
4. MDL 31 – 20 stacji SN/nN w tym 3 stacji napowietrzne
5. MDL 46 – 19 stacji SN/nN w tym 2 stacje napowietrzne
6. MDL 5 – 23 stacje SN/nN w tym 8 stacji napowietrznych
7. MDL 20 – 5 stacji SN/nN w tym 3 napowietrzne
8. MDL 33 – 19 stacji SN/nN w tym 4 stacje napowietrzne

Ocenie kryterialnej zostały poddane wszystkie stacje w podanych powyżej ciągach pozwalając stworzyć matrycę przypisania zasobników do konkretnych lokalizacji. Dodatkowo, przyjęto założenie, że średnie obciążenie stacji SN/nN zależne jest od pomiarów w polach zasilających rozdzielnic nN (pomiar po stronie nN transformatora) co pozwala określić oczekiwaną moc zasobnika.

Zgodnie więc z wzorem (27) dla każdej ze stacji, która w danym ciągu została wytypowana do instalacji zasobnika (otrzymała najwyższą wartość), zaproponowano, w oparciu o wzór (28), pojemność zasobnika energii.

Ponadto, w celu wykonania analizy wyników dla poszczególnych ciągów pól z danej stacji zastosowano kryteria oceny wyboru stacji, gdzie:

- C1 – oznacza minimalizację czasu przejazdu pogotowia do miejsca awarii;
- C2 – oznacza maksymalizację dostaw energii elektrycznej w ramach świadczenia usługi;
- C3 – oznacza zabezpieczenie odbiorców priorytetowych;
- C4 – oznacza efekty wizerunkowe OSD;
- C5 – oznacza wpływ na kształt lokalnego profilu zapotrzebowania na moc;
- C6 – oznacza poprawę parametrów jakości energii elektrycznej.

Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzylesie, pole 5

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest siecią mieszaną kablowo-napowietrzną, z dominacją stacji wnetrzowych. Średnie obciążenie tej półpętli to: 80 A w zimie (styczeń) oraz 50 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 400 kVA, przy czym dla stacji napowietrznych jest to 250 kVA. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 20, dla ciągu SN zasilanego z pola 5 stacji MDL, pożądanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja napowietrzna 4155. Dla tej stacji suma punktów dla poszczególnych kryteriów jest największa.

**Tabela 20. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 5 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzylesie (MDL) pole 5 |             |             |          |           |           |           |           |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Nr Stacji                                                         | C1          | C2          | C3       | C4        | C5        | C6        | suma      |
| 9474                                                              | 7,25        | 8,25        | 11       | 12,5      | 12        | 10,25     | 61,25     |
| 9669                                                              | 8           | 8,75        | 3        | 13,5      | 14        | 11,25     | 58,5      |
| 10055                                                             | 7,5         | 8           | 6        | 16        | 12,5      | 12,5      | 62,5      |
| 10889                                                             | 7,25        | 8,25        | 11       | 12,5      | 12        | 10,25     | 61,25     |
| 10589                                                             | 8           | 8,75        | 3        | 13,5      | 14        | 11,25     | 58,5      |
| 9956                                                              | 6           | 8           | 4        | 16        | 12,5      | 12,5      | 59        |
| 4340                                                              | 8,25        | 9,25        | 6        | 17        | 12,5      | 12,75     | 65,75     |
| 4154                                                              | 7,25        | 8,75        | 6        | 16,25     | 12        | 11,25     | 61,5      |
| <b>4155</b>                                                       | <b>8,75</b> | <b>9,25</b> | <b>6</b> | <b>17</b> | <b>14</b> | <b>14</b> | <b>69</b> |
| 4198                                                              | 8,25        | 8,25        | 6        | 16        | 12,5      | 12,75     | 63,75     |
| 10804                                                             | 7,25        | 8,25        | 11       | 12,5      | 12        | 10,25     | 61,25     |
| 10735                                                             | 8           | 8,75        | 3        | 13,5      | 14        | 11,25     | 58,5      |
| 4029                                                              | 7,25        | 8,75        | 6        | 16,25     | 12        | 11,25     | 61,5      |
| 10978                                                             | 7,25        | 9,25        | 5,5      | 12,5      | 10,25     | 12,75     | 57,5      |
| 10802                                                             | 6,75        | 8,75        | 5,25     | 13,5      | 11,25     | 10,25     | 55,75     |
| 10545                                                             | 6,75        | 8,25        | 4,75     | 16        | 12,5      | 11,25     | 59,5      |
| 10577                                                             | 6,25        | 8,75        | 4        | 17        | 12,75     | 11,25     | 60        |
| 10848                                                             | 6,25        | 8,75        | 4        | 16,25     | 11,25     | 11,25     | 57,75     |
| 10578                                                             | 6           | 8           | 4        | 17        | 14        | 9,75      | 58,75     |

|       |      |      |     |       |      |       |       |
|-------|------|------|-----|-------|------|-------|-------|
| 10636 | 5,75 | 8,25 | 3,7 | 16    | 12   | 12    | 57,7  |
| 4285  | 7,25 | 8,75 | 6   | 17    | 12,5 | 12,75 | 64,25 |
| 4156  | 8    | 8,75 | 3   | 16,25 | 12   | 11,25 | 59,28 |
| 4336  | 8,25 | 8,75 | 6   | 16    | 14   | 12,75 | 65,75 |

Z uwagi na konstrukcję stacji i brak pomieszczeń zamkniętych należy zastosować układ mobilnego magazynu energii poprzez ulokowanie w jej pobliżu ładowarki samochodów elektrycznych z funkcją zwrotu energii do sieci dystrybucyjnej. Układ taki powinien być zasilany bezpośrednio z szyn rozdzielnic nN, aby móc zasilać wszystkie odbiory z tej stacji.

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też oczekiwana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 250 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 33% a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 45min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (29)$$

$$Q_s = 250kVA * 0,33 * 0,75h \quad (30)$$

$$Q_s = 61,785kVA * h \quad (31)$$

#### Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie pole 23

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest siecią czysto kablową o dość jednolitym przekroju żył roboczych (ponad 120mm<sup>2</sup>). Dominują głównie stacje kontenerowe. Średnie obciążenie tej półpętli to: 90 A w zimie (styczeń) oraz 55 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 630 kVA. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 21 dla ciągu SN zasilanego z pola 23 stacji MDL, oczekiwanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja kontenerowa 10932.

**Tabela 21. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 23 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie ( MDL) pole 23 |      |      |      |      |      |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Nr Stacji                                                          | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6    | suma  |
| 10529                                                              | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5 | 12   | 12    | 63    |
| 9923                                                               | 8    | 8,75 | 3    | 13,5 | 14   | 11,25 | 58,5  |
| 10919                                                              | 7,5  | 8    | 3,75 | 16   | 12,5 | 12,5  | 60,25 |
| 10525                                                              | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5 | 12   | 10,25 | 61,25 |



|       |      |      |   |       |       |       |       |
|-------|------|------|---|-------|-------|-------|-------|
| 10866 | 8    | 8,75 | 3 | 16    | 11,25 | 11,25 | 58,25 |
| 10963 | 6    | 8    | 4 | 17    | 14    | 14    | 63    |
| 10932 | 8,25 | 9,25 | 6 | 17    | 12,5  | 14    | 67    |
| 10718 | 7,25 | 8,75 | 6 | 16,25 | 10,25 | 11,25 | 59,75 |

Układ stacji wewnętrznej pozwala zastosować stacjonarny magazyn energii. Nie mniej jednak z uwagi na odległość od najbliższego posterunku służb eksploatacyjnych dystrybutora czas dojazdu do stacji jest znaczny.

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też oczekiwana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 400 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 20%, a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 40min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (32)$$

$$Q_s = 400kVA * 0,20 * 0,66h \quad (33)$$

$$Q_s = 53,33kVA * h \quad (34)$$

#### Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie, pole 31

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest siecią mieszaną kablowo-napowietrzną, z dominacją stacji wewnętrznych kontenerowych. Pętla swoim zasięgiem obejmuje prawie całą dzielnicę. Średnie obciążenie tej pętli to: 38 A w zimie (styczeń) oraz 50 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 400 kVA, przy czym dla stacji napowietrznych wielkość ta jest identyczna z uwagi na gęstą zabudowę mieszkaniową zasilaną z tego typu obiektów. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 22 dla ciągu SN zasilanego z pola 31 stacji MDL, pożądanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja napowietrzna 4018.

**Tabela 22. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 31 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie ( MDL) pole 31 |      |      |      |      |      |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Nr Stacji                                                          | C1   | C2   | C3   | C4   | C5   | C6    | suma  |
| 10651                                                              | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5 | 12   | 12    | 63    |
| 10875                                                              | 8    | 8,75 | 3    | 13,5 | 14   | 11,25 | 58,5  |
| 10912                                                              | 7,5  | 8    | 3,75 | 16   | 12,5 | 12,5  | 60,25 |

|       |      |      |      |       |       |       |       |
|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 10811 | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5  | 12    | 10,25 | 61,25 |
| 10502 | 8    | 8,75 | 3    | 16    | 11,25 | 11,25 | 58,25 |
| 9921  | 6    | 8    | 4    | 17    | 14    | 14    | 63    |
| 10810 | 8,25 | 9,25 | 6    | 17    | 12,5  | 12,75 | 65,75 |
| 10575 | 7,25 | 8,75 | 11   | 16,25 | 10,25 | 11,25 | 64,75 |
| 9106  | 8    | 8,75 | 3    | 13,5  | 14    | 14    | 61,25 |
| 10634 | 6,25 | 8,75 | 4    | 17    | 12,75 | 11,25 | 60    |
| 10600 | 6,25 | 8,75 | 3,5  | 16,25 | 11,25 | 11,25 | 57,25 |
| 4127  | 7,25 | 8,75 | 6    | 12,5  | 12    | 14    | 60,56 |
| 4018  | 8,25 | 9,25 | 11   | 17    | 12,5  | 16    | 74    |
| 4293  | 8,25 | 8,75 | 5,25 | 16    | 14    | 12,5  | 64,75 |
| 10814 | 7,25 | 8,25 | 11   | 16    | 12,5  | 12,5  | 67,5  |
| 10832 | 8    | 8,75 | 3    | 12,5  | 12    | 10,25 | 54,5  |
| 10683 | 6,75 | 8,25 | 5,25 | 13,5  | 11,25 | 10,25 | 55,25 |
| 10766 | 6,75 | 7,5  | 4,75 | 16    | 12,5  | 16    | 63,5  |
| 10756 | 6,25 | 8,75 | 4    | 17    | 12,75 | 11,25 | 60    |
| 10570 | 6,25 | 7    | 11   | 16,25 | 11,25 | 11,25 | 63    |

Z uwagi na konstrukcje stacji i brak pomieszczeń zamkniętych w stacji należy zastosować układ mobilnego magazynu energii poprzez ulokowanie w jej pobliżu ładowarki samochodów elektrycznych z funkcją zwrotu energii do sieci dystrybucyjnej. Układ taki powinien być zasilany bezpośrednio z szyn rozdzielniczy nN aby móc zasilać wszystkie odbiory z tej stacji.

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też oczekiwana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 400 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 60% a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 60min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (35)$$

$$Q_s = 400kVA * 0,60 * 1h \quad (36)$$

$$Q_s = 240kVA * h \quad (37)$$

Tak duża pojemność układu nie jest ekonomicznie uzasadniona do realizacji poprzez mobilne magazyny energii. Zasadnym jest więc dokonanie analizy przebudowy stacji napowietrznej na kontenerową i instalacja stacjonarnego zasobnika energii o wyliczonej pojemności.

#### Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzylesie, pole 20

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest krótką w zakresie długości i rozpiętości siecią mieszaną kablowo-napowietrzną, z dominacją stacji napowietrznych. Średnie obciążenie tej pętli to: 60 A w zimie (styczeń) oraz 10 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 630 kVA, przy czym dla stacji napowietrznych jest to 250 kVA. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 23, dla ciągu SN zasilanego z pola 20 stacji MDL, pożądanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja napowietrzna 4294.

**Tabela 23. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 20 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzylesie ( MDL) pole 20 |      |      |      |       |      |       |       |
|---------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| Nr Stacji                                                           | C1   | C2   | C3   | C4    | C5   | C6    | Suma  |
| 10737                                                               | 6,75 | 8,25 | 4,75 | 16    | 12,5 | 11,25 | 59,5  |
| 10836                                                               | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5  | 12   | 10,25 | 61,25 |
| 4083                                                                | 6    | 9,25 | 6    | 17    | 12,5 | 12,75 | 63,5  |
| 4322                                                                | 7,25 | 8,75 | 6    | 16,25 | 12   | 11,25 | 61,5  |
| 4294                                                                | 8,25 | 9,25 | 6    | 17    | 12,5 | 12,75 | 65,75 |

Z uwagi na konstrukcje stacji i brak pomieszczeń zamkniętych w stacji należy zastosować układ mobilnego magazynu energii poprzez ulokowanie w jej pobliżu ładowarki samochodów elektrycznych z funkcją zwrotu energii do sieci dystrybucyjnej. Układ taki powinien być zasilany bezpośrednio z szyn rozdzielnic nN, aby móc zasilać wszystkie odbiory z tej stacji.

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też oczekiwana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 160 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 30% a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 40min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (38)$$

$$Q_s = 160kVA * 0,30 * 0,66h \quad (39)$$

$$Q_s = 32kVA * h \quad (40)$$

Otrzymana pojemność magazynu odpowiada bateriom, które są stosowane w obecnie produkowanych pojazdach elektrycznych. Pozwala ta ograniczyć konstrukcję punktu ładowania do 1 gniazda.

Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie, pole 33

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest najdłuższą siecią mieszaną kablowo-napowietrzną objętą analizą. Dominują w niej stacje wnetrzowe, ale przeplatane są siecią napowietrzną SN. Średnie obciążenie tej pólpetli to: 55 A w zimie (styczeń) oraz 40 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 400 kVA, podobnie jest dla stacji napowietrznych. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 24, dla ciągu SN, zasilanego z pola 33 stacji MDL, pożądanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja napowietrzna 4323.

**Tabela 24. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 33 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie ( MDL) pole 33 |      |      |      |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Nr Stacji                                                          | C1   | C2   | C3   | C4    | C5    | C6    | Suma  |
| 10642                                                              | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5  | 12    | 12    | 63    |
| 10728                                                              | 8    | 8,75 | 3    | 13,5  | 14    | 11,25 | 58,5  |
| 10644                                                              | 7,5  | 8    | 3,75 | 16    | 12,5  | 12,5  | 60,25 |
| 10764                                                              | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5  | 12    | 10,25 | 61,25 |
| 10699                                                              | 8    | 8,75 | 3    | 16    | 11,25 | 11,25 | 58,25 |
| 10840                                                              | 6    | 8    | 4    | 15    | 12,5  | 11,25 | 56,75 |
| 10808                                                              | 8,25 | 9,25 | 6    | 17    | 12,75 | 11,25 | 64,5  |
| 4017                                                               | 7,25 | 5    | 11   | 16,25 | 11,25 | 11,25 | 62    |
| 4323                                                               | 8    | 12,5 | 11   | 17    | 14    | 14    | 76,5  |
| 10618                                                              | 6,25 | 5,75 | 4    | 15    | 12,75 | 11,25 | 55    |
| 10666                                                              | 8,25 | 10   | 11   | 16    | 14    | 12,5  | 71,75 |
| 10645                                                              | 7,25 | 8,25 | 10,5 | 12,5  | 12    | 10,25 | 60,75 |
| 10711                                                              | 8    | 11   | 3    | 13,5  | 10    | 11,25 | 56,75 |
| 10583                                                              | 8,25 | 8,75 | 11   | 16    | 9,5   | 12,5  | 66    |
| 10642                                                              | 7,25 | 8,25 | 11   | 12,5  | 12    | 10,25 | 61,25 |
| 10850                                                              | 6,5  | 12   | 3    | 13,5  | 10    | 11,25 | 56,25 |
| 10547                                                              | 6,25 | 8,75 | 4    | 16,25 | 11,25 | 11,25 | 57,75 |
| 4338                                                               | 7,25 | 7,5  | 10   | 12,5  | 12    | 14    | 63,25 |
| 4123                                                               | 8,25 | 9,25 | 6    | 17    | 12,5  | 12,75 | 65,75 |

Z uwagi na konstrukcje stacji i brak pomieszczeń zamkniętych w stacji należy zastosować układ mobilnego magazynu energii poprzez ulokowanie w jej pobliżu ładowarki samochodów elektrycznych z funkcją zwrotu energii do sieci dystrybucyjnej. Układ taki powinien być zasilany bezpośrednio z szyn rozdzielnic nN aby móc zasilać wszystkie odbiory z tej stacji.

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też pożądana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 400 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 45% a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 45min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (41)$$

$$Q_s = 400kVA * 0,45 * 0,75h \quad (42)$$

$$Q_s = 135kVA * h \quad (43)$$

Otrzymana pojemność układu zasobnika jest duża, jak na możliwości samochodów elektrycznych. Można by ją było otrzymać poprzez zastosowanie min 4 punktów ładowania co jest ekonomicznie wątpliwe. Zasadne wydaje się, przebudowa stacji napowietrznej na stację kontenerową wyposażoną w stacjonarny zasobnik energii o żądanej pojemności.

#### Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie, pole 46

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest siecią mieszaną kablowo-napowietrzną, z dominacją stacji wnetrzowych, oplatająca swym zasięgiem prawie całą dzielnicę. Średnie obciążenie tej półpętli to: 70 A w zimie (styczeń) oraz 60 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 400 kVA, przy czym dla stacji napowietrznych jest to 250 kVA. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 25, dla ciągu SN, zasilanego z pola 46 stacji MDL, wyznaczonym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja wnetrzowa 10818, pozwalająca na montaż zasobnika wewnątrz budynku.

**Tabela 25. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 46 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie ( MDL) pole 46 |      |      |      |      |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Nr Stacji                                                          | C1   | C2   | C3   | C4   | C5    | C6    | Suma  |
| 10628                                                              | 7,25 | 8,25 | 3,75 | 12,5 | 12    | 12    | 55,75 |
| 10979                                                              | 8    | 8,75 | 3    | 16   | 12,5  | 11,25 | 59,5  |
| 9717                                                               | 7,5  | 8    | 3,75 | 17   | 12,75 | 11,25 | 60,25 |

|       |      |       |      |       |       |       |       |
|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 9024  | 7,25 | 8,25  | 11   | 15    | 11,25 | 11,25 | 64    |
| 9026  | 8    | 8,75  | 3    | 17    | 14    | 14    | 64,75 |
| 9511  | 6    | 8     | 4    | 12    | 14    | 12    | 56    |
| 9829  | 8,25 | 9,25  | 6    | 12    | 12,5  | 12,75 | 60,75 |
| 4342  | 7,25 | 8,75  | 5    | 16,25 | 10,25 | 11,25 | 58,75 |
| 10608 | 8    | 8,75  | 3    | 13,5  | 14    | 14    | 61,25 |
| 9993  | 6,25 | 12,5  | 4    | 17    | 12,75 | 11,25 | 63,75 |
| 10922 | 8,25 | 8,75  | 10,5 | 16    | 14    | 9,75  | 67,25 |
| 9749  | 7,25 | 8,25  | 11   | 12,5  | 12    | 10,25 | 61,25 |
| 10819 | 8    | 8,75  | 3    | 13,5  | 10,25 | 11,25 | 54,75 |
| 10818 | 8,25 | 15    | 11   | 16    | 14    | 14    | 78,25 |
| 9754  | 7,25 | 8,25  | 11   | 12,5  | 12    | 10,25 | 61,25 |
| 4208  | 8    | 8,75  | 3    | 13,5  | 11    | 13,75 | 58    |
| 10018 | 6,25 | 11    | 4    | 16,25 | 11,25 | 11,25 | 60    |
| 10660 | 7,25 | 10,75 | 6    | 12,5  | 12    | 11,25 | 59,75 |
| 10812 | 8,25 | 9,25  | 7,5  | 17    | 12,5  | 10    | 64,5  |

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też pożądana pojemność takiego układu. Przy założeniach, że wielkość transformatora to 630 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 50%, a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 30min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (44)$$

$$Q_s = 630kVA * 0,50 * 0,5h \quad (45)$$

$$Q_s = 157,5kVA * h \quad (46)$$

#### Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie, pole 48

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest siecią kablową o zróżnicowanym przekroju żył roboczych i konstrukcji stacji wewnętrznych. Średnie obciążenie tej pętli to: 60 A w zimie (styczeń) oraz 45 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 400 kVA. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 26, dla ciągu SN, zasilanego z pola 48

stacji MDL, oczekiwanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja 9101, zlokalizowana w centrum osiedla mieszkaniowego.

**Tabela 26. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 48 stacji MDL**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RPZ Międzyzlesie ( MDL) pole 48 |           |           |           |           |           |              |              |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| Nr Stacji                                                          | C1        | C2        | C3        | C4        | C5        | C6           | Suma         |
| 10732                                                              | 7,25      | 11        | 9         | 12,5      | 12        | 12           | 63,75        |
| 10878                                                              | 8         | 12,5      | 3         | 13,5      | 14        | 11,25        | 62,25        |
| 10852                                                              | 7,5       | 7,5       | 4,5       | 16        | 12,5      | 12,5         | 60,5         |
| 10943                                                              | 10,5      | 15        | 7         | 12,5      | 12        | 13,5         | 70,5         |
| 9029                                                               | 8         | 8,75      | 10,5      | 16        | 11,25     | 11,25        | 65,75        |
| 9092                                                               | 6         | 8         | 4         | 13        | 12        | 14           | 57           |
| <b>9101</b>                                                        | <b>11</b> | <b>15</b> | <b>11</b> | <b>17</b> | <b>14</b> | <b>12,75</b> | <b>80,75</b> |
| 9059                                                               | 7,25      | 8,75      | 9,75      | 16,25     | 10,25     | 26,25        | 78,5         |
| 9060                                                               | 8         | 9,25      | 3         | 13,5      | 14        | 14,75        | 62,5         |
| 9154                                                               | 6,25      | 5         | 4         | 17        | 12,75     | 11,25        | 56,25        |
| 9062                                                               | 9,5       | 9         | 10        | 16        | 11,25     | 12,5         | 68,25        |
| 9080                                                               | 7,25      | 5,75      | 11        | 12,5      | 12,5      | 12,75        | 61,75        |
| 9975                                                               | 8         | 15        | 3         | 13,5      | 14        | 11,25        | 64,75        |
| 9242                                                               | 8,25      | 8,25      | 8,25      | 16        | 9,75      | 12,5         | 63           |
| 9061                                                               | 7,25      | 11        | 11        | 12,5      | 12        | 10,25        | 64           |
| 9055                                                               | 9         | 8,75      | 3         | 13,5      | 10,5      | 15,25        | 60           |
| 9054                                                               | 6,25      | 8,25      | 4         | 16,25     | 11,25     | 11,25        | 57,25        |
| 9097                                                               | 7,25      | 12        | 6         | 12,5      | 8,5       | 14           | 60,25        |
| 9037                                                               | 8,25      | 8,75      | 5         | 17        | 12,5      | 20,25        | 71,75        |

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też pożądana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 400 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 40% a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 45min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (47)$$

$$Q_s = 400kVA * 0,40 * 0,75h \quad (48)$$

$$Q_s = 120kVA * h \quad (49)$$

Z uwagi na konstrukcję stacji możliwy jest montaż urządzeń bez realizacji skomplikowanych prac budowlanych.

Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RSM Falenica, pole 8

Sieć zasilana z tego odpływu w stacji 110/15kV jest siecią mieszaną kablowo-napowietrzną, zlokalizowaną na południu dzielnicy, z dominacją stacji wnetrzowych. Takie położenie półpętli skutkuje najdłuższym czasem reakcji na możliwe zakłócenia w pracy sieci SN. Średnie obciążenie tej półpętli to: 55 A w zimie (styczeń) oraz 30 A w lecie (czerwiec), a przeciętna wielkość transformatorów SN/nN zasilających odbiorców końcowych w tych stacjach to 250 kVA, przy czym dla stacji napowietrznych jest to również 250 kVA. Na bazie wyników analizy oceny kryterialnej, przedstawionych w tabeli 27, dla ciągu SN, zasilanego z pola 8 stacji Falenica, oczekiwanym miejscem ulokowania zasobnika energii jest stacja napowietrzna 4114.

**Tabela 27. Wyniki analizy dla ciągu SN zasilanego z pola 8 stacji FALE**

| Ciąg liniowy SN zasilany ze stacji RSM Falenica ( Fale) pole 8 |           |           |          |              |              |             |             |
|----------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Nr Stacji                                                      | C1        | C2        | C3       | C4           | C5           | C6          | Suma        |
| 9836                                                           | 5         | 8,25      | 10,5     | 12,5         | 10,5         | 12          | 58,75       |
| 9634                                                           | 8         | 8,75      | 3        | 13,5         | 11           | 11,25       | 55,5        |
| 9759                                                           | 9,25      | 8         | 3,75     | 16           | 9,75         | 12,5        | 59,25       |
| 9642                                                           | 7,25      | 8,25      | 11       | 12,5         | 12,75        | 10,25       | 62          |
| 9043                                                           | 8         | 8,75      | 3        | 16           | 11,25        | 11,25       | 58,25       |
| 10638                                                          | 10,25     | 8         | 4        | 17           | 10           | 14          | 63,25       |
| 10611                                                          | 8,25      | 9,25      | 6        | 17           | 12,5         | 12,75       | 65,75       |
| 10632                                                          | 7,25      | 11,75     | 11       | 16,25        | 10,25        | 11,25       | 67,75       |
| 10698                                                          | 10        | 8,75      | 3        | 13,5         | 14           | 20          | 69,25       |
| 10831                                                          | 6,25      | 10,5      | 4        | 17           | 12,75        | 11,25       | 61,75       |
| <b>4114</b>                                                    | <b>11</b> | <b>15</b> | <b>0</b> | <b>15,25</b> | <b>12,75</b> | <b>26,5</b> | <b>80,5</b> |
| 4148                                                           | 7,25      | 9,25      | 0        | 12           | 11,25        | 10,25       | 50          |
| 4252                                                           | 8         | 10,75     | 3        | 13,5         | 14           | 11,25       | 60,5        |
| 4250                                                           | 11        | 15        | 0        | 12           | 12,5         | 26,5        | 77          |
| 4150                                                           | 9,75      | 15        | 6        | 16           | 12,5         | 12,5        | 71,75       |



Z uwagi na konstrukcje stacji i brak pomieszczeń zamkniętych w stacji należy zastosować układ mobilnego magazynu energii poprzez ulokowanie w jej pobliżu ładowarki samochodów elektrycznych z funkcją zwrotu energii do sieci dystrybucyjnej. Układ taki powinien być zasilany bezpośrednio z szyn rozdzielnic  $nN$ , aby móc zasilać wszystkie odbiory z tej stacji.

Zgodnie z wzorem (28) wyznaczona została też oczekiwana pojemność takiego układu przy założeniach, że wielkość transformatora to 250 kVA, średni stopień obciążenia stacji to 60% a czas podtrzymania niezbędny do reakcji przez dyspozytora i dojazdu służb Stoen Operator to 70min.

$$Q_s = S_{TR} * W_{sr} * t \quad (40)$$

$$Q_s = 250kVA * 0,60 * 1,16h \quad (51)$$

$$Q_s = 174kVA * h \quad (52)$$

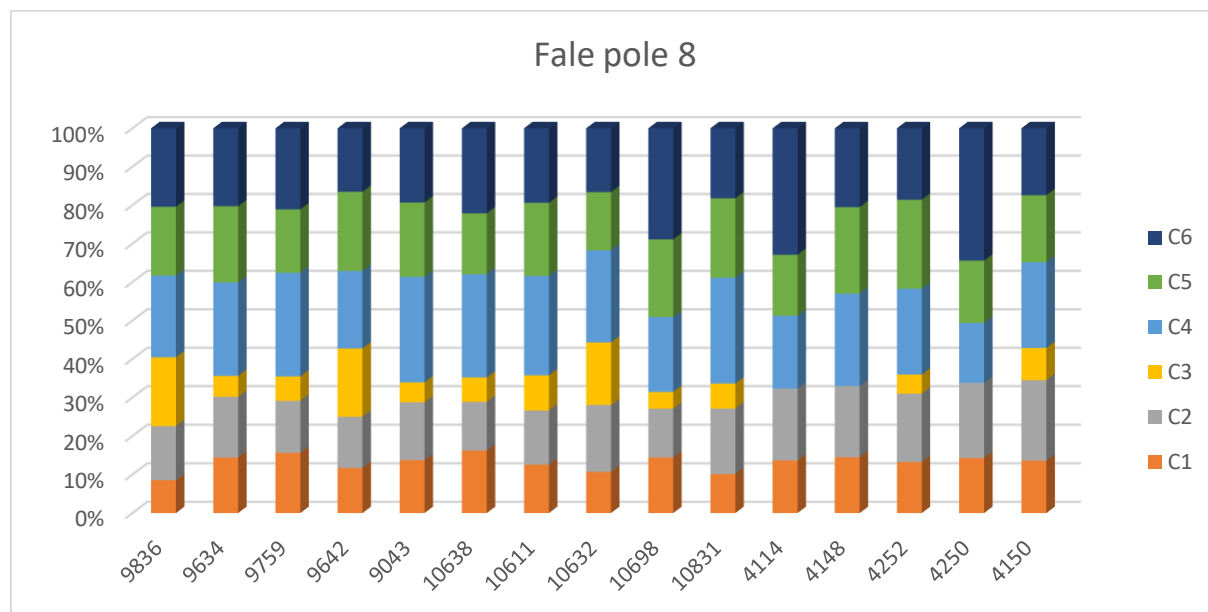
Otrzymana pojemność układu zasobnika jest duża, jak na możliwości pojazdów elektrycznych. Można by ją było otrzymać poprzez zastosowanie min 6 punktów ładowania co jest ekonomicznie wątpliwe. Zasadne wydaje się, przebudowa stacji napowietrznej na stację kontenerową wyposażoną w stacjonarny zasobnik energii o żądanej pojemności.

#### 5.4 Analiza wrażliwości wyników

Badanie wrażliwości zmienności wyniku w oparciu o dobór parametrów C decyduje o tym, jak różne oszacowania czynnika wpływają na wielkość wyniku w ramach danej pętli SN. Aby zbadać niepewność i istotę każdego z parametrów wejściowych dla każdego z celów C przypisanego do danej pętli SN wykorzystano program STATISTICA w którym policzono m.in. odchylenie standardowe jako miara wpływu danego celu na wybór lokalizacji zasobnika w danej pętli. Im większa wartość odchylenia dla danego parametru tym jego udział w całkowitej ocenie danej lokalizacji jest mniejszy, a więc wrażliwość na zmiany jest mniejsza. Z uwagi na potencjalną dużą zmienność otrzymanych wyników, a także z uwagi na wybrane współczynniki i kryteria wejściowe w pierwszym etapie analizy dokonano uproszczonej oceny wrażliwości wyników dla każdej z pętli na bazie porównania procentowego udziału każdego z celów w ostatecznej ocenie danej stacji.

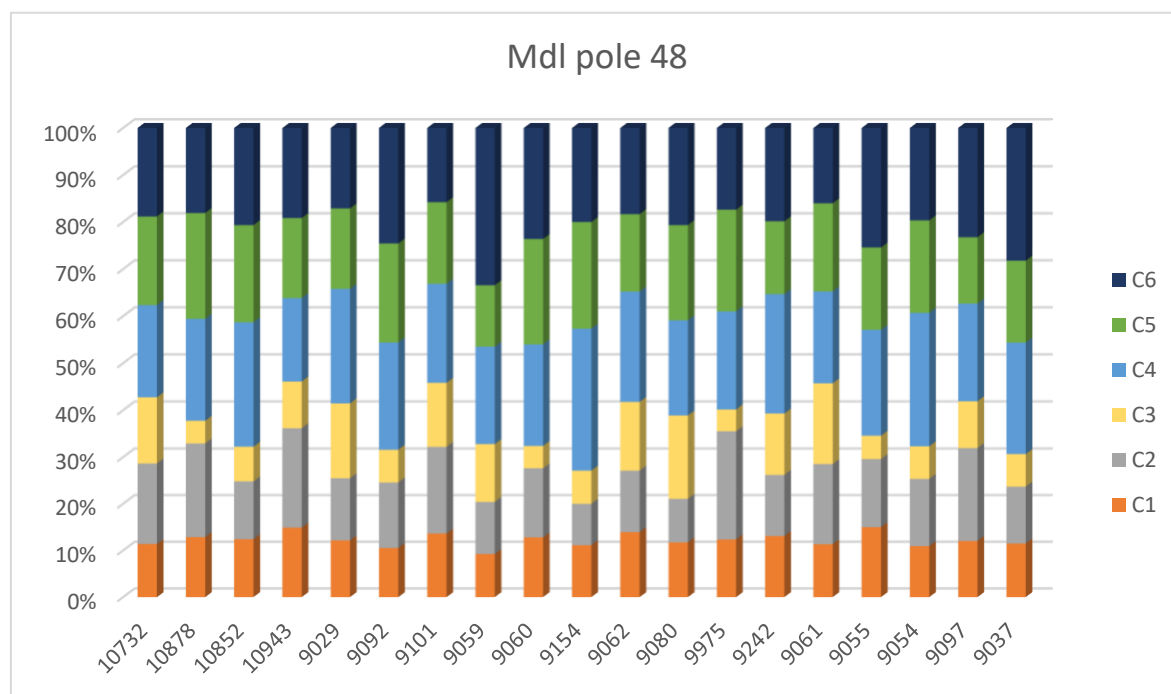
Na rysunku 19 przedstawiony jest udział parametrów C1-C6 dla pętli SN zasilanej ze stacji Falenica (Fale) pole 8. Widać na nim marginalny udział parametru C3 (brak tego kryterium dla 2 stacji napowietrznych) – zabezpieczenie odbiorców priorytetowych - oraz stała

wartość parametru C1 oraz C5. Najbardziej fluktuującym parametrem o największej rozpiętości wyników jest parametr C4 (efekt wizerunkowy OSD)



**Rysunek 19** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Fale 8

Na rysunku 20 przedstawiony jest udział parametrów C1-C6 dla pętli SN zasilanej ze stacji Mdl pole 48. Widać na nim marginalny udział parametru C3– zabezpieczenie odbiorców

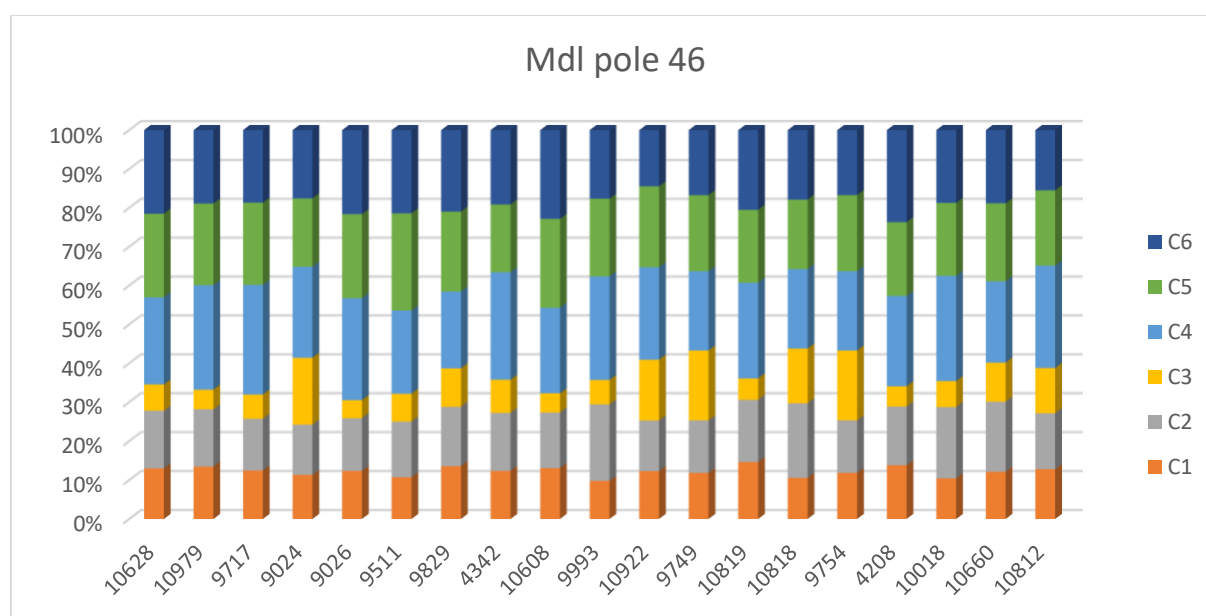


**Rysunek 20** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 48

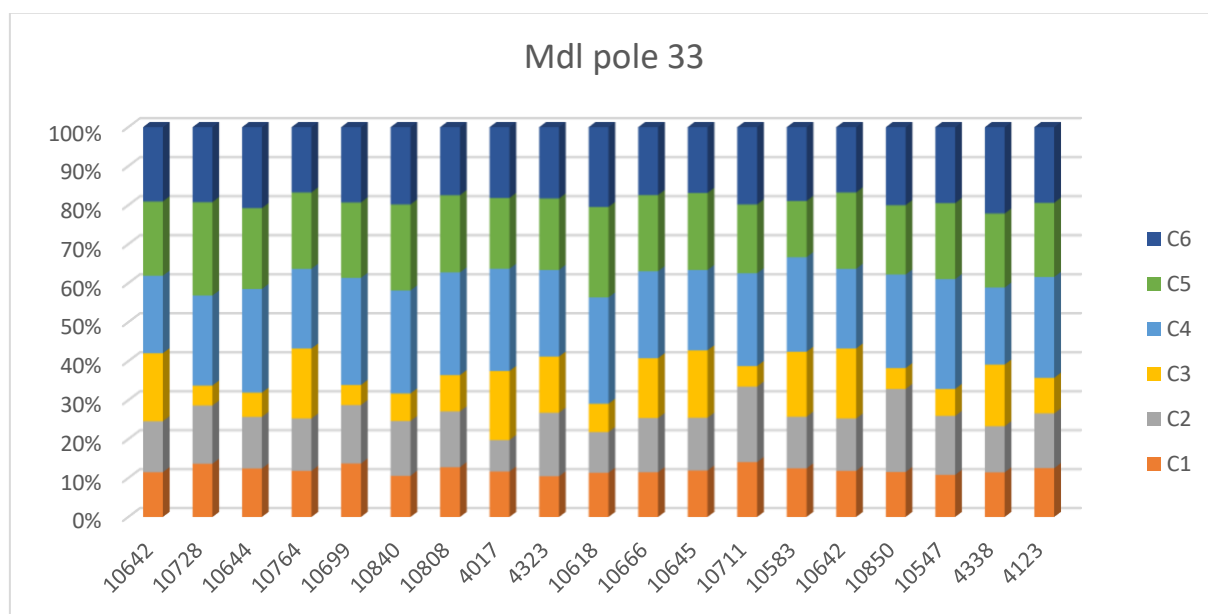
priorytetowych - oraz stała wartość parametru C1 oraz C5. Najbardziej fluktuującym

parametrem o największej rozpiętości wyników jest parametr C4 (efekt wizerunkowy OSD) oraz C2

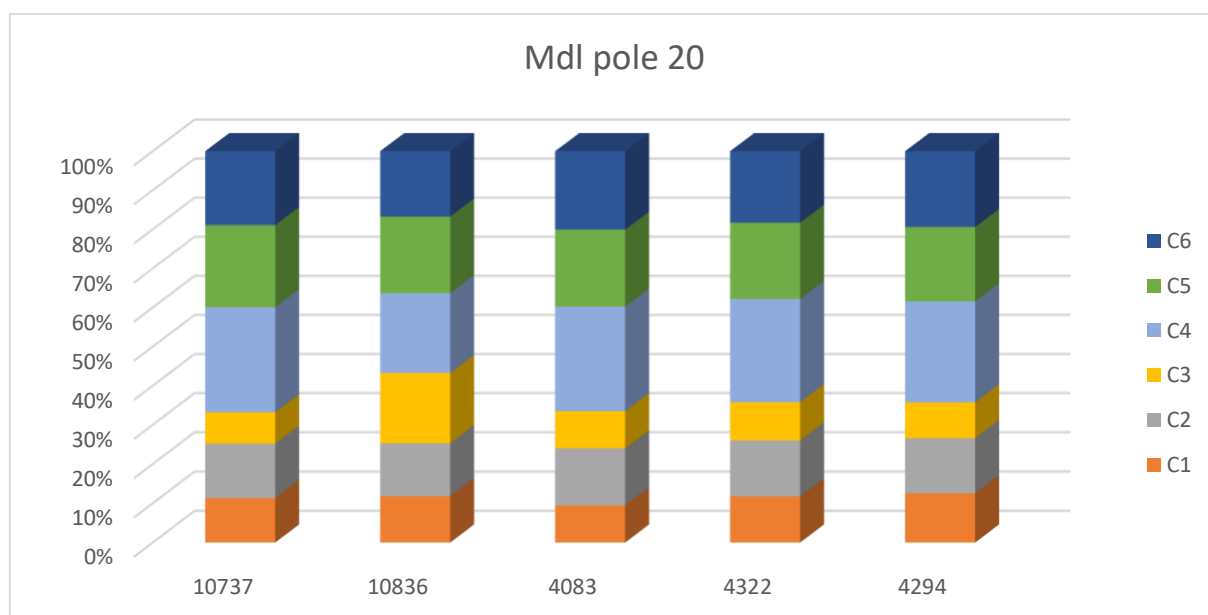
Na rysunkach 21-26 przedstawiony jest udział parametrów C1-C6 dla pętli SN zasilanej ze stacji Mdl (poła 46, 33,20, 31,23,5). Zaobserwować można zbliżony charakter tych ciągów a także podobną ocenę przez ekspertów Spółki (kryteria eksperckie) Widać na tych rysunkach nim marginalny udział parametru C3 oraz stała wartość parametru C1 oraz C5. Najbardziej fluktuującym parametrem o największej rozpiętości wyników jest parametr C4 (efekt wizerunkowy OSD)



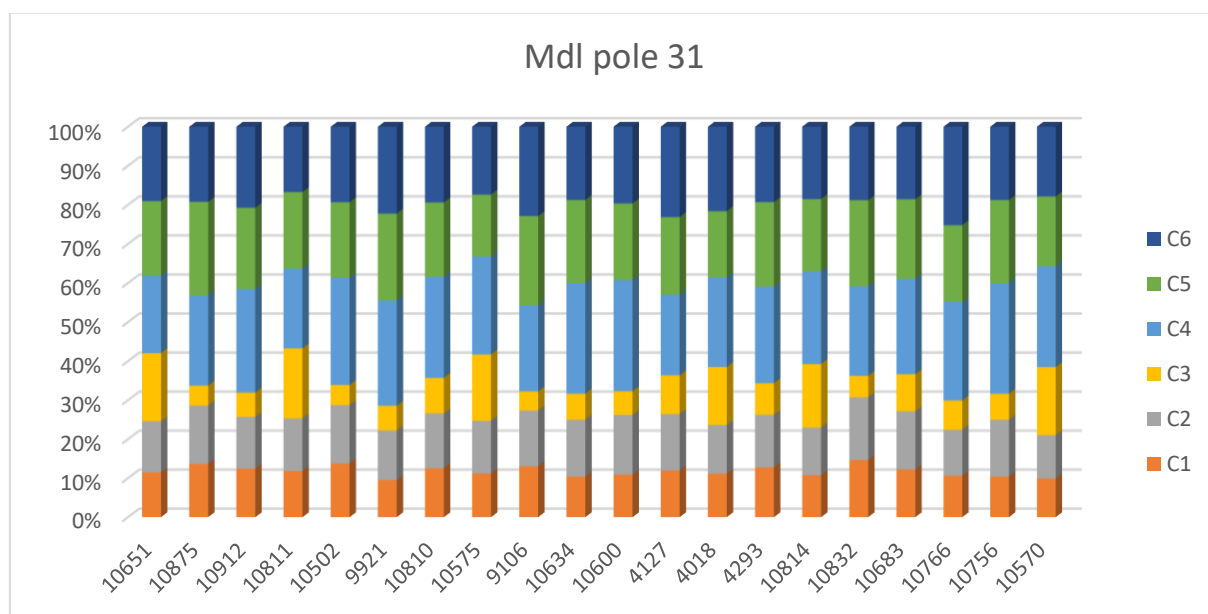
**Rysunek 21** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 46



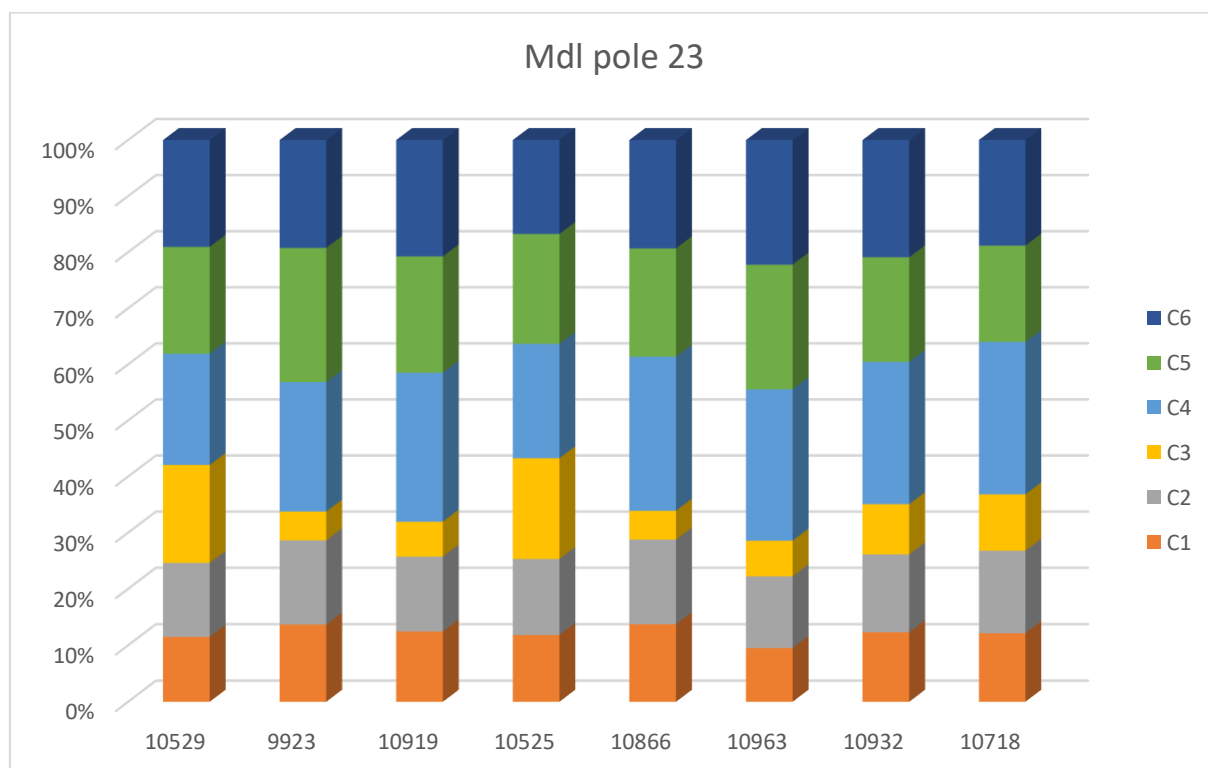
**Rysunek 22** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 33



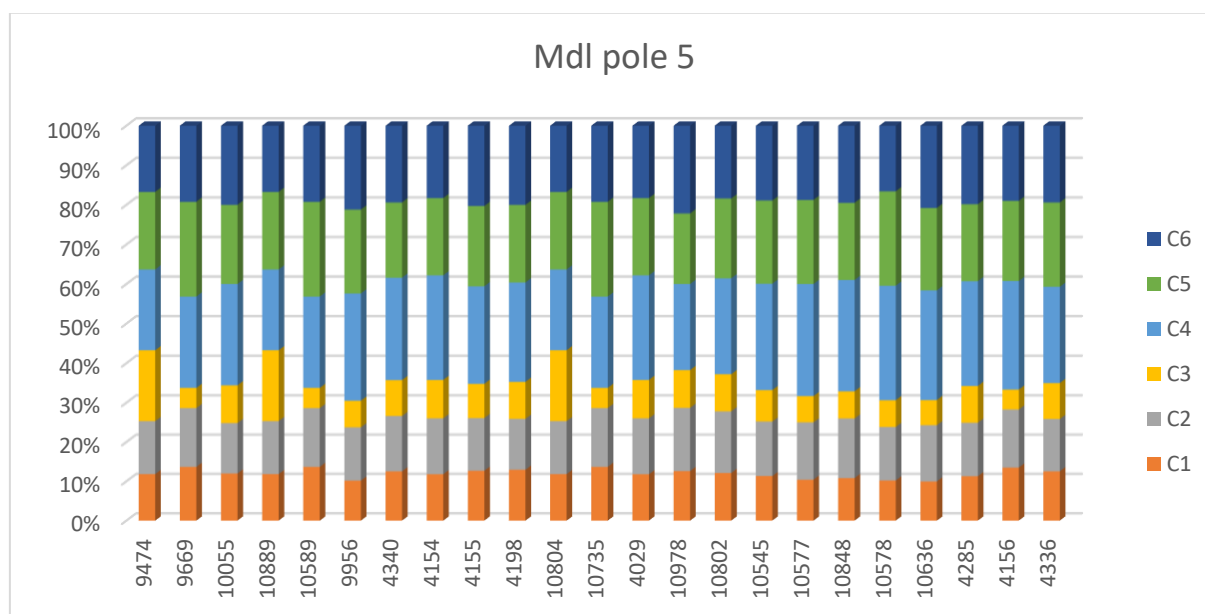
**Rysunek 23** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 20



**Rysunek 24** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 31



**Rysunek 25** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 23



**Rysunek 26** Udział procentowy poszczególnych wielkości parametrów C w danym ciągu SN - Mdl 5

Pokazana powyżej analiza porównawcza dla każdej z pętli SN pokazuje że wartości o największej rozpiętości i zmienności odnoszą się do celów:

- C2 - Maksymalizacja dostaw energii elektrycznej w ramach świadczenia usługi
- C4 – oznacza efekty wizerunkowe OSD;
- C6 – oznacza poprawę parametrów jakości energii elektrycznej.

Są to cele bezpośrednio związane z Klientem i jego oddziaływaniem na aspekt finansowy Spółki oraz przerwy w dostawie energii elektrycznej dla Klientów. Ma to też bezpośredni związek z częstością występowania awarii i skutków jakie wywoływane są przez tego typu zdarzenia. Dlatego tak istotne jest wdrożenie systemów magazynowania energii celem poprawy parametrów SAIDI/SAIFI.

Mając na względzie, że dominującymi (na bazie powyższych wykresów) wartościami są dane dla C2, C4 oraz C6 zauważalne jest że odchylenie dla tych parametrów jest wysokie.

**Tabela 28** Odchylenie standardowe parametrów C

|             | C1       | C2       | C3       | C4       | C5       | C6       |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| MDL pole 5  | 0,837014 | 0,388826 | 2,435433 | 1,721034 | 1,032572 | 1,086433 |
| MDL pole 23 | 0,703943 | 0,443203 | 3,317802 | 1,936203 | 1,273003 | 1,361131 |

|             |          |          |          |          |          |          |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| MDL pole 31 | 0,773747 | 0,549521 | 3,332357 | 1,784943 | 1,0528   | 1,728772 |
| MDL pole 20 | 0,066562 | 0,081735 | 0,513689 | 0,110501 | 0,133357 | 0,322288 |
| MDL pole 33 | 0,74093  | 1,802776 | 3,619867 | 1,764766 | 1,286883 | 1,101069 |
| MDL pole 46 | 0,71686  | 1,788016 | 3,254158 | 1,962086 | 1,237068 | 1,372374 |
| MDL pole 48 | 1,327702 | 2,926612 | 3,18617  | 1,825842 | 1,519729 | 3,764057 |
| Fale pole 8 | 1,746084 | 2,631879 | 3,739509 | 1,931105 | 1,378405 | 5,50119  |

Dodatkowo dla każdej z pętli zbadano korelację między parametrami C oraz jego odchylenie w stosunku do wyznaczonej mediany. Z uwagi, że wśród danych pojawiają się przypadki "odstające", które wpływają na wartość średniej wg autora bardziej właściwym parametrem oceny jest rozkład w oparciu o medianę. Na bazie otrzymanych wyników (rozkładu statystycznego) dla każdej pętli dokonano wnioskowania statystycznego dążąc do uogólnienia pożądanych wartości parametrów C na bazie otrzymanych prób.

**Tabela 29 Wartość mediany parametrów C**

|             | C1    | C2   | C3   | C4    | C5    | C6    |
|-------------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| MDL pole 5  | 7,25  | 8,75 | 5,5  | 16    | 12,5  | 11,25 |
| MDL pole 23 | 7,375 | 8,5  | 5    | 16    | 12,25 | 11,63 |
| MDL pole 31 | 7,25  | 8,75 | 5    | 16    | 12,5  | 11,63 |
| MDL pole 20 | 7,25  | 8,75 | 6    | 16,25 | 12,5  | 11,25 |
| MDL pole 33 | 7,25  | 8,75 | 6    | 15    | 12    | 11,25 |
| MDL pole 46 | 7,5   | 8,75 | 4    | 15    | 12,5  | 11,25 |
| MDL pole 48 | 8     | 8,75 | 6    | 13,5  | 12    | 12,5  |
| Fale pole 8 | 8     | 9,25 | 3,75 | 15,25 | 12,5  | 12    |

Analizę danych przedstawionych dla każdej pętli pozwala stwierdzić, że rozkłady mierzonych zmiennych w większości przypadków nie odbiegają istotnie statystycznie od rozkładu normalnego. Odstępstwo obserwuje się jedynie dla zmiennej C3 i C6 gdzie wartości średniej do wartości mediany jest inna a rozpiętość odchylenia tych parametrów jest duża.

Zmienność parametru C3 wynika z jego charakteru (zasilanie odbiorców priorytetowych), który nie jest stały i zależny od lokalizacji stacji wobec istotnych dla Spółki Klientów.

**Tabela 30 Wartość różnicy między średnią a medianą parametrów C**

|             | C1    | C2     | C3    | C4    | C5    | C6   |
|-------------|-------|--------|-------|-------|-------|------|
| MDL pole 5  | 0,033 | -0,163 | 0,074 | -0,78 | 0,04  | 0,35 |
| MDL pole 23 | 0,063 | 0      | 0,969 | -0,91 | 0,06  | 0,43 |
| MDL pole 31 | 0     | -0,275 | 1,225 | -0,79 | -0,14 | 0,66 |

|             |       |       |       |       |       |      |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| MDL pole 20 | -0,15 | 0     | 0,75  | -0,5  | -0,2  | 0,4  |
| MDL pole 33 | 0,171 | 0     | 1,224 | -0,24 | 0,01  | 0,45 |
| MDL pole 46 | 0     | 0,618 | 1,974 | -2,37 | -0,13 | 0,47 |
| MDL pole 48 | -0,07 | 1,118 | 0,684 | 1,08  | -0,05 | 1,16 |
| Fale pole 8 | 0,433 | 1,1   | 0,8   | -0,58 | -0,65 | 2,23 |

Istotą przedstawionej powyżej uproszczonej analizy wpływu parametrów C na wynik jest próba oceny przez autora czy ilość zaproponowanych kryteriów i dobór ich wag jest właściwy z punktu widzenia oczekiwanych rezultatów. Zmienność parametrów jest zależna od charakteru sieci jaka jest badana (napowietrzna, kablowa, mieszana) ale także widać subiektywność oceny eksperckiej (parametry C4, C6, etc. ).

Podsumowując analizę wrażliwości autor stoi na stanowisku, że dobór parametrów C Co do ilości i zakresu informacji jest właściwy i nie nadmiarowy. Udział każdego parametru w ocenie jest jednakowo ważny z punktu widzenia OSD, a usunięcie z analizy może zburzyć całościowy obraz wpływu danej stacji w poprawie wskaźników SAIDI/SAIF.



## 5.5 Analiza wpływu instalacji zasobników na zmiany współczynnika SAIDI

Celem rozdziału jest wyznaczenie zmiany współczynnika SAIDI po zainstalowaniu zasobników w stacjach transformatorowych wybranych metodą proponowaną przez autora. Przygotowane zostanie również narzędzie do szybkiego wyznaczania tej zmiany przy pomocy prostego narzędzia do obliczeń macierzowych (Matlab, SciLab) oraz programu Excel, co było jednym z założeń pracy.

W rozważaniach w tym rozdziale autor bierze pod uwagę współczynnik SAIDI łącznie dla przerw planowych i nieplanowych. Zastosowanie zasobników w stacja transformatorowych wybranych opisaną metodą zmieni współczynnik SAIDI wyznaczony dla operatora. Współczynnik ten zgodnie z przepisami prawa oblicza się w następujący sposób:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^K N_i T_i}{N} \quad (53)$$

gdzie:

$K$  – liczba awarii w obszarze działania operatora w roku,

$N$  – liczba odbiorców obsługiwanych przez operatora,

$N_i$  – liczba odbiorców afektowanych  $i$ -tą awarią,

$T_i$  – czas trwania  $i$ -tej awarii.

Zakładając, że każdy odbiorca przyłączony jest do wybranego ciągu liniowego, zachodzi zatem zależność:

$$N = \sum_{j=1}^M N^j \quad (54)$$

gdzie:

$N^j$  – liczba odbiorców przyłączonych do  $j$ -tego ciągu,

$M$  – liczba wszystkich ciągów u operatora.

Z punktu widzenia operatora SAIDI dla wybranego ciągu  $x$  może być wyrażone wzorem:

$$SAIDI^{Cx} = \frac{\sum_{i=1}^{K^{Cx}} N_i^{Cx} T_i^{Cx}}{N} \quad (55)$$

gdzie:

$K^{Cx}$  – liczba awarii w ciągu  $Cx$  w roku,

$N_i^{Cx}$  – liczba odbiorców w ciągu Cx afektowanych  $i$ -tą awarią,

$T_i^{Cx}$  – czas trwania  $i$ -tej awarii w ciągu Cx.

Zatem SAIDI dla całego operatora jest sumą SAIDI dla poszczególnych ciągów:

$$\begin{aligned} \text{SAIDI} &= \sum_{j=1}^M \text{SAIDI}^{Cj} = \sum_{j=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{K^{Cj}} N_i^{Cj} T_i^{Cj}}{N} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{K^{Cj}} N_i^{Cj} T_i^{Cj} \end{aligned} \quad (55)$$

Ponieważ awarie dla każdego ciągu traktujemy rozłącznie, prawdziwe jest równanie:

$$\sum_{i=1}^K N_i T_i = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{K^{Cj}} N_i^{Cj} T_i^{Cj} \quad (56)$$

Przez traktowanie rozdzielnie rozumie się, że jeżeli więcej niż jeden ciąg był afektowany tą samą awarią, to jest wliczany do SAIDI każdego ciągu oddzielnie. W związku z tym każda z rozpatrywanych pętli wnosi do SAIDI składnik, jak pokazano na rys. 18 oraz w tabeli 31.

**Tabela 31** Udział wybranych ciągów w SAIDI operatora

| Ciąg liniowy | SAIDI ciągu<br><i>SAIDI<sup>Cx</sup></i><br>[min] | Udział w SAIDI<br>[%] | Liczba odbiorców<br><i>N<sup>Cx</sup></i><br>[---] | Łączny czas przerw<br><i>T<sup>Cx</sup></i><br>[min] |
|--------------|---------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| MDL pole 5   | 0,658                                             | 1,42%                 | 1815                                               | 398,08                                               |
| MDL pole 20  | 0,6486                                            | 1,40%                 | 422                                                | 1687,66                                              |
| MDL pole 23  | 1,1421                                            | 2,46%                 | 583                                                | 2151,07                                              |
| MDL pole 31  | 1,0857                                            | 2,34%                 | 2193                                               | 543,61                                               |
| MDL pole 33  | 0,846                                             | 1,82%                 | 1740                                               | 533,88                                               |
| MDL pole 46  | 1,0481                                            | 2,26%                 | 3235                                               | 355,75                                               |
| MDL pole 48  | 1,7014                                            | 3,67%                 | 3779                                               | 494,37                                               |
| FALE pole 8  | 0,3807                                            | 0,82%                 | 2063                                               | 202,63                                               |
| <b>Suma</b>  | <b>7,5106</b>                                     | <b>16,20%</b>         | <b>15830</b>                                       |                                                      |

Wymienione ciągi łącznie generują aż 16% SAIDI operatora. W każdym z ciągów znajduje się po kilka-, kilkanaście stacji transformatorowych. Do każdej stacji przyłączona jest określona liczba odbiorców. W dalszych rozważaniach autor zakłada, że wszystkie przerwy afektujące

odbiorców przyłączonych do rozważanych ciągów wynikają wyłącznie z awarii w liniach średniego napięcia lub wyższych i dotyczą wszystkich odbiorców w danym ciągu. Nie występują awarie w liniach niskiego napięcia, co przy praktycznie pełnym kablowaniu jest bliskie prawdy. Wobec powyższego można wyznaczyć sumę czasów przerw w każdym ciągu, zauważając że liczba odbiorców afektowanych przerwami jest zawsze taka sama,  $N_i^{Cx}$  jest stałe dla każdej przerwy, i równa sumie liczby odbiorów w danym ciągu:

$$N_i^{Cx} = N^{Cx}$$

Wtedy wyrażenie na obliczenie współczynnika SAIDI przyjmuje postać:

$$SAIDI^{Cx} = \frac{\sum_{i=1}^{K^{Cx}} N_i^{Cx} T_i^{Cx}}{N} = \frac{N^{Cx}}{N} \sum_{i=1}^{K^{Cx}} T_i^{Cx} \quad (57)$$

Znając wartości SAIDI dla każdego ciągu, liczbę odbiorców w danym ciągu oraz liczbę odbiorców operatora można wyznaczyć sumę czasów przerw dla danego ciągu:

$$T^{Cx} = \sum_{i=1}^{K^{Cx}} T_i^{Cx} = \frac{SAIDI^{Cx} N}{N^{Cx}} \quad (58)$$

Tabela 32 przedstawia dane zbiorcze dla stacji w rozpatrywanych ciągach.

**Tabela 32 Liczba odbiorców i moce transformatorów rozpatrywanych ciągów liniowych**

| Ciąg liniowy | L.p.<br>$j$ | Nr stacji<br>$Y_j^{Cx}$ | Moc transf.<br>$P_j^{Cx}$<br>[kW] | Liczba odbiorców<br>$N_j^{Cx}$<br>[---] | Obecność zasobnika<br>$Z_j^{Cx}$<br>[---] |
|--------------|-------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| MDL pole 5   | 1           | 9474                    | 400                               | 69                                      | 1                                         |
|              | 2           | 9669                    | 630                               | 337                                     | 1                                         |
|              | 3           | 10055                   | 630                               | 79                                      | 1                                         |
|              | 4           | 10889                   | 630                               | 39                                      | 1                                         |
|              | 5           | 10589                   | 630                               | 180                                     | 1                                         |
|              | 6           | 9956                    | 400                               | 7                                       | 1                                         |
|              | 7           | 4340                    | 250                               | 19                                      | 1                                         |
|              | 8           | 4154                    | 250                               | 116                                     | 1                                         |
|              | 9           | 4155                    | 250                               | 86                                      | 0                                         |

|             |    |       |     |     |   |
|-------------|----|-------|-----|-----|---|
|             | 10 | 4198  | 250 | 52  | 1 |
|             | 11 | 10804 | 400 | 69  | 1 |
|             | 12 | 10735 | 630 | 110 | 1 |
|             | 13 | 4029  | 250 | 110 | 1 |
|             | 14 | 10978 | 400 | 11  | 1 |
|             | 15 | 10802 | 400 | 62  | 1 |
|             | 16 | 10545 | 400 | 31  | 1 |
|             | 17 | 10577 | 400 | 11  | 1 |
|             | 18 | 10848 | 630 | 37  | 1 |
|             | 19 | 10578 | 400 | 37  | 1 |
|             | 20 | 10636 | 630 | 104 | 1 |
|             | 21 | 4285  | 400 | 144 | 1 |
|             | 22 | 4156  | 250 | 78  | 1 |
|             | 23 | 4336  | 100 | 27  | 1 |
| MDL pole 20 | 1  | 10737 | 400 | 117 | 1 |
|             | 2  | 10836 | 400 | 103 | 1 |
|             | 3  | 4083  | 250 | 67  | 1 |
|             | 4  | 4322  | 250 | 94  | 1 |
|             | 5  | 4294  | 160 | 41  | 0 |
| MDL pole 23 | 1  | 9923  | 400 | 2   | 1 |
|             | 2  | 10529 | 400 | 57  | 1 |
|             | 3  | 10919 | 400 | 60  | 1 |
|             | 4  | 10525 | 630 | 199 | 1 |
|             | 5  | 10866 | 400 | 17  | 1 |
|             | 6  | 10963 | 400 | 62  | 1 |
|             | 7  | 10932 | 400 | 26  | 0 |
|             | 8  | 10718 | 630 | 160 | 1 |

|             |    |       |     |     |   |
|-------------|----|-------|-----|-----|---|
| MDL pole 31 | 1  | 10651 | 630 | 142 | 1 |
|             | 2  | 10875 | 630 | 184 | 1 |
|             | 3  | 10810 | 630 | 77  | 1 |
|             | 4  | 10502 | 400 | 29  | 1 |
|             | 5  | 9921  | 400 | 137 | 1 |
|             | 6  | 10575 | 630 | 114 | 1 |
|             | 7  | 4127  | 400 | 215 | 1 |
|             | 8  | 4018  | 400 | 142 | 0 |
|             | 9  | 9106  | 400 | 50  | 1 |
|             | 10 | 10634 | 630 | 157 | 1 |
|             | 11 | 10600 | 630 | 144 | 1 |
|             | 12 | 10814 | 630 | 53  | 1 |
|             | 13 | 10832 | 630 | 116 | 1 |
|             | 14 | 10683 | 630 | 116 | 1 |
|             | 15 | 10766 | 630 | 36  | 1 |
|             | 16 | 10756 | 630 | 86  | 1 |
|             | 17 | 4293  | 400 | 111 | 1 |
|             | 18 | 10570 | 630 | 98  | 1 |
|             | 19 | 10912 | 630 | 173 | 1 |
|             | 20 | 10811 | 630 | 13  | 1 |
| MDL pole 33 | 1  | 10642 | 630 | 169 | 1 |
|             | 2  | 4323  | 400 | 106 | 0 |
|             | 3  | 10728 | 400 | 28  | 1 |
|             | 4  | 4017  | 250 | 102 | 1 |
|             | 5  | 10644 | 630 | 162 | 1 |
|             | 6  | 10764 | 400 | 77  | 1 |
|             | 7  | 10699 | 630 | 162 | 1 |

|             |    |       |     |     |   |
|-------------|----|-------|-----|-----|---|
|             | 8  | 10840 | 400 | 83  | 1 |
|             | 9  | 10808 | 400 | 42  | 1 |
|             | 10 | 10618 | 400 | 51  | 1 |
|             | 11 | 10666 | 400 | 71  | 1 |
|             | 12 | 4123  | 250 | 101 | 1 |
|             | 13 | 10654 | 400 | 80  | 1 |
|             | 14 | 10711 | 630 | 128 | 1 |
|             | 15 | 10583 | 400 | 5   | 1 |
|             | 16 | 10642 | 630 | 169 | 1 |
|             | 17 | 10850 | 400 | 2   | 1 |
|             | 18 | 10547 | 630 | 186 | 1 |
|             | 19 | 4338  | 400 | 16  | 1 |
| MDL pole 46 | 1  | 10628 | 630 | 291 | 1 |
|             | 2  | 10979 | 400 | 11  | 1 |
|             | 3  | 9717  | 630 | 117 | 1 |
|             | 4  | 9024  | 630 | 195 | 1 |
|             | 5  | 9026  | 630 | 395 | 1 |
|             | 6  | 9511  | 400 | 3   | 1 |
|             | 7  | 4342  | 250 | 15  | 1 |
|             | 8  | 9829  | 630 | 313 | 1 |
|             | 9  | 10608 | 400 | 130 | 1 |
|             | 10 | 10922 | 400 | 1   | 1 |
|             | 11 | 9993  | 400 | 191 | 1 |
|             | 12 | 9749  | 400 | 1   | 1 |
|             | 13 | 10819 | 630 | 291 | 1 |
|             | 14 | 10818 | 630 | 272 | 0 |
|             | 15 | 9754  | 630 | 265 | 1 |

|             |    |       |     |     |   |
|-------------|----|-------|-----|-----|---|
|             | 16 | 4208  | 400 | 124 | 1 |
|             | 17 | 10018 | 630 | 193 | 1 |
|             | 18 | 10660 | 630 | 291 | 1 |
|             | 19 | 10812 | 630 | 136 | 1 |
| MDL pole 48 | 1  | 10732 | 630 | 511 | 1 |
|             | 2  | 10943 | 630 | 145 | 1 |
|             | 3  | 9029  | 630 | 251 | 1 |
|             | 4  | 10852 | 400 | 91  | 1 |
|             | 5  | 9092  | 630 | 316 | 1 |
|             | 6  | 9101  | 400 | 105 | 0 |
|             | 7  | 9059  | 630 | 303 | 1 |
|             | 8  | 9060  | 630 | 322 | 1 |
|             | 9  | 9154  | 630 | 140 | 1 |
|             | 10 | 9062  | 630 | 269 | 1 |
|             | 11 | 9080  | 630 | 301 | 1 |
|             | 12 | 9975  | 630 | 176 | 1 |
|             | 13 | 10878 | 400 | 57  | 1 |
|             | 14 | 9242  | 400 | 14  | 1 |
|             | 15 | 9061  | 630 | 202 | 1 |
|             | 16 | 9055  | 400 | 107 | 1 |
|             | 17 | 9054  | 630 | 122 | 1 |
|             | 18 | 9097  | 630 | 178 | 1 |
|             | 19 | 9037  | 630 | 169 | 1 |
| FALE pole 8 | 1  | 9836  | 630 | 182 | 1 |
|             | 2  | 9634  | 630 | 266 | 1 |
|             | 3  | 10638 | 630 | 180 | 1 |
|             | 4  | 9759  | 630 | 168 | 1 |

|  |    |       |     |     |   |
|--|----|-------|-----|-----|---|
|  | 5  | 10611 | 400 | 52  | 1 |
|  | 6  | 10632 | 400 | 49  | 1 |
|  | 7  | 9642  | 400 | 73  | 1 |
|  | 8  | 10698 | 630 | 182 | 1 |
|  | 9  | 10831 | 400 | 128 | 1 |
|  | 10 | 4114  | 250 | 151 | 0 |
|  | 11 | 9043  | 630 | 236 | 1 |
|  | 12 | 4148  | 400 | 172 | 1 |
|  | 13 | 4252  | 250 | 80  | 1 |
|  | 14 | 4250  | 250 | 82  | 1 |
|  | 15 | 4150  | 250 | 62  | 1 |

Biorąc pod uwagę dane z tabeli, można przedstawić opis danego ciągu w formie wektorów o liczbie elementów równej liczbie stacji w danym ciągu:

$\overrightarrow{Y^{Cx}}$  – wektor numerów stacji,

$\overrightarrow{P^{Cx}}$  – wektor mocy znamionowej transformatorów,

$\overrightarrow{N^{Cx}}$  – wektor liczby odbiorców zasilanych z poszczególnych stacji,

$\overrightarrow{T^{Cx}}$  – wektor sumy czasów przerw, którego każdy element ma wartość  $T^{Cx}$

Sumę odbiorców przyłączonych do ciągu  $N^{Cx}$  wyraża się wtedy jako sumę elementów wektora  $\overrightarrow{N^{Cx}}$ :

$$N^{Cx} = \sum_{j=1}^{M^{Cx}} N_j^{Cx}$$

gdzie  $M^{Cx}$  – liczba stacji w ciągu  $Cx$ .

Biorąc pod uwagę powyższe oznaczenia wzór (59) przyjmuje postać:

$$SAIDI^{Cx} = \frac{\sum_{i=1}^{K^{Cx}} N_i^{Cx} T_i^{Cx}}{N} = \frac{T_i^{Cx}}{N} \sum_{i=1}^{K^{Cx}} N_i^{Cx} = \frac{N^{Cx} T^{Cx}}{N} \quad (59)$$



Zabudowa zasobnika w stacji transformatorowej SN/nN, jak było powiedziane wyżej, powoduje, że odbiorcy przyłączeni do tej stacji są chronieni od przerw w zasilaniu pojawiających się po stronie SN. Odbiorcy danej stacji nie są afektowani przerwami zasilania w linii średniego napięcia.

Utwórzmy wektor  $\overrightarrow{Z^{Cx}}$ , opisujący czy w danej stacji jest czy nie ma zasobnika. Jeżeli w stacji nie ma zasobnika, to odpowiadający element we wektorze  $\overrightarrow{Z^{Cx}}$  przyjmuje wartość 1, a jeżeli jest zasobnik to zero.

W wypadku, gdy w żadnej stacji nie ma zasobnika, to wektor  $\overrightarrow{Z^{Cx}}$  ma wszystkie elementy równe 1. Liczbę odbiorców w danym ciągu można obliczyć ze wzoru:

$$N^{Cx} = \overrightarrow{N^{Cx}}^T \overrightarrow{Z^{Cx}} \quad (60)$$

Gdy chcemy obliczyć SAIDI dla ciągu, w którym jest zainstalowany zasobnik, w odpowiednim miejscu wektora  $\overrightarrow{Z^{Cx}}$  wstawiamy zero, oznaczmy taki zmodyfikowany wektor jako  $\overrightarrow{Z^{Zx}}$  i stosujemy ponownie wzór (60). Oznaczmy taką wartość przez  $N^{Zx}$ .

Następnie można wyznaczyć zmodyfikowaną wartość SAIDI:

$$SAIDI^{Zx} = \frac{\overrightarrow{N^{Cx}}^T \overrightarrow{Z^{Zx}}}{N} = \frac{N^{Zx}}{N} \quad (61)$$

Obliczone wartości według powyższych wzorów przedstawia tabela 33.

**Tabela 33 Wyniki obliczeń zgodnie z wzorem 61**

| Pętla  | SAIDI pętli  | Łączny czas przerw | Liczba odbior. z zasobnikiem | SAIDI z zasobnikiem | Zmiana SAIDI     |
|--------|--------------|--------------------|------------------------------|---------------------|------------------|
| $Cx$   | $SAIDI^{Cx}$ | $T^{Cx}$           | $N^{Zx}$                     | $SAIDI^{Zx}$        | $\Delta_{SAIDI}$ |
|        | [min]        | [min]              | [---]                        | [min]               | [%]              |
| MDL.5  | 0,658        | 398,08             | 1729                         | 0,626822            | -4,74%           |
| MDL.20 | 0,6486       | 1687,66            | 381                          | 0,585584            | -9,72%           |
| MDL.23 | 1,1421       | 2151,07            | 557                          | 1,091166            | -4,46%           |
| MDL.31 | 1,0857       | 543,61             | 2051                         | 1,015399            | -6,48%           |
| MDL.33 | 0,846        | 533,88             | 1634                         | 0,794462            | -6,09%           |

|             |               |        |              |                 |               |
|-------------|---------------|--------|--------------|-----------------|---------------|
| MDL.46      | 1,0481        | 355,75 | 2963         | 0,959975        | -8,41%        |
| MDL.48      | 1,7014        | 494,37 | 3674         | 1,654126        | -2,78%        |
| FALE.8      | 0,3807        | 202,63 | 1912         | 0,352835        | -7,32%        |
| <b>Suma</b> | <b>7,5106</b> |        | <b>14901</b> | <b>7,080370</b> | <b>-5,73%</b> |

Podsumowując, zastosowanie w proponowanych stacjach transformatorowych zasobników, które są w stanie zapewnić skrócenie przerw u odbiorców do czasu poniżej 3 minut, spowoduje zmniejszenie SAIDI dla rozpatrywanych ciągów o średnio 6,25%. Zmiana łącznego SAIDI dla pętli wyniesie 5,73%, a dla całego operatora zmniejszy się o 0,93%.

Są więc to wielkości mierzalne i możliwe do wyceny na podstawie kosztu ponoszonego przez operatora dla jednej minuty SAIDI.

Przedstawiona metoda pozwala na oszacowanie zmiany SAIDI w wykorzystaniem programu Excel. Kluczowy wzór (57) jest realizowany funkcją SUMA.WARUNKÓW, gdzie pierwszym argumentem, sumowanym wektorem, jest wektor  $\overrightarrow{N^{Cx}}$ . Pierwszy warunek sumowania polega na sprawdzeniu, czy w wektorze  $\overrightarrow{Z^{Zx}}$  znajduje się 0 czy 1, a drugi na sprawdzeniu nazwy ciągu.

## 5.6 Podsumowanie rozdziału

Sieć elektroenergetyczna Stolicy jest układem o cechach typowo miejskich z dużą liczbą kabli o różnych przekrojach i na każdym poziomie napięć jak również gęstym rozmieszczeniem stacji SN/nN. Nasycenie dzielnic Warszawy siecią kablową odwzorowuje charakterystykę urbanistyczną miasta. Najwięcej linii kablowych ułożonych jest w najstarszych dzielnicach, w centrum miasta oraz bezpośrednio do niego przylegających obszarów. Dzielnice peryferyjne, charakteryzujące się młodszą zabudową powstałą w ostatnim trzydziestoleciu dysponują mniej zagęszczoną siecią kablową. Są to jednak obszary, które nadal będą się intensywnie rozwijać ze względu na ciągły przyrost liczby mieszkańców Warszawy.

Stoen Operator jako OSD na terenie Warszawy dba o modernizację i rozwój sieci, aby zapewnić wszystkim odbiorcom bezpieczeństwo energetyczne. Spółka stopniowo dąży do zwiększania mocy przyłączeniowej dla odnawialnych źródeł energii, stałej poprawy wskaźników przerw w dostawie energii oraz ograniczania strat sieciowych. Zgodnie z [94] w roku 2021 istotny wpływ na wartości wskaźników SAIDI i SAIFI miały występujące ze

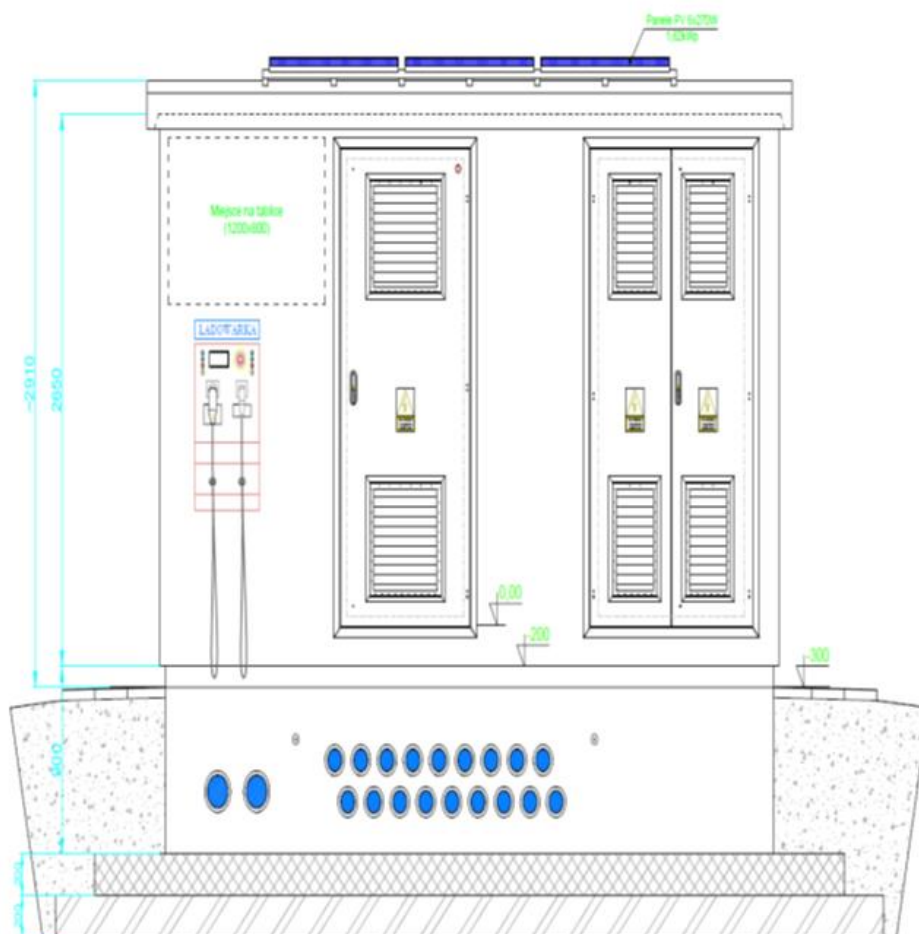
zwiększoną częstotliwością, zmienne i niekorzystne zjawiska atmosferyczne, które były przyczyną wystąpienia zakłóceń w pracy sieci dystrybucyjnej. Z uwagi, że Stoen Operator dostarcza energię elektryczną do ponad miliona odbiorców na terenie Warszawy bardzo istotne z punktu widzenia Spółki jest wdrożenie takich rozwiązań technicznych które pozwolą na sukcesywne zmniejszanie się czasu przerw w dostawie energii oraz liczby przerw. Takim narzędziem są mobilne i stacjonarne zasobniki energii, które właściwie rozmieszczone w sieci OSD pozwolą na zmniejszenie ilości i długości awarii. Przedstawiona w tym rozdziale metodyka doboru lokalizacji zasobników stacjonarnych i mobilnych pozwoli Stoen Operator na właściwe sieciowo i kosztowo rozmieszczenie magazynów energii.

Charakterystyka sieci elektroenergetycznej zlokalizowanej na terenie dzielnicy Wawer pozwala na implementację także mobilnych zasobników energii w oparciu o pojazdy elektryczne (samochody osobowe, ciężarówki, autobusy). Nie mniej zastosowanie ich jest trudne z uwagi na konieczność interakcji między OSD i posiadaczem pojazdu oraz usytuowaniem stacji na terenie dzielnicy w miejscach o trudnym dostępie (duże rozproszenie stacji, lokalizacja w lasach, osiedlach) oraz zasilanych z sieci napowietrznych SN o małych przekrojach przewodów roboczych. Drugim istotnym aspektem przemawiającym negatywnie za wykorzystaniem pojazdów elektrycznych jest konieczność zapewnienia dużej przestrzeni do parkowania na czas dostarczania energii do sieci. Na bazie analizy przedstawionej w rozdziale, mimo technicznych możliwości wykorzystania pojazdów bardziej zasadne jest budowanie stacji kontenerowych już wyposażonych w zasobnik stacjonarny (np.: stacja 4114 zasilana z pola 8 RSM Falenica). Zaproponowane w pracy rozmieszczenie układów magazynowania energii da najlepszy efekt poprawy niezawodności pracy sieci dystrybucyjnej na terenie dzielnicy Wawer i pozwoli na obniżenie kar dla operatora z tytułu przerw w dostawie energii

## **6 ANALIZA KORZYŚCI Z ZASTOSOWANIA ZASOBNIKÓW ENERGII W SIECI WARSZAWSKIEGO OPERATORA SYSTEMU DYSTRYBUCYJNEGO**

Na bazie koncepcji lokalizacji zasobników w sieci warszawskiego OSD i wdrożeniowego charakteru pracy, badaniom poddana została Stacja SMART Grid, która została wybudowana w ramach projektu przedstawionego w załączniku nr 2. Na rysunku 19 przedstawiono inteligentną stację transformatorową z magazynem energii, przyłączami dla źródeł OZE oraz ładowarką pojazdów [70], jako element projektu „Budowa sieci inteligentnej SMART GRID na terenie Warszawy poprzez zastosowanie stacjonarnego systemu magazynowania energii

jako elementu stabilizacji pracy sieci” finansowanego z budżetu Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko (POIS.01.04.01 – 00-0003/18).



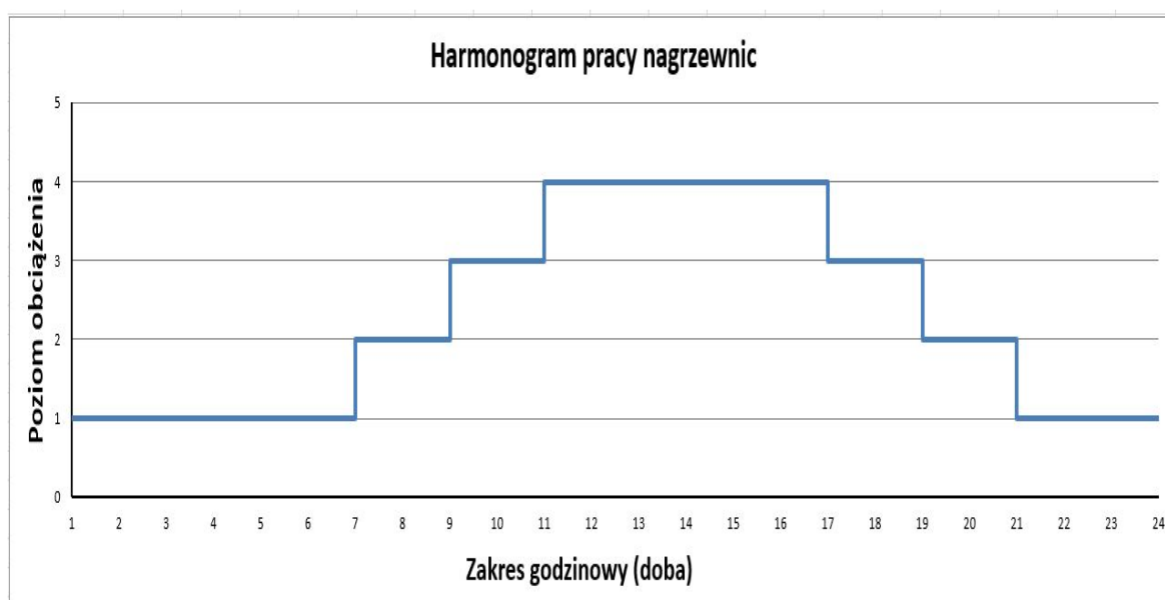
Rys. 19 Widok elewacji stacji, [70]

Podstawowym zadaniem magazynu energii zainstalowanego w tej pilotażowej stacji jest akumulowanie energii w porze nocnej i oddawanie jej w okresie szczytu. Urządzenie wykorzystuje algorytm pozwalający na samodzielne sterowanie cyklami ładowania i oddawania energii do sieci na podstawie pomiaru prądu w sieci nN.

Podczas pierwszych testów stacji (w ramach projektu) algorytm samouczenia został poddany sprawdzeniom pod kątem poprawności działania. I tak, w ciągu 14 dni stacja zasilala odbiornik charakteryzujący się zmiennym obciążeniem zgodnie z harmonogramem (rysunek 20):

- 0- nagrzewnice nie pracują;
- 1- nagrzewnica nr 1 (o mocy 15 kW) pracuje na pierwszym zakresie;
- 2- nagrzewnica nr 1 (o mocy 30 kW) pracuje na drugim zakresie;

- 3- nagrzewnica nr 1 (o mocy 30 kW) pracuje na drugim zakresie nagrzewnica nr 2 (o mocy 11 kW) pracuje na pierwszym zakresie;
- 4- nagrzewnice nr 1 (o mocy 30 kW) i nr 2 (o mocy 22 kW) pracują na drugim zakresie.



Rys. 20 Harmonogram załączania obciążeń, [70]

Zastosowanie takiego harmonogramu obciążeń pozwoliło zasymulować zbliżone do rzeczywistości wahania obciążenia typowej miejskiej stacji SN/nN. Pomimo tego, że zainstalowany magazyn posiadał ograniczenie maksymalnej możliwej mocy rozładowania na poziomie 6 kW, przeprowadzone pomiary pokazały, że działanie algorytmu jest prawidłowe i zgodne z założeniami, tj. algorytm powodował załączanie nastawionej mocy maksymalnej generowanej z zasobnika w momencie wystąpienia maksimum testowego obciążenia. Ponadto, potwierdzona została możliwość pracy całego układu w sposób niezależny od decyzji dyspozytora.

### 6.1 Redukcja zapotrzebowania na moc w szczycie obciążenia

Świadczenie usług redukcji zapotrzebowania może wpłynąć również na zmniejszenie amplitud między dolinami a szczytami zapotrzebowania na moc. Dzięki odpowiednim

algorytmom sterującym pracą stacji czy ładowania, lokalne OSD jest w stanie wpłynąć na kształt krzywej dobowej. W przeprowadzonych badaniach wskazano potencjalne przedziały czasowe, w których realizacja zadań mogłaby przynieść korzystny efekt.

Najprostsza metoda całkowitego spłaszczenia krzywej zapotrzebowania sprowadza się do uśrednienia dobowego zapotrzebowania w każdej z godzin doby. Jednakże według autora metoda jest zbyt dużym wyidealizowaniem przebiegu zapotrzebowania na moc. Zastosowano metodę, w której zmiana zapotrzebowania w danej godzinie doby, będzie wynosiła 40% z obecnej różnicy między zapotrzebowaniem na moc w danej godzinie  $P_{1h,t}$ , a średnim dobowym zapotrzebowaniem  $P_{avg}$ . W związku z tym nowe zapotrzebowanie na moc w danej godzinie doby  $P'_{1h,t}$  zostało określone za pomocą wzoru (62):

$$P'_{1h,t} = P_{1h,t} - P_{V2G,t} = P_{1h,t} - (P_{1h,t} - P_{avg}) \cdot 40\% \quad (62)$$

gdzie:

$P'_{1h,t}$  – planowane zapotrzebowanie na moc w ciągu danej godziny doby

$P_{1h,t}$  – obecne zapotrzebowanie na moc w ciągu danej godziny doby;

$P_{V2G,t}$  – moc oddawana lub pobierana z sieci w danej godzinie doby, która wynika z realizacji V2G

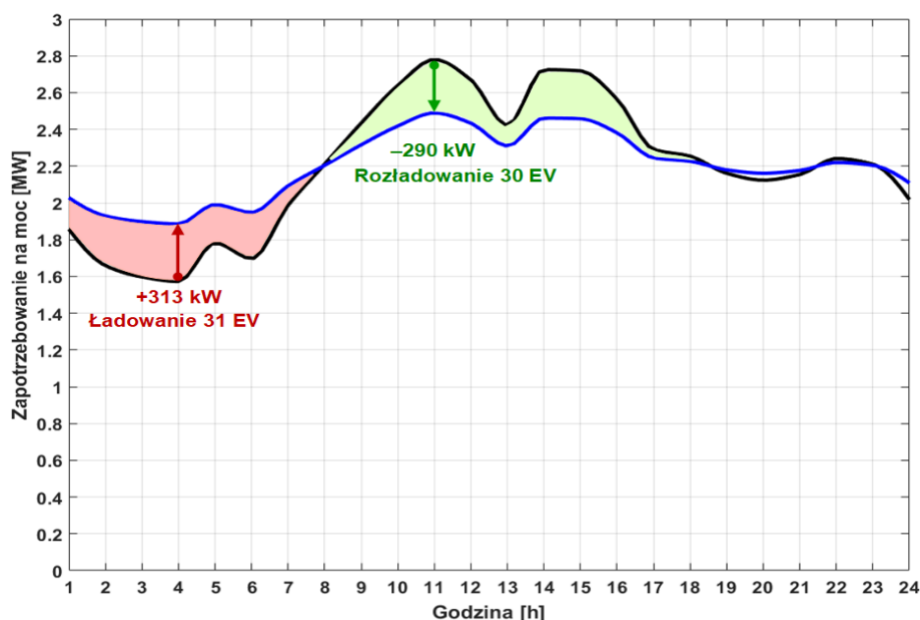
$P_{avg}$  – średnie dobowe zapotrzebowanie na moc dla danej doby;

W celu oszacowania liczby pojazdów elektrycznych realizujących usługi mobilnych magazynów energii [70], dla których proces ładowania lub rozładowania będzie miał wpływ na dobową krzywą zapotrzebowania, przyjęto, że jeden pojazd elektryczny dysponuje średnią godzinową mocą rozładowania/ładowania równą 20 kW. Jest to też odzwierciedlenie jego pojemności.

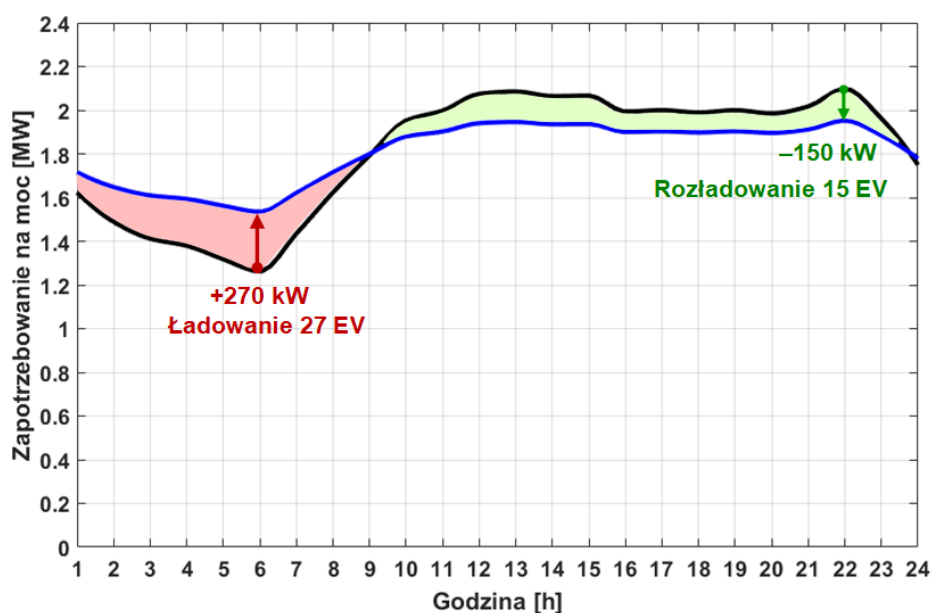
Do pokazania potencjalnego wpływu działania usług redukcji na sieć dystrybucyjną przeanalizowano typowe dobowe profile zapotrzebowania na moc:

- przemysłowy nN
- dla gospodarstw domowych w mieście.

Na rysunku 21 przedstawiono możliwość regulacji dobowego obciążenia odbiorców przemysłowych nN. Natomiast, na rysunku 22 przedstawiono możliwość regulacji dobowego obciążenia odbiorców domowych.



Rys. 21 Możliwość regulacji dobrego obciążenia odbiorców przemysłowych nN



Rys. 22 Możliwość regulacji dobrego obciążenia odbiorców domowych

Ze względu na bardzo zbliżony charakter profilu zapotrzebowania na moc w dni letnie i zimowe przyjęto letni profil jako profil referencyjny. W badaniach posłużono się wartościami zapotrzebowania mocy w polach typowego warszawskiego RPZ oraz danymi dla całego miasta. Kolorem czarnym na rys. 23 oznaczono obecny dobrego profil zapotrzebowania na moc, kolorem niebieskim nowy, wynikający z realizacji usług redukcji mocy. Na czerwono oznaczono okres, gdy pojazdy elektryczne powinny być ładowane tj. pobierają energię z sieci, zaś kolorem zielonym w momencie, gdy następuje oddanie energii do sieci. Zaznaczono na



nich także godziny, w których występuje największe zapotrzebowanie zarówno na rozładowanie i ładowanie pojazdów (szacunki).

## **6.2 Poprawa wskaźników jakościowych dostarczanej energii**

Ograniczenie przerw nieplanowych jest obecnie jednym z ważniejszych zadań operatorów systemów dystrybucyjnych. Niedotrzymanie parametrów SAIDI i SAIFI wiąże się z określonymi skutkami finansowymi. Z tego powodu funkcja zmniejszenia długości przerw w napięciu jest interesująca. Za przerwę długą w napięciu rozumie się zmniejszenie amplitudy napięcia poniżej 10% wartości nominalnej na czas dłuższy niż 3 min (przerwy krótkie są omówione dalej). Takie przerwy są najczęściej skutkiem awarii w sieci lub zwarcim nieprzemijającym. Jeżeli automatyka zabezpieczeniowa jest w stanie usunąć problem, dzieje się to zazwyczaj w czasie do 3 min. Zasobnik może tu pomóc poprzez wyspowe zasilanie fragmentu sieci w wypadku awarii ciągu liniowego pomiędzy punktami zasilania a lokalizacją zasobnika. Wystarczy, że przerwa zostanie skrócona do czasu poniżej trzech minut. Ponieważ zasobnik dysponuje zapasem energii i falownikami elektronicznymi, które mogą zachowywać się jak źródła napięcia o ustalonej częstotliwości, może on zasilać samodzielnie fragment sieci i przyłączonych odbiorców tak długo, jako moc pozorna odbiorów nie przekroczy trwale mocy pozornej zasobnika i wystarczy energii w bateriach. Wydzielenie wyspy musi nastąpić przez otwarcie łączników w wybranych miejscach i tym samym wydzielenie fragmentu sieci do zasilania przez zasobnik. Wydzielenie wyspy odbywa się zawsze z przerwą, spowodowaną zakłóceniem wymuszającym zmianę struktury sieci. W sieci musi być zaimplementowana odpowiednia automatyka, wydzielająca zdrowy fragment. Jeżeli czas wydzielenia nie przekroczy czasu, w którym zasobnik może być przeciążony, nastąpi samoistny powrót napięcia. Operacja ta może zostać również wykonana manualnie na podstawie odpowiednich pomiarów po wykryciu trwałego zaniku napięcia w linii. Po odbudowie napięcia w sieci, powrót z wyspy do pracy sieciowej może odbyć się bez przerwy pod warunkiem zabudowy pola pomiarowego napięcia i kolumny synchronizacyjnej w punkcie intencjonalnego podziału. Usługa ta ma jednak większe znaczenie w sieciach promieniowych, niż zamkniętych.

Dodatkowo, wartą uwagi jest możliwość poprawy wskaźników jakościowych dostarczanej energii poprzez eliminację zapadów i zaników napięcia. Zapady napięcia i krótkie przerwy są najczęściej spowodowane zwarciami w sieci i operacjami łączeniowymi. W momencie wykrycia zapadu napięcia zasobnik zasilić sieć dużym prądem. W wypadku zaniku falowniki

muszą zachować się jak źródła napięcia i wydać prąd maksymalny, zgodnie z charakterystyką przeciążeniową. Jednocześnie powinien działać regulator napięcia, utrzymując jest w granicach dopuszczalnych

### **6.3 Mobilne zasobniki energii jako element poprawy niezawodności pracy sieci**

Rozwój elektromobilności bardzo mocno wpłynie na działanie polskich sieci przesyłowych i dystrybucyjnych. Baterie samochodów elektrycznych będą ładowane głównie w nocy. W ten sposób może zostać wyrównana tzw. dolina nocna, czyli spadek zapotrzebowania na prąd w godzinach nocnych. Jednocześnie dla dużych aglomeracji możemy spodziewać się zjawiska ładowania pojazdów w centrach miast i obszarach biurowych. Spotęguje to obecne szczyty obciążenia z uwagi na ładowania pojazdów w godzinach pracy.

Nie mniej pozytywnym skutkiem popularyzacji wykorzystania pojazdów elektrycznych może być fakt, że pojawi się nowy obszar wykorzystania magazynów energii, w którym rola OSD powinna być kluczowa. Mowa o technologii oddawania zgromadzonej energii w bateriach akumulatorów pojazdów elektrycznych do sieci. Możemy wówczas mówić o zarządzaniu pracą mobilnych magazynów energii, ponieważ z punktu widzenia OSD. Dzięki wykorzystaniu samochodów elektrycznych z funkcją zwrotu energii do sieci (V2G), stanowiących mobilny magazyn energii współpracujący z siecią elektroenergetyczną, zwiększone zostanie bezpieczeństwo dostaw energii do odbiorców końcowych oraz usprawniony zostanie proces dystrybucji energii elektrycznej. Dodatkowo zmagazynowanie energii lokalnie i podłączenie samochodu EV bezpośrednio do stacji SN/nN, pozwoli na ograniczenie strat związanych z dystrybucją.

Wzrost popularności używania samochodów elektrycznych w szczytowych okresach zapotrzebowania na energię elektryczną może spowodować zaburzenia w generacji i działaniu sieci dystrybucyjnej, a nawet długotrwałe przerwy w dostawach energii, jednak jest także szansą na skrócenie przerw w dostawie energii elektrycznej i poprawę wskaźników niezawodności. Wyzwaniem dla OSD wynikającym z wielkoskalowego wdrożenia układów ładowania pojazdów w sieci niskiego napięcia jest potrzeba dynamicznej rekonfiguracji sieci dystrybucyjnej. Szybki, a zarazem punktowy rozwój systemów ładowania pojazdów nie będzie możliwy bez postępu w budowie układów magazynowania energii w stacjach SN/nN czy też stacji ładowania gotowych do realizacji dwukierunkowego przepływu energii, ale dodatkowo także nie będzie możliwy bez zmiany nawyków użytkowników pojazdów elektrycznych i zmian legislacyjnych. Bardzo istotny jest również fakt, że rozbudowa sieci dystrybucyjnej jest

bardzo kosztowna i długotrwała, a systemy zasobnikowe i mobilne magazyny energii jakim mogą stać się pojazdy elektryczne pozwolą zmniejszyć skalę niezbędnych inwestycji

#### **6.4 Podsumowanie rozdziału**

Właściwy dobór parametrów elementów składowych zasobnika oraz opracowanie i zweryfikowanie algorytmu sterowania jest zadaniem czasochłonnym i trudnym. Właściwie dobrany i zlokalizowany zasobnik energii elektrycznej daje także możliwość pracy autonomicznej (wyspowej), która może być wykorzystana w przypadku zaniku napięcia. Zastosowanie zasobników energii w stacjach energetycznych należących do Operatora Systemu dystrybucyjnego pozwoli realizować szereg funkcji zależnych od zastosowanych układów ogniw i układów sterowania. Wykorzystanie zgromadzonej energii elektrycznej do bilansowania przez OSD pracy sieci dystrybucyjnej z wykorzystaniem rozwiązań magazynowania (obcinanie szczytów, wypełnianie dolin, przesuwanie obciążenia) pozwoli na poprawę parametrów jakościowych i niezawodnościowych dostaw energii elektrycznej do odbiorcy końcowego (wskaźniki przerw w sieci dystrybucyjnej– SAIDI, SAIFI, MAIFI) oraz obniżenie kosztów wynikających z niedotrzymania wymaganych parametrów w tym obszarze. Dodatkowo tworzy się możliwość bezpiecznego odstawienia fragmentu sieci dystrybucyjnej i przejścia do pracy wyspowej w przypadku wyłączeń planowanych i nieplanowanych

## 7 POSUMOWANIE

Zasobniki energii i ich zastosowanie w sieciach dystrybucyjnych jest istotnym z punktu widzenia operatora systemu dystrybucyjnego elektroenergetycznego zagadnieniem naukowym i aplikacyjnym. Analiza literatury i wdrożeń na poziomie europejskim pokazuje, że prowadzi się liczne prace demonstracyjne w tym zakresie. Póki co, szczególnie w naszym kraju, nie ma możliwości powiązania z magazynowaniem energii strumienia przychodu, poza korzyściami finansowymi związanymi z przesunięciem w czasie inwestycji sieciowych czy też redukcją szczytów zapotrzebowania na moc. Obecnie prace nad zasobnikami mają zatem charakter badawczy i służą przygotowaniu rynku energetycznego do powszechniejszego stosowania tych urządzeń w przyszłości. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że prawodawstwo polskie i unijne zmierza w kierunku ograniczenia roli operatorów systemów dystrybucyjnych w zakresie nowoczesnych rozwiązań regulacji sieci. Co prawda, dyrektywy unijne wraz z Pakietem Zimowym definiują istotną rolę wykorzystania instalacji magazynowania energii w systemie elektroenergetycznym, nie mniej jednak brak jest dokładnych regulacji na poziomie krajowym. Ponadto, ograniczenia technologiczne zniechęcają operatorów do masowego wdrożenia tej technologii we własnej działalności. Kompleksowa analiza aktów pranych pokazuje, że operatorzy systemów dystrybucyjnych nie mogą posiadać, tworzyć ani obsługiwać instalacji magazynowania energii. Natomiast, państwa członkowskie będą mogły zezwolić operatorom systemów dystrybucyjnych na posiadanie, tworzenie bądź eksploatację instalacji magazynowych lub zarządzanie nimi pod pewnymi warunkami. Działanie takie wynika z obawy przed dodatkowym ugruntowaniem monopolistycznej pozycji operatorów sieciowych. Jedyną możliwością, zapisaną w regulacjach krajowych, w tym zakresie jest zezwolenie eksploatacji magazynów energii przez OSD na potrzeby ładowania pojazdów. Dookreślone to zostało w ustawie o elektromobilności [78].

Analizując dostępne technologie oraz zmieniające się koszty magazynowania zauważalne jest, że zastosowanie technologii magazynowania energii przyniesie wszystkim uczestnikom rynku energii wymierne korzyści. Będzie to szczególnie widoczne tam, gdzie występują znaczne różnice między zapotrzebowaniem maksymalnym a minimalnym przy dynamicznym rozwoju źródeł OZE. Nie bez znaczenia jest również fakt, że rozbudowa sieci, czy to przesyłowej czy dystrybucyjnej, jest bardzo kosztowna i długotrwała, a takie systemy zasobnikowe pozwolą zmniejszyć skalę niezbędnych inwestycji.

Na podstawie przeprowadzonych przez autora i przedstawionych w rozdziale 5. oraz 6. analiz oraz zrealizowanych badań i pomiarów (vide załącznik A i B) można stwierdzić, że implementacja układów magazynowania energii w miejskiej sieci elektroenergetycznej nie stanowi problemu technicznego pod warunkiem zachowania sztuki inżynierskiej i wykonania niezbędnych obliczeń projektowych. Zostało to potwierdzone badaniami przeprowadzonymi w ramach wdrożenia takich układów w sieci Stoen Operator[zał. A i B]. Charakter pracy układu (czy to w trybie ładowania czy rozładowania) dla zasobników zlokalizowanych w stacjach SN/nN nie stanowi problemu dla warszawskiej sieci energetycznej z uwagi na jej dużą moc zwarciovą i zapasy mocy. Nie mniej jednak, uwaga ta jest potwierdzona tylko dla układów o małych pojemnościach (30 oraz 62 kWh) na bazie obecnych wdrożeń w sieci SO, w których moce zasobników były znacznie mniejsze od współpracujących mocy transformatorów.

Na bazie wyników badań przedstawionych w załącznikach oraz analizy pracy badanych układów pokazują, że ograniczenie pracy układu tylko do redukcji szczytu obciążenia jest nieefektywna ekonomicznie. Zasobnik w sieci dystrybucyjnej musi pełnić również dodatkowe funkcje (np. realizacja usług systemowych na rzecz OSP) inaczej będzie nieekonomiczny lub znosić ograniczenia sieciowe. Dobowy profil obciążenia typowej miejskiej stacji SN/nN wykazuje jednak dwa szczyty, poranny i popołudniowy, skorelowanie z godzinami rozpoczęcia i zakończenia pracy mieszkańców stolicy. Nie mniej jednak, należy zwrócić uwagę, że przynajmniej jeszcze przez pewien czas, tj. 2–3 lata, będzie należało wykonywać obliczenia zapotrzebowania mocy i rozpyłów mocy w sieci dla każdego przypadku implementacji układów oraz wykonywać pomiary mocy w sieci.

Przeprowadzone analizy i symulacje oraz pomiary współczynnika migotania światła wskazują, że najbardziej interesującym przypadkiem jest kompensowanie chwilowych obciążeń szczytowych, przekraczających znacznie moc transformatora, ale występujących sporadycznie w ciągu dnia. Zadanie takie może być realizowane stosunkowo niewielkimi zasobnikami, które można zabudować w stacjach kontenerowych. Zasobnik może być również potrzebny, jeżeli zapotrzebowanie na moc w danym obszarze będzie dynamicznie wzrastało i będzie musiała być pilnie wybudowana stacja transformatorowa. Wówczas zasadne będzie rozłożenie obciążenia w sieci niskiego napięcia równomiernie tak, aby nie przekroczyć możliwości regulacyjnych zasobnika.

Zastosowanie zasobników energii w stacjach energetycznych należących do operatora systemu dystrybucyjnego (OSD), na bazie pilotażowego wdrożenia małego magazynu w sieci warszawskiego OSD, pozwala wysnuć wniosek, że tak zlokalizowane jednostki są w stanie realizować szereg funkcji zależnych od zastosowanych układów ogniw oraz układów

sterowania. Wykorzystanie zgromadzonej energii elektrycznej do bilansowania przez OSD pracy sieci dystrybucyjnej z wykorzystaniem rozwiązań magazynowania (obcinanie szczytów, wypełnianie dolin, przesuwanie obciążenia) pozwoli na znaczącą poprawę parametrów jakościowych oraz pozwoli na obniżenie kosztów wynikających z niedotrzymania wymaganych parametrów w tym obszarze. Magazyny energii pozwolą na poprawę wskaźników związanych z przerwami w dostawie energii, dzięki możliwości skrócenia czasu przerwy oraz ich liczby (SAIDI, SAIFI). Warte podkreślenia jest, że metodologia wyliczania tych wskaźników opiera się na rejestracji zdarzeń dłuższych niż 3 minuty. Dobrze rozlokowane w sieci dystrybucyjnej zasobniki, dadzą możliwość na wykonanie przełączeń czy interwencji brygady pogotowia energetycznego w sposób nie powiększający tego wskaźnika (pojemność zasobnika pozwoli na wykonanie przełączeń w sieci). Nie bez znaczenia jest też możliwość podtrzymania zasilania dla kluczowych odbiorców.

Badania i przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej analizy wykorzystania mobilnych zasobników energii pozwalają stwierdzić, że na gruncie rozwiązań technicznych możliwe jest wdrożenie technologii V2G jako elementu wsparcia sieci dystrybucyjnej. Ciągły wzrost pojemności baterii w nowych pojazdach (samochody, ciężarówki, autobusy) daje możliwość stworzenia systemu, który na polecenie OSD, świadczyć będzie usługę dostarczania mocy w stanach awaryjnych. Nie mniej uwarunkowane jest to licznymi obostrzeniami i wadami. Najważniejszą z nich jest niepewność co do dostępnej dla OSD w stanie awarii pojemności baterii z pojazdów EV, z uwagi na konieczność zachowania elastyczności w kontaktach z Klientem, jak również konieczność zapewnienia miejsc postojowych czy też dojazdu do stacji SN/nN. Analiza lokalizacji zasobników w dzielnicy Wawer wykazała, że bardziej zasadne niż wykorzystanie technologii V2G jest przebudowa istniejących stacji elektroenergetycznych na obiekty z wbudowanymi już fabrycznie zasobnikami stacjonarnymi.

Badania literatury w ramach pracy doktorskiej wykazały także, że zasobniki energii mogą świadczyć, wiele innych ważnych funkcji w systemie elektroenergetycznym, także istotnych dla operatora systemu przesyłowego. Niestety te najbardziej potrzebne i mogące przynieść przychody w najbliższym czasie (związane z powstającym rynkiem mocy) wymagają dysponowania zasobnikami o mocach ponad 2 MW. Możliwe jest jednak zabudowanie przez Stoen Operator kilku zasobników, współpracujących ze stacjami ładowania i dodatkowo świadczącymi usługi na rynku mocy. W celu pełnego wykorzystania potencjału magazynowania energii, poza zachętami finansowanymi, w początkowym okresie niezbędne jest także wprowadzenie stosownych regulacji, które powinny one zawierać:

- definicje magazynowania w zależności od jego funkcji, wielkości magazynu i maksymalnego czasu rozładowania;
- wykazu usług magazynowania i rozwiązań technicznych implementujących te usługi w sieciach dystrybucyjnych;
- definicje ról i kolejności priorytetów wśród zainteresowanych stron;
- zasady koordynacji pomiędzy podmiotami;
- zasady wyjaśniające prawa wytwórców, OSP, OSD i użytkowników końcowych do posiadania, eksploatacji i użytkowania systemów magazynowania.

Stworzenie dynamicznie rozwijającego się rynku magazynów energii w Polsce może być szansą na budowę branży magazynowania energii, a także przy odpowiednim wsparciu pozyskaniu inwestorów posiadających niezbędne technologie.

Za osiągnięcia własne, autor uważa:

1. przeprowadzenie analizy zagadnień funkcjonowania implementacji zasobników energii w sieciach dystrybucyjnych;
2. przeprowadzenie przeglądu dostępnych konstrukcji zasobników energii;
3. przeprowadzenie projektów wykazanych w załącznikach, dotyczących wdrożenia układów magazynowania w sieci Stoen Operator
4. wykonanie pomiarów rozpiętości w sieci nN dla stacji SN/nN wyposażonej w zasobnik energii oraz technologię V2G
5. opracowanie kryteriów lokalizacji i efektywności wdrożenia zasobników w sieci warszawskiego OSD.

**Na bazie badań przedstawionych w rozprawie sformułowano następujące szczegółowe wnioski:**

1. W związku z dynamicznym rozwojem źródeł OZE i ich przyłączania do sieci niskich napięć istnieje potrzeba wdrożenia metod do elastycznego zarządzania przepływami energii w sieciach dystrybucyjnych
2. Pomimo różnych wymagań i uwarunkowań formalno-prawnych w krajach europejskich stosowanie magazynów energii przez OSD jest jednym ze sposobów na przyspieszenie realizacji inwestycji sieciowych oraz ograniczenia konieczności rozbudowy sieci

3. Każdorazowa budowa zasobników przez OSD wymaga oceny lokalizacji urządzeń zarówno w aspektach technicznych jak i pod kątem opłacalności ekonomicznej, w tym w zakresie świadczenia dodatkowych usług regulacyjnych
4. Wraz ze spadkiem cen urządzeń i wdrożenie zmian prawnych w zakresie możliwości stosowania zasobników przez OSD opłacalność inwestycji będzie rosła.
5. Zastosowanie pojazdów elektrycznych jako mobilnych zasobników energii jest trudne technicznie i utrudnione na bazie obowiązujących regulacji prawnych

Na podstawie powyższego autor uważa, że cel pracy został osiągnięty, a teza udowodniona.

## 8 BIBLIOGRAFIA

1. AKAGI, Hirofumi, SATO, Hikaru. *Control and performance of a doubly-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system*. IEEE Transactions on Power Electronics. 2002, T. 17, nr 1, s. 109–116. DOI 10.1109/63.988676.
2. ANGIELCZYK, Przemysław, SOSNOWSKI, Łukasz, KOŁTUN, Anna, RUP, Maciej SAPUŁA, Łukasz. *Management System for a Transformer Substation with Energy Storage*. Acta Energetica. 20 grudzień 2018, T. 0, nr 37, s. 27–34. DOI 10.12736/ISSN.2300-3022.2018403.
3. ARULAMPALAM, A., BARNES, M., ENGLER, A., GOODWIN, A. JENKINS, N. *Control of power electronic interfaces in distributed generation Microgrids*. International Journal of Electronics. 2004, T. 91, nr 9, s. 503–523. DOI 10.1080/00207210412331289023.
4. AWAD, Ahmed S.A., EL-FOULY, Tarek H.M. SALAMA, Magdy M.A. *Optimal ESS Allocation for Benefit Maximization in Distribution Networks*. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017, DOI 10.1109/TSG.2015.2499264.
5. AWAD, Ahmed S.A., EL-FOULY, Tarek H.M. SALAMA, Magdy M.A. *Optimal ESS allocation for load management application*. IEEE Transactions on Power Systems. 2015, DOI 10.1109/TPWRS.2014.2326044.
6. BAJSZCZAK, Grzegorz. *Rozproszony system sterowania napięciami i mocą bierną*. Emerson Process Management Power Water Solutions. Lipiec 2012, www.energetyka.eu, II Smart Communications Technology Forum, s. 363- 368.



7. BARI, Ataul, JIANG, Jin, SAAD, Walid JAEKEL, Arunita. *Challenges in the smart grid applications: An overview*. 2014. S.l.: s.n.
8. BEAUDIN, Marc, ZAREIPOUR, Hamidreza, SCHELLENBERGLABE, Anthony ROSEHART, William. *Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review*. 2010. S.l.: s.n.
9. BICZEL, Piotr. *Nowoczesny system elektroenergetyczny na miarę XXI w.* Informacje o Normach i Przepisach Elektrycznych, ISSN 1234-0081, Miesięcznik, 2017, T. 210, s.3-16.
10. BICZEL, Piotr SOSNOWSKI, Łukasz. *Ładowanie autobusów elektrycznych a miejski system elektroenergetyczny*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. 2019, T. Nr 63, nr 63, s. 12–14. DOI 10.32016/1.63.06.
11. BINDUHEWA, P. J., RENFREW, A. C. BARNES, M. *Ultracapacitor energy storage for microgrid micro-generation*. W: IET Conference Publications. S.l.: s.n., 2008. s. 270–274.
12. BREKKEN, Ted K.A., YOKOCHI, Alex, VON JOUANNE, Annette, YEN, Zuan Z., HAPKE, Hannes Max HALAMAY, Douglas A. *Optimal energy storage sizing and control for wind power applications*. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2011, DOI 10.1109/TSTE.2010.2066294.
13. CHACRA, Fouad Abou, BASTARD, Patrick, FLEURY, Gilles CLAVREUL, Régine. *Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation*. IEEE Transactions on Power Systems. 2005, T. 20, nr 2, s. 684–691. DOI 10.1109/TPWRS.2005.846091.
14. CHEN, Changsong, DUAN, Shanxu, CAI, Tao, LIU, Bangyin HU, Guozhen. *Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids*. IEEE Transactions on Power Electronics. 2011, T. 26, nr 10, s. 2762–2773. DOI 10.1109/TPEL.2011.2116808.
15. CHEN, L., LIU, Y., ARSOY, A. B., RIBEIRO, P. F., STEURER, M. IRAVANI, M. R. *Detailed modeling of superconducting magnetic energy storage (SMES) system*. 2006. S.l.: s.n.
16. CHEN, S. X., GOOI, H. B. WANG, M. Q. *Sizing of energy storage for microgrids*. IEEE Transactions on Smart Grid. 2012, T. 3, nr 1, s. 142–151. DOI 10.1109/TSG.2011.2160745.

17. CHUKWU, Uwakwe C. MAHAJAN, Satish M. *V2G electric power capacity estimation and ancillary service market evaluation*. W: IEEE Power and Energy Society General Meeting. S.l.: s.n., 2011.
18. DARABI, Zahra FERDOWSI, Mehdi. *Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile*. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2011, T. 2, nr 4, s. 501–508. DOI 10.1109/TSTE.2011.2158123.
19. DARYANIAN, Bahman, BOHN, Roger E. TABORS, Richard. *Optimal demand-side response to electricity spot prices for storage-type customers*. IEEE Transactions on Power Systems. 1989, T. 4, nr 3, s. 897–903. DOI 10.1109/59.32577.
20. DARYANIAN, Bahman BOHN, Roger E. *Sizing of Electric Thermal Storage Under Real Time Pricing*. IEEE Transactions on Power Systems. 1993, T. 8, nr 1, s. 35–43. DOI 10.1109/59.221246.
21. EDDY, Y. S. Foo, GOOI, H. B. CHEN, S. X. *Multi-agent system for distributed management of microgrids*. IEEE Transactions on Power Systems. 2015, T. 30, nr 1, s. 24–34. DOI 10.1109/TPWRS.2014.2322622.
22. EUROPEAN COMMISSION. *The future role and challenges of Energy Storage*. DG ENER Working Paper [online]. 2013, s. 1–36.
23. EYER, Jim COREY, Garth. *Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide*. W: Lightning in a Bottle: Electrical Energy Storage. S.l.: s.n., 2011. s. 1–191. ISBN 9781614704812.
24. FAIAS, Sérgio, SANTOS, Patrícia, MATOS, Fernando, SOUSA, Jorge CASTRO, Rui. *Evaluation of energy storage devices for renewable energies integration: Application to a Portuguese wind farm*. W: 2008 5th International Conference on the European Electricity Market, EEM. S.l.: s.n., 2008.
25. GEE, Anthony M., ROBINSON, Francis V.P. DUNN, Roderick W. *Analysis of battery lifetime extension in a small-scale wind-energy system using supercapacitors*. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2013, T. 28, nr 1, s. 24–33. DOI 10.1109/TEC.2012.2228195.
26. GUILLE, Christophe GROSS, George. *A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation*. Energy Policy. 2009, DOI 10.1016/j.enpol.2009.05.053.
27. HADLEY, Stanton W. TSVETKOVA, Alexandra A. *Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation*. Electricity Journal. 2009, T. 22, nr 10, s. 56–68. DOI 10.1016/j.tej.2009.10.011.

28. HATZIARGYRIOU, N., DONNELLY, M., PAPATHANASSIOU, S., LOPES, J.A.P., TAKASAKI, M., CHAO, H., USAOLA, J., LASSETER, R., EFTHYMIADIS, A., KAROUI, K. ARABI, S. *Modeling New Forms of Generation and Storage*. CIGRE Technical Brochure, TF 38.01.10, s. 1–139.
29. HE, Guannan, CHEN, Qixin, KANG, Chongqing, PINSON, Pierre XIA, Qing. *Optimal Bidding Strategy of Battery Storage in Power Markets Considering Performance-Based Regulation and Battery Cycle Life*. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016, T. 7, nr 5, s. 2359–2367. DOI 10.1109/TSG.2015.2424314.
30. HEBNER, Robert, BENO, Joseph WALLS, Alan. *Flywheel batteries come around again*. IEEE Spectrum. 2002, T. 39, nr 4, s. 46–51. DOI 10.1109/6.993788.
31. HLUBENĚ, Daniel, BEŇA, Ľubomír KOLCUN, Michal. *Use of TCSC for active power flow control in the electric power system*. Przegląd Elektrotechniczny. 2012, T. 88, nr 8, s. 84–87.
32. HØJ, Jens Christian Morell Lodberg, JUHL, Lasse Thorbøll LINDEGAARD, Søren Bernt. *V2G-An economic gamechanger in E-mobility?* World Electric Vehicle Journal. 2018, T. 9, nr 3. DOI 10.3390/wevj9030035.
33. JAREK, Grzegorz, JELEŃ, Michał, MICHALAK, Jarosław ZYGMANOWSKI, Marcin. *Sterowanie przekształtnikiem AC/DC w interfejsie energoelektronicznym dla mikroinstalacji prosumenckiej*. Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe Nr 2/ 2016 (110), s. 139- 145.
34. KAZIMIERCZUK, Marian K. *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters*. S.l.: s.n., 2012. ISBN 9780470773017.
35. KEMPTON, Willett TOMIĆ, Jasna. *Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*. Journal of Power Sources. 2005, DOI 10.1016/j.jpowsour.2004.12.025.
36. KEMPTON, Willett TOMIĆ, Jasna. *Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy*. Journal of Power Sources. 2005, DOI 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022.
37. KOMISJA EUROPEJSKA. *Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu - biała księga* [online]. S.l. 2011. [udostępniono 2.5.2020]. Pobrano: <http://eurlex.europa.eu>
38. KOZUBIŃSKI, Wojciech, MASIĄG, Robert ZALEWSKA-WOJTUŚ, Katarzyna. PTPiREE. *Prosument w inteligentnej sieci energetycznej*. S.l. 2013.

39. KUMAR, V., LAHIRI, Avishek DOGAN, Orhan Bahadir. *A strategic framework for a profitable business model in the sharing economy*. Industrial Marketing Management. 2018, T. 69, s. 147–160. DOI 10.1016/j.indmarman.2017.08.021.
40. LETENDRE, Steven E KEPTON, Willet. *The V2G Concept: a new model for power? Connecting utility infrastructure and automobiles*. Public Utilities Fortnightly [online]. 2002, nr February, s. 16–26. [udostępniono 16.4.2020].
41. LI, Jianwei, GEE, Anthony M., ZHANG, Min YUAN, Weijia. *Analysis of battery lifetime extension in a SMES-battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model*. Energy. 2015, T. 86, s. 175–185. DOI 10.1016/j.energy.2015.03.132.
42. LIU, Nian, CHENG, Minyang, YU, Xinghuo, ZHONG, Jiangxia LEI, Jinyong. *Energy-Sharing Provider for PV Prosumer Clusters: A Hybrid Approach Using Stochastic Programming and Stackelberg Game*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018, T. 65, nr 8, s. 6740–6750. DOI 10.1109/TIE.2018.2793181.
43. LO, Chin H. ANDERSON, Max D. *Economic dispatch and optimal sizing of battery energy storage systems in utility load-leveling operations*. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1999, T. 14, nr 3, s. 824–829. DOI 10.1109/60.790960.
44. LOGENTHIRAN, T., SRINIVASAN, Dipti KHAMBADKONE, Ashwin M. *Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system*. Electric Power Systems Research. 2011, T. 81, nr 1, s. 138–148. DOI 10.1016/j.epsr.2010.07.019.
45. LUBIN, Miles, PETRA, Cosmin G., ANITESCU, Mihai ZAVALA, Victor. *Scalable stochastic optimization of complex energy systems*. W: Proceedings of 2011 SC - International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. S.l.: s.n., 2011.
46. LUO, Fengji, MENG, Ke, DONG, Zhao Yang, ZHENG, Yu, CHEN, Yingying WONG, Kit Po. *Coordinated operational planning for wind farm with battery energy storage system*. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015, T. 6, nr 1, s. 253–262. DOI 10.1109/TSTE.2014.2367550.
47. PASKA, Józef E., KŁOS, Mariusz, PAWLAK, Karol. *Metodyka oceny ekonomicznej magazynowania energii elektrycznej*. Rynek energii - Rozwój rynku a konkurencyjność gospodarki. Politechnika Lubelska, 2015, s.122- 132.
48. MALKO, Jacek WOJCIECHOWSKI, Henryk. *Magazynowanie energii - nowe technologie*. Nowa Energia. 2015, nr 2–3.

49. MARZECKI, Jerzy, DUKAT, Piotr, PAWLICKI, B, SOSNOWSKI, Łukasz. Kierunek rozwoju Inteligentnych Sieci Elektroenergetycznych w aglomeracji miejskiej - propozycje. 2014. S.l.: Wiadomości Elektrotechniczne.
50. MERCIER, Pascal, CHERKAoui, Rachid OUDALOV, Alexandre. Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system. IEEE Transactions on Power Systems. 2009, DOI 10.1109/TPWRS.2009.2022997.
51. MINISTERSTWO AKTYWÓW PAŃSTWOWYCH. Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021 – 2030. Założenia i cele oraz polityki i działania, Warszawa, 2019.
52. MINISTERSTWO GOSPODARKI. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [online]. 2007. S.l.: s.n. [udostępniono 22.1.2020]. Pobrano: <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20070930623>. § 1 i 2 pkt 7, 8, 15.
53. MINISTRA GOSPODARKI. Obwieszczenie z dnia 21 grudnia 2009 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2030 r.
54. MITRA, Joydeep. Reliability-based sizing of backup storage. IEEE Transactions on Power Systems. 2010, T. 25, nr 2, s. 1198–1199. DOI 10.1109/TPWRS.2009.2037516.
55. MOHSENIAN-RAD, Hamed. Coordinated Price-Maker Operation of Large Energy Storage Units in Nodal Energy Markets. IEEE Transactions on Power Systems. 2016, T. 31, nr 1, s. 786–797. DOI 10.1109/TPWRS.2015.2411556.
56. MURALI, D. RAJARAM, M. Active and Reactive Power Flow Control using FACTS Devices. International Journal of Computer Applications. 2010, T. 9, nr 8, s. 45–50. DOI 10.5120/1403-1892.
57. NADEEM, Furquan, HUSSAIN, S. M.Suhail, TIWARI, Prashant Kumar, GOSWAMI, Arup Kumar USTUN, Taha Selim. Comparative review of energy storage systems, their roles, and impacts on future power systems. 2019. S.l.: s.n.
58. NAGARAJAN, Adarsh AYYANAR, Raja. Design and Strategy for the Deployment of Energy Storage Systems in a Distribution Feeder With Penetration of Renewable Resources. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015, DOI 10.1109/TSTE.2014.2330294.
59. NOWAK, M. Teoria przekształtników. ISEP Wydawnictwo PW, 2005.

60. OUDALOV, Alexandre, CHARTOUNI, Daniel OHLER, Christian. Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2007, T. 22, nr 3, s. 1259–1266. DOI 10.1109/TPWRS.2007.901459.
61. PARLAMENT EUROPEJSKI I RADA UNII EUROPEJSKIEJ. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/944 z dnia 5 czerwca 2019 r. W sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej i zmieniająca dyrektywę 2012/27 / UE. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* [online]. 2019,
62. PEREIRA, M. V.F. PINTO, L. M.V.G. Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. *Mathematical Programming*. 1991, T. 52, nr 1–3, s. 359–375. DOI 10.1007/BF01582895.
63. PIPATTANASOMPORN, M., FEROZE, H. RAHMAN, S. Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation. W: 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2009. S.l.: s.n., 2009.
64. RADUCU, George Alin. Control of grid side inverter in a B2B configuration for WT applications. PED10-1015b, Aalborg University. 2008, s. 103.
65. RIBEIRO, Paulo F., JOHNSON, Brian K., CROW, Mariesa L., ARSOY, Aysen LIU, Yilu. Energy Storage systems for Advances Power Applications. *Proceedings of the IEEE*. 2001, T. 89, nr 12, s. 1744–1756. DOI 10.1109/5.975900.
66. ROMO, R. MICHELOUD, O. Power quality of actual grids with plug-in electric vehicles in presence of renewables and micro-grids. 2015. S.l.: s.n.
67. SHANKAR, C. Udhaya, THOTTUNGAL, Rani MYTHILI, S. Voltage stability improvement and power oscillation damping using Static Synchronous Series Compensator (SSSC). W: *Proceedings of 2015 IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2015*. S.l.: s.n., 2015.
68. SHYAM, Mr, GHODKE, B SANTOSH, Mr Kompelli. Control of Active And reactive power flow in transmission line and power Oscillation damping by using Static Synchronous series compensator (SSSC). S.l. 2014.
69. SIKORA, Ryszard, ZEŃCZAK, Michał. Magazynowanie energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym. *Napędy i sterowanie*. 2011, nr 2, s. 61–66.
70. SOSNOWSKI, Łukasz. Inteligentna stacja SN/nn z zasobnikiem energii i układem ładowania Vehicle-to- Grid (V2G) na przykładzie wdrożenia w innogy Stoen Operator. *WIADOMOŚCI ELEKTROTECHNICZNE*. 17 kwiecień 2020, T. 1, nr 4, s. 13–16. DOI 10.15199/74.2020.4.2.

71. SOSNOWSKI, Łukasz, BICZEL, Piotr, DUKAT, Piotr. Wdrożenie układu magazynowania energii w sieci innogy Stoen Operator. *Wiadomości Elektrotechniczne*. 2018, T. R. 86, nr. DOI 10.15199/74.2018.2.3.
72. SOSNOWSKI, Łukasz, BICZEL, Piotr, DUKAT, Piotr. Inteligentna stacja SN/nn z zasobnikiem energii i układem ładowania Vehicle-to- Grid (V2G) na przykładzie wdrożenia w innogy Stoen Operator. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2020, vol. 4, s.11-14. DOI:10.15199/74.2020.4.2.
73. SZUBERT, K. Wpływ sterowników FACTS na pracę zabezpieczeń odległościowych. *Automatyka Elektroenergetyczna*, 2006, Nr 3 (52), s. 6-11.
74. TELEKE, Sercan, BARAN, Mesut E., HUANG, Alex Q., BHATTACHARYA, Subhashish ANDERSON, Loren. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009, T. 24, nr 3, s. 725–732. DOI 10.1109/TEC.2009.2016000.
75. TUBALLA, Maria Lorena ABUNDO, Michael Lochinvar. A review of the development of Smart Grid technologies. 2016. S.l.: s.n.
76. UCHWAŁA RADY MINISTRÓW NR 22/2021 Z DNIA 2 LUTEGO 2021r. *Polityka Energetyczna Polski do 2040 r.* Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Warszawa, 2021.
77. UGARTE, Sergio, LARKIN, Julia, VAN DER REE, Bart, VOOGT, Monique, FRIEDRICHSEN, Nele, MICHAELIS, Julia, THIELMANN, Axel, WIETSCHEL, Martin VILLAFILA, Roberto. Energy Storage: Which market design and regulatory incentives are needed? Report for the European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy. 2015, nr 1, s. 1–5. DOI 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
78. USTAWA Z DNIA 11 STYCZNIA 2018r. O ELEKTROMOBILNOŚCI I PALIWACH ALTERNATYWNYCH. *Dz. U.* 2018 poz. 317.
79. VAZQUEZ, Sergio, LUKIC, Srdjan M., GALVAN, Eduardo, FRANQUELO, Leopoldo G. CARRASCO, Juan M. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010, DOI 10.1109/TIE.2010.2076414.
80. WALLACE, Stein W. FLETEN, Stein Erik. *Stochastic Programming Models in Energy*. 2003. S.l.: s.n.
81. WANG, M. H. CHEN, H. C. Transient stability control of multimachine power systems using flywheel energy injection. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*. 2005, T. 152, nr 5, s. 589–596. DOI 10.1049/ip-gtd:20045002.

82. WEN, Shuli, LAN, Hai, FU, Qiang, YU, David C. ZHANG, Lijun. Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015, DOI 10.1109/TPWRS.2014.2337936.
83. WOJCIECHOWSKI, Henryk. Energy storage technologies . Part II. . 2017, s. 16–27.
84. WROCŁAWSKI, Mieczysław. Lokalne obszary bilansowania. *Energia Elektryczna*, V.10, 2012.
85. XU, N. Z. CHUNG, C. Y. Reliability evaluation of distribution systems including vehicle-to-home and vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016, DOI 10.1109/TPWRS.2015.2396524.
86. YAO, D. L., CHOI, S. S., TSENG, K. J. LIE, T. T. Determination of short-term power dispatch schedule for a wind farm incorporated with dual-battery energy storage scheme. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2012, T. 3, nr 1, s. 74–84. DOI 10.1109/TSTE.2011.2163092.
87. YAZDANI, Amirnaser IRAVANI, Reza. *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*. S.l.: s.n., 2010. ISBN 9780470521564.
88. ZAFIRAKIS, D., CHALVATZIS, K., BAIOCCHI, G. DASKALAKIS, G. Modeling of financial incentives for investments in energy storage systems that promote the large-scale integration of wind energy. *Applied Energy*. 2013, T. 105, s. 138–154. DOI 10.1016/j.apenergy.2012.11.073.
89. ZAGRAJEK, Krzysztof, SOSNOWSKI, Łukasz, BICZEL, Piotr WRÓBLEWSKI, Konrad. Operation of electrical vehicles fast charging stations in Warsaw - Case study of innogy GO! Collecting point. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020, T. 96, nr 5, s. 20–25. DOI 10.15199/48.2020.05.03.
90. ZAKERI, Behnam SYRI, Sanna. *Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis*. 2015. S.l.: s.n.
91. ZHANG, Xinan, BAO, Jie, WANG, Ruigang, ZHENG, Chaoxu SKYLLAS-KAZACOS, Maria. Dissipativity based distributed economic model predictive control for residential microgrids with renewable energy generation and battery energy storage. *Renewable Energy [online]*. 2017, T. 100, s. 18–34. DOI 10.1016/j.renene.2016.05.006.
92. ZHENG, Yu, DONG, Zhao Yang, LUO, Feng Ji, MENG, Ke, QIU, Jing WONG, Kit Po. Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of discos with high renewable penetrations. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014, DOI 10.1109/TPWRS.2013.2278850.



93. “Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci”. W: Dz. Urz. UE L 112 (14 kw. 2016), s. 1–65. url: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=CS> (term. wiz. 06. 09. 2021).
94. Raport PTPIREE „ENERGETYKA DYSTRYBUCJA PRZESYŁ”, czerwiec 2022 <http://raport.ptpiree.pl/raporty/2022/> (term. wiz. 06. 07. 2022)
95. ZAGRAJEK Krzysztof, PASKA Józef, SOSNOWSKI Łukasz, GOBOSZ Konrad, WRÓBLEWSKI Konrad ; Framework for the Introduction of Vehicle-to-Grid Technology into the Polish Electricity Market; Energies, ISSN 1996-1073 rok :2021 DOI:10.3390/en14123673

## **ZAŁĄCZNIKI**

### Załącznik A

#### **Układ badawczy małego zasobnika energii w stacji SN/nN zrealizowana przez Stoen Operator w ramach własnego projektu badawczego**

Kierownik projektu: *mgr inż. Łukasz Sosnowski*

Cel badania: *Badanie technicznych możliwości wyrównania profilu obciążenia stacji przy użyciu zasobnika bateryjnego*

Termin realizacji: *2016-2018*

Kamienie milowe:

- *Opracowanie i wdrożenie układu magazynu energii w stacji SN/nN*

- *Modernizacja istniejącej stacji wraz z zabudową paneli PV (max 600 Wp)*
- *Opracowanie i wdrożenie koncepcji bilansowania lokalnego w oparciu o magazyn energii, panele PV własne i Prosumentów, pomiary nN*
- *Testy algorytmu samouczenia magazynu lokalnego*

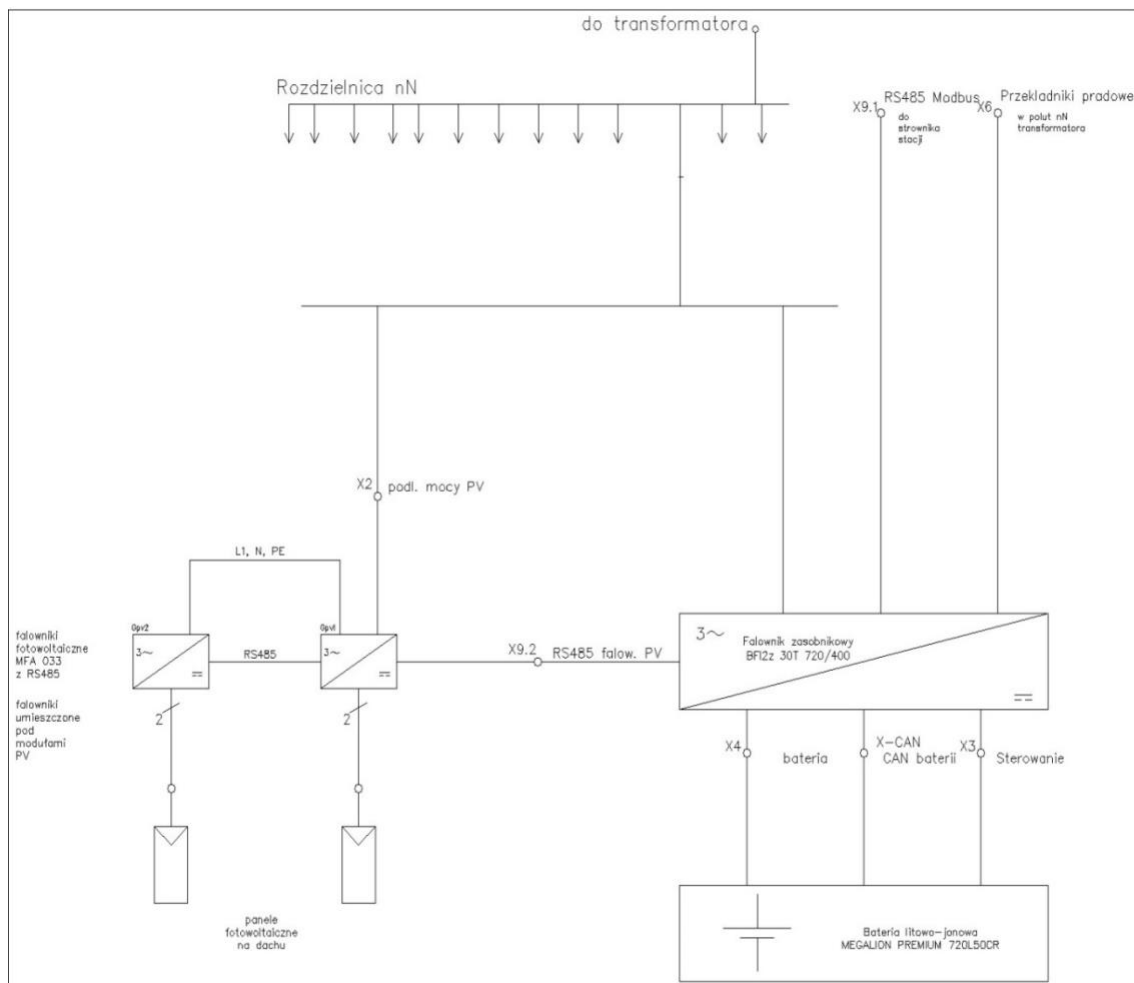
Uzyskane efekty:

- *Zbudowanie pierwszego magazynu energii w warszawskiej sieci dystrybucyjnej*
- *Przeprowadzenie pomiarów jakościowych wpływu zasobnika na sieć zasilającą*
- *Wyznaczenie obszarów pracy zasobnika na bazie krzywej obciążenia stacji oraz ich modyfikacja*
- *Zebranie doświadczeń eksploatacyjnych*

Obszary do dalszych analiz

- *Zbyt mała pojemność zasobnika aby mógł znacznie wpływać / całkowicie zastąpić sieć zasilającą SN*
- *Algorytm zarządzania pracą zasobnika musi obejmować analizę obciążenia dłuższą niż 7 dni*
- *Dobór elementów sterujących i wykonawczych musi być dostosowany do charakteru pracy sieci elektroenergetycznej i miejsca zabudowy zasobnika*

W ramach prac badawczo rozwojowych, Stoen Operator (SO), opracowało i wdrożyło wspólnie z polskimi dostawcami pierwszy w Warszawie magazyn energii w stacji SN/nN. Układ o pojemności ponad 30 kWh został zbudowany w oparciu o baterie litowo-jonowe i dodatkowo zasilany niewielkim układem paneli fotowoltaicznych (rys. 23).



Rys. 23 Schemat kreskowy wdrożonej stacji z zasobnikiem

Zasada działania zasobnika polega na ładowaniu go w okresie minimalnego poboru mocy, a rozładowywaniu w okresie szczytu. W trybie pracy automatycznej zasobnik ładuje się nocą, a rozładowuje lub ładuje w ciągu dnia. Jeżeli moc czynna zasobnika jest mniejsza niż moc znamionowa, pozostała moc może być wykorzystana na kompensację mocy biernej. Sterowanie zasobnikiem polega na zadaniu żądanych wartości mocy czynnej i biernej wraz z kierunkiem przepływu.

Zadawanie może odbywać się na trzy sposoby:

- lokalnie, z panelu użytkownika falownika,
- zdalnie, poprzez interfejs zewnętrzny Modbus,
- automatycznie, zasobnik wyznacza wartości zadane na podstawie pomiarów mocy z wykorzystaniem autorskich algorytmów sterowania.

Wartość zadana mocy czynnej ma priorytet przed wartością mocy biernej. Moc czynna może być zadana w granicach  $\pm 30$  kW. Zadana moc bierna może być w granicach  $\pm 30$  kVAr. Obie moce zadane łącznie nie mogą przekroczyć wartości mocy znamionowej 30 kVA. Układ sterowania zabezpiecza przed zadaniem zbyt dużej mocy.

Po zadaniu mocy lokalnie lub zdalnie zasobnik będzie się ładował lub rozładowywał do osiągnięcia odpowiednio maksymalnego lub minimalnego poziomu naładowania baterii. Po osiągnięciu wartości granicznych zasobnik przełączy się w stan gotowości, przyjmując automatycznie wartości mocy zadanej czynnej i biernej równie zero.

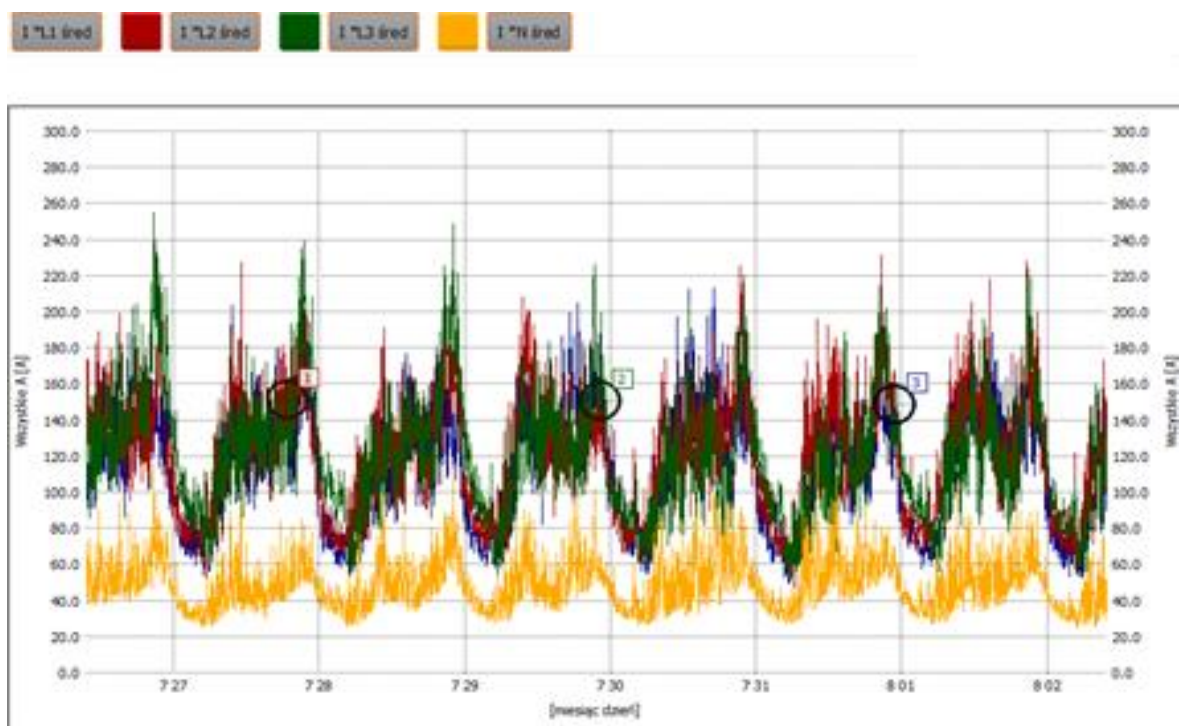
**Tabela 34. Zestawienie parametrów technicznych układu magazynowania energii**

| Nazwa parametru                                                                 | Wartość                 | Jednostka |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------|
| Typ ogniwa                                                                      | Li-ion (NCM Delta P140) | -         |
| Pojemność znamionowa ogniwa                                                     | 50                      | Ah        |
| Napięcie znamionowe                                                             | 720                     | V         |
| Napięcie pracy, napięcie stałe                                                  | 565 – 800               | V         |
| Energia nominalna                                                               | 33                      | kWh       |
| Prąd maksymalny ciągły                                                          | 45                      | A         |
| Maksymalna ciągła moc rozładowania / ładowania                                  | 30                      | kW        |
| Dopuszczalny zakres temperatury pracy, w którym może być oddawana pełna energia | od -20 do +50           | °C        |
| Napięcie przechowywania                                                         | 682,5                   | V         |

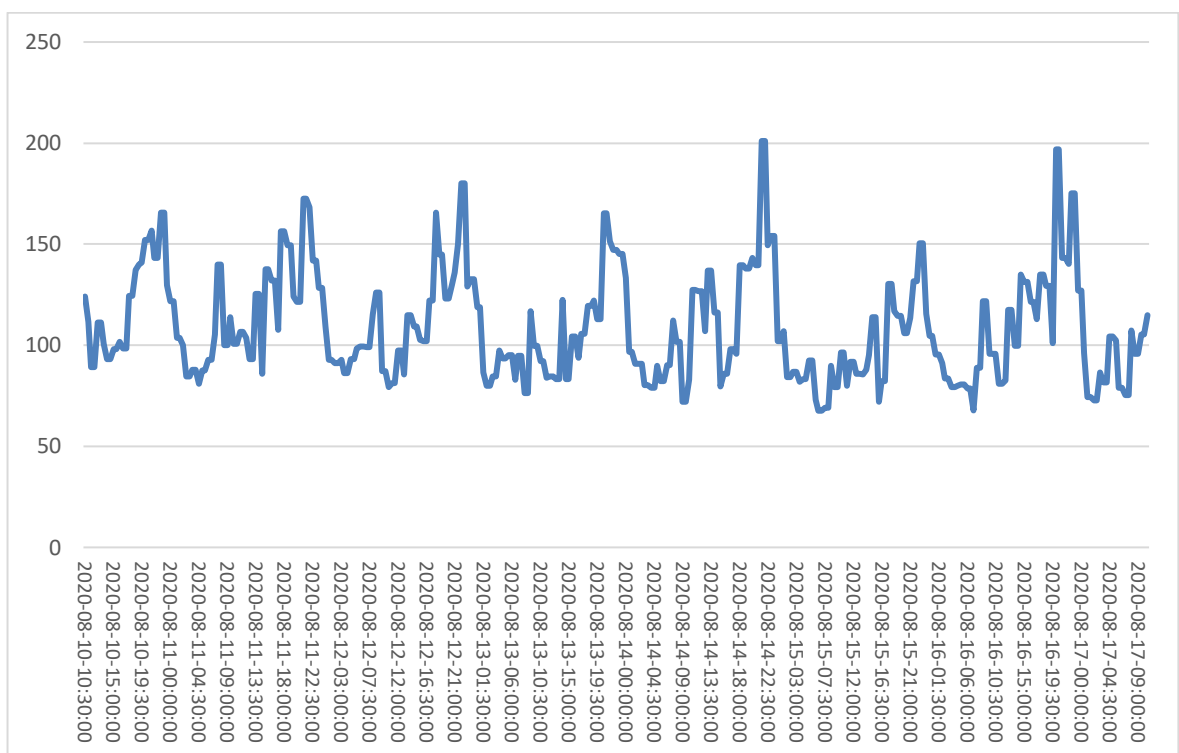
Zasobnik przyłączany jest do sieci elektroenergetycznej do wydzielonego pola rozdzielnic nN w istniejącej stacji transformatorowej. Pole to zabezpieczone jest rozłącznikiem listwowym z bezpiecznikami 80A.

#### Załącznik A1

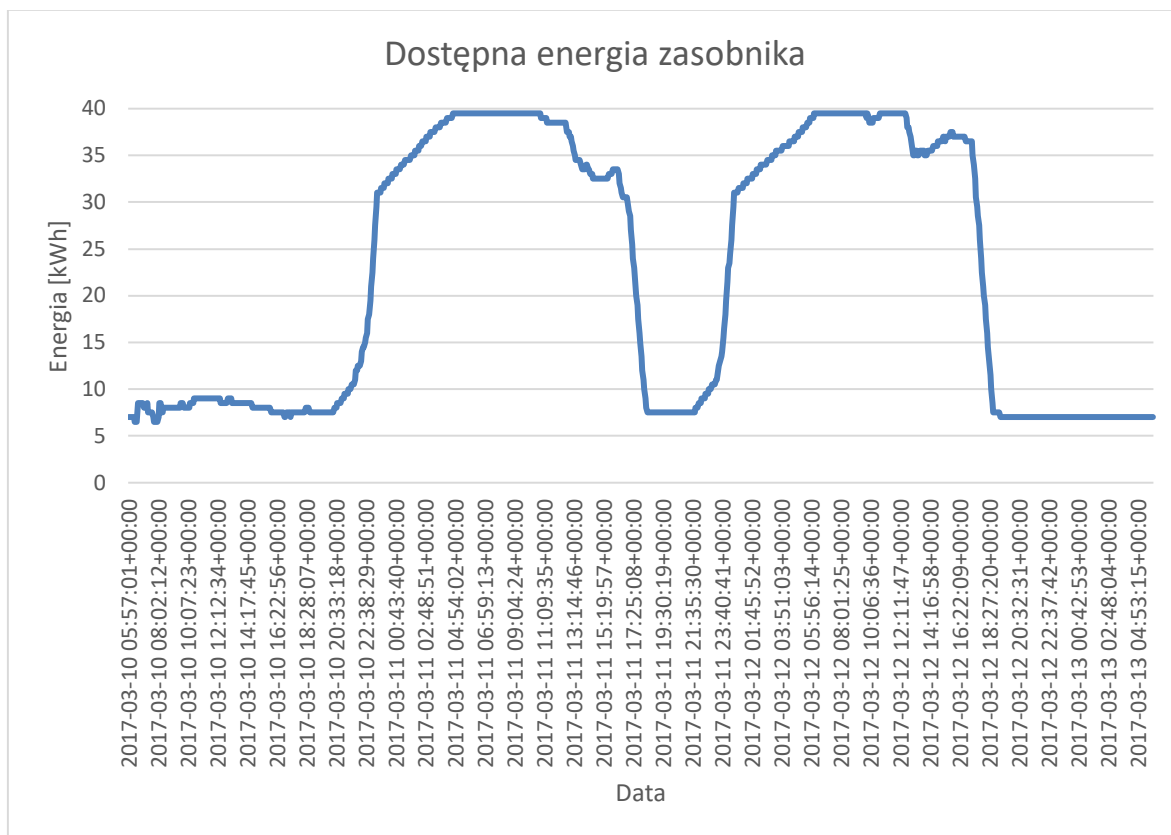
#### **Wyniki pomiarów małego zasobnika**



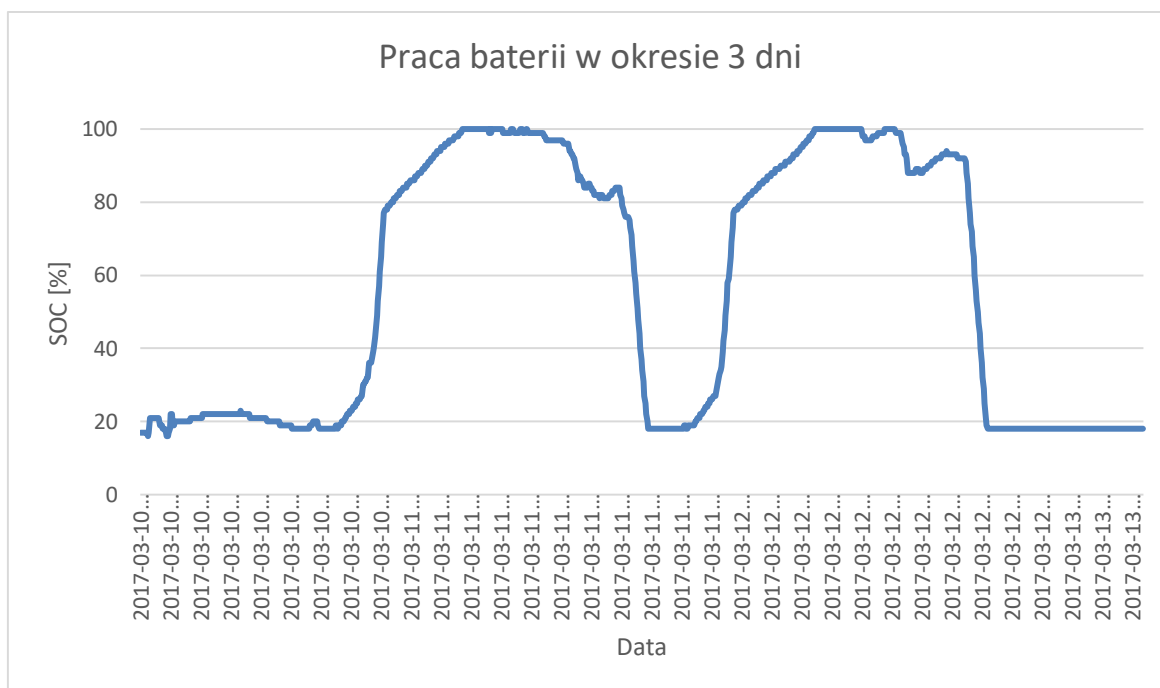
Rys. 24 Średnie obciążenie stacji (przed realizacją)



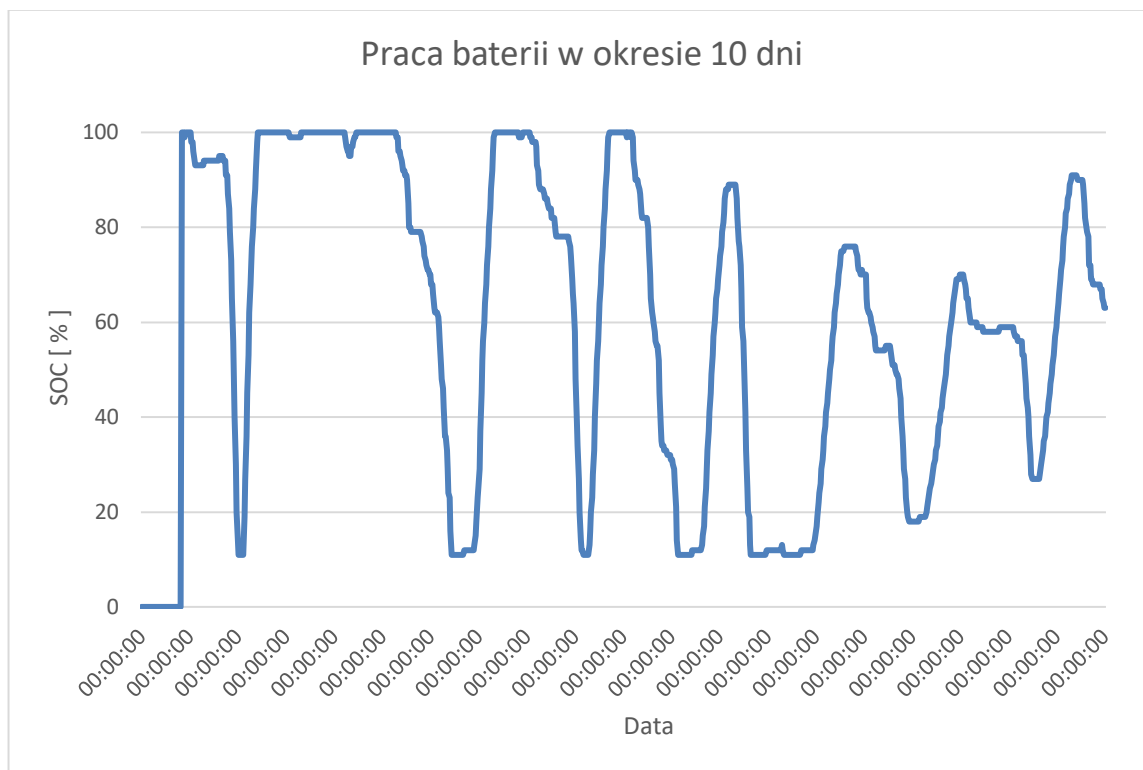
Rys. 25 Średnie obciążenie stacji (po realizacji)



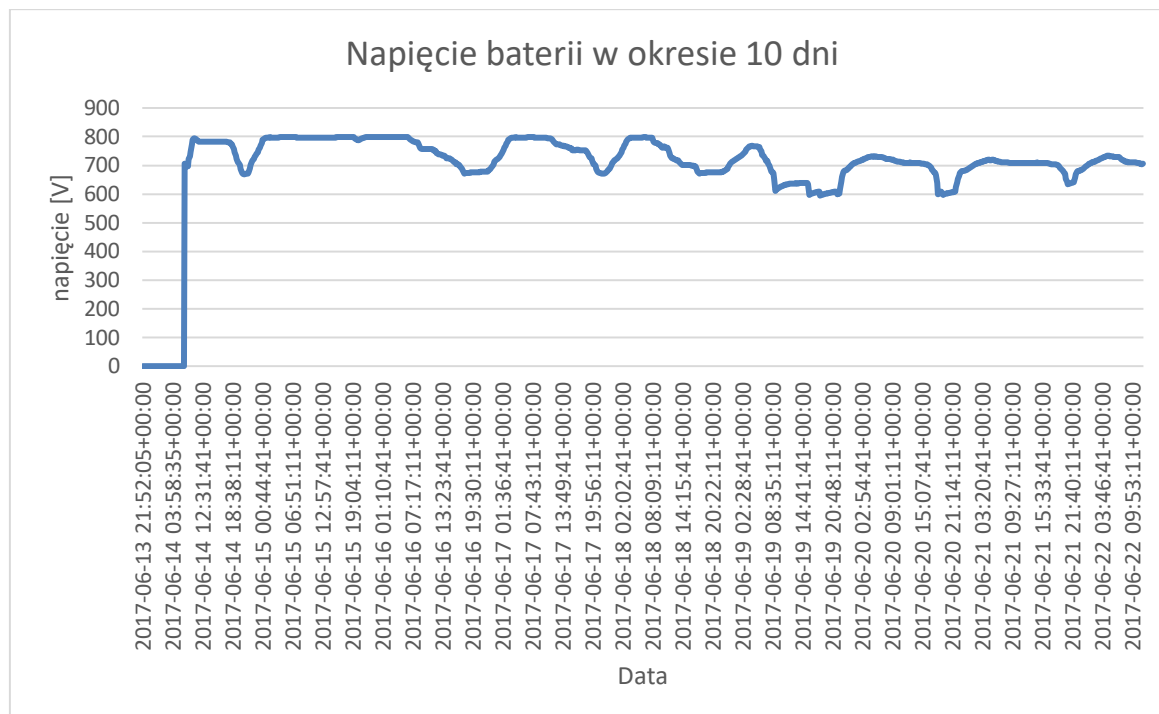
Rys. 26 Przebieg energii układu okresie 3 dni



Rys. 27 Przebieg stopnia naładowania układu w okresie 3 dni



Rys. 28 Przebieg naładowania układu w okresie 10 dni



Rys. 29 Przebieg napięcia na baterii w okresie 10 dni

### Spostrzeżenia:

Porównując przedstawione powyżej przebiegi zauważalne jest zmniejszenie mocy maksymalnej stacji SN/nN oraz krótkotrwałe wypłaszczenie przebiegu (szczególnie w dolinie nocnej). Warte uwagi jest to, że moc magazynu jest stosunkowo niewielka w odniesieniu do mocy stacji, stąd niemożliwe jest całkowite wywłaszczenie przebiegu.

W stosunku do pierwotnych założeń projektu ograniczono zakres pracy baterii z (1.5 - 30.875)kWh do (7.5 - 30.875)kWh, gdyż układ wyłączał się przy próbach większego rozładowania. Przy głębokim rozładowaniu prąd zadany zmieniał się w sposób skokowy. Falownik reagował na te zmiany, ale prowadzi to do pływania prądu baterii.



## Załącznik B

### **Konstrukcja kompletnej stacji SN/nN z zasobnikiem energii wdrożonej w sieci SO zrealizowana przez Stoen Operator w ramach projektu POIS.01.04.01-00-003/18**

Kierownik projektu: *mgr inż. Łukasz Sosnowski*

Cel badania: *Badanie technicznych możliwości wyrównania profilu obciążenia stacji przy użyciu stacjonarnego i mobilnego zasobnika energii (V2G)*

Termin realizacji: *2019-2022*

Kamienie milowe:

- *Opracowanie i wdrożenie układu magazynu energii w nowej stacji SN/nN*
- *Opracowanie i wdrożenie układu V2G*
- *Opracowanie i wdrożenie koncepcji podtrzymania klientów zasilanych z miejskiej stacji SN/nN*
- *Testy algorytmu samouczenia i pracy wyspowej*

Uzyskane efekty:

- *Opracowanie i wdrożenie technologii V2G w warszawskiej sieci elektroenergetycznej*
- *Przeprowadzenie pomiarów jakościowych wpływu zasobnika na sieć zasilającą*
- *Wyznaczenie obszarów pracy zasobnika na bazie krzywej obciążenia stacji oraz ich modyfikacja*
- *9 dniowy okres obserwacji krzywej obciążenia stacji w podziale na weekend/tydzień roboczy jest wystarczający do minimalizacji anomalii*
- *Zebranie doświadczeń eksploatacyjnych*

Obszary do dalszych analiz

- *Zbyt mała pojemność zasobnika aby mógł znacznie wpływać / całkowicie zastąpić sieć zasilającą SN*
- *Algorytm zarządzania pracą stacji musi pozwalać na samodzielne przełączenia wyspa/sieć*
- *Dobór elementów sterujących i wykonawczych musi być dostosowany do charakteru pracy sieci elektroenergetycznej i miejsca zabudowy zasobnika*

SPS to inteligentna stacja transformatorowa z magazynem energii, przyłączami do źródeł OZE oraz ładowarką pojazdów elektrycznych. Rozwiązanie integrujące funkcje zdalnie zarządzanej, rozdzielczo-dystrybucyjnej stacji transformatorowej, pracującej w systemie Smart Grid z dwukierunkowym inwerterem (ładowanie / oddawanie energii) współpracującym z magazynem energii, jednocześnie zapewniając możliwość ładowania samochodów elektrycznych,. Uzupełnieniem systemu jest możliwość zasilania magazynu energii lub odbiorców bezpośrednio z odnawialnych źródeł energii elektrycznej np. PV. SPS jest stacją w pełni skalowalną. Oznacza to, że odpowiadamy na każde zapytanie naszych klientów, starając się stworzyć obiekt w pełni zoptymalizowany i dostosowany do konkretnych potrzeb użytkownika. Cechą wspólną stacji SPS jest magazyn energii.

Wyposażenie:

- Obudowa betonowa;
- Transformator SN/nN;
- Rozdzielnica SN typu TPM;
- Rozdzielnicę nN typu RN-W;
- Inwerter dwukierunkowy do obsługi magazynu energii 70kW;
- Bateria Li-ion 62,3kWh;
- Szafa sterownicza;
- Ładowarka do samochodów elektrycznych V2G ;
- Instalacja PV 1,6kWp.



## **Obudowa**

Stacja jest modułową prefabrykowaną konstrukcją składającą się z elementów z betonu zbrojonego i wibrowanego. bryła główna stacji wraz z komorą transformatora, klasa obudowy wg. opracowania lub

- standardowych rozwiązań producenta;
- dach betonowy płaski w kolorze według palety RAL;
- fundament betonowy prefabrykowany – kablownia;
- elewacja rodzaj i kolor tynku według palety firmy CERESIT;
- drzwi i kraty wentylacyjne-aluminiowe, malowane farbą proszkową według palety RAL;
- gabaryty zewnętrzne (dł. x szer. x wys.) 4960 x 53520 x 2910 [mm];
- obsługa urządzeń - wewnętrzna (z wewnętrznym korytarzem);
- wewnętrzna instalacja oświetleniowa, wewnętrzna instalacja uziemiająca.

## **Transformator**

W stacji przewiduje się montaż transformatora w wykonaniu fabrycznym bez dodatkowych elementów o mocy do 630 kVA. Transformator jest wstawiany przez drzwi lub dach i zabezpieczony przed przesuwaniem poprzez zablokowanie kół blokadami.

## **Rozdzielnica SN typu TPM**

Rozdzielnica pierścieniowa średniego napięcia do 25kV typu TPM, jest małą kompaktową rozdzielnicą, której podstawowym elementem jest zbiornik ze stali nierdzewnej wypełniony gazem SF<sub>6</sub>, w którym znajdują się elementy łączeniowe SN jak rozłącznik, odłącznik wyłącznik oraz uziemnik. Jest dedykowana do rozdziału energii w sieciach dystrybucji wtórnej. Szeroki wachlarz konfiguracji oraz dodatkowe wersje z możliwością rozbudowy zarówno z prawej jak i z lewej strony pozwala na zastosowanie w nawet najbardziej skomplikowanych układach sieci a wytrzymała konstrukcja oraz zaawansowany system blokad mechanicznych zapewnia najwyższy poziom bezpieczeństwa obsługi i niezawodność zasilania. Rozłączniki w polach liniowych zostały wyposażone w napędy silnikowe, umożliwiające zdalne manewrowanie aparatem. Ponadto Rozdzielnica wyposażona jest w aparaturę:

- rozłącznik wyposażony w układ do gaszenia łuku elektrycznego, co w połączeniu z bardzo szybkim mechanizmem zapewniającym migowe zamykanie rozłącznika, gwarantuje pewne i szybkie wyłączenie,
- pojemnościowe dzielniki napięcia,
- sygnalizator obecności napięcia na kablu,

- wskaźnik zadziałania wkładek bezpiecznikowych w polu transformatorowym,
- uziemnik szybki w polu liniowym,
- uziemnik szybki, który uziemia wkładkę bezpiecznikową z dwóch stron w polu transformatorowym.

### **Rozdzielnica nN typu RN-W dwusekcyjna**

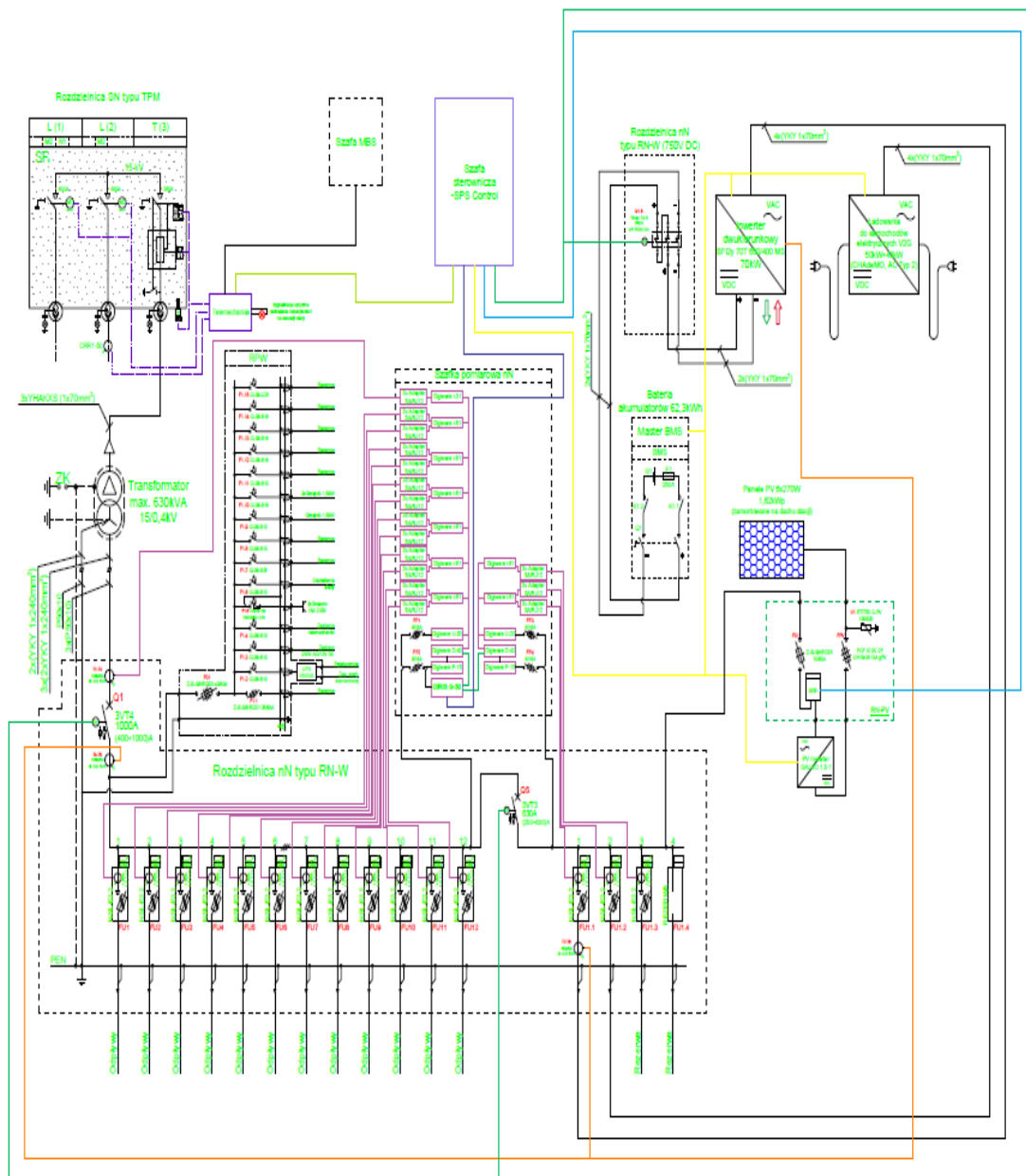
Rozdzielnice niskiego napięcia typu RN-W, przeznaczone do zasilania urządzeń elektrycznych nN. Mają one szerokie zastosowanie w stacjach transformatorowych miejskich, w zakładach przemysłowych, domach towarowych oraz innych obiektach. Obudowa rozdzielnicy składa się z elementów giętych z blachy alucynkowej nitowanych ze sobą, co zapewnia ekwipotencjalizację. Rozdzielnica konfigurowana jest z niezależnych członów (zasilającego, odpływowego, pomiarowego itp.) co pozwala w prosty sposób rozbudowywać istniejące i projektować nowe zestawy. W niniejszym projekcie zastosowano rozdzielnicę w wykonaniu dwusekcyjnym: Sekcja pierwsza dystrybucyjna i sekcja druga magazynowa.

#### **Wypozażenie sekcja magazynowa:**

- Rozłączniki bezpiecznikowe FU1.1÷FU1.4 wraz z blokami przekładnikowymi NSL;
- Wieloobwodowy pomiar parametrów sieci DIRIS Digiware;
- Przekładniki prądowe 250/5 A/A;
- Zasilacz i bateria akumulatorów 12V/55Ah;
- Tablice pomiarowe;
- Rozdzielnica potrzeb własnych RPW + aparatura modułowa;
- Rozdzielnica 750V DC z wyłącznikiem wyposażony w zabezpieczenie termomagnetyczne, wyzwalacze i napęd silnikowy.

Dodatkowo do sekcji magazynowej została podłączona instalacja PV, która jest zlokalizowana na dachu stacji. W układzie tym oprócz (zasobnika) baterii znajdować się musi urządzenie umożliwiające dwukierunkowy, w pełni kontrolowany przepływ energii. Przykładem tego typu urządzenia jest układ BFi2z umożliwiający kontrolę procesu ładowania i rozładowania baterii elektrochemicznej zgodnie z parametrami podanymi przez producenta baterii, Wymianę energii między siecią elektroenergetyczną a magazynem energii zgodnie z algorytmami umożliwiającymi poprawę stabilności sieci. Duży nacisk położono na zapewnienie odpowiednich parametrów elektrycznych energii przesyłanej oraz sterowanie zasobnikiem w oparciu o algorytm zarządzania energią lub przez operatora w sposób zdalny bądź lokalny w miejscu zainstalowania urządzenia. Układ baterii montowany w stelażu składa się z nowoczesnych i niezawodnych ogniw Li-Ion, będących jedną z najlepszych opcji

dostępnych na rynku. Poza niezawodnymi ogniwami baterie zawierają inne wytrzymałe komponenty, które z jednej strony gwarantują dobrą jakość produktu, a z drugiej zapewniają długą żywotność. Produkt przeznaczony jest do zastosowań wewnętrznych, wymagających magazynowania energii, na przykład na wypadek przerwania zasilania. Montowany na regale system jest układem modułowym i może być wykorzystywany do magazynowania energii w inteligentnych budynkach i inteligentnych sieciach dystrybucyjnych.



Rys. 31 Schemat jednokreskowy wszystkich obwodów w stacji

Bateria komunikuje się z zewnętrznymi urządzeniami za pośrednictwem protokołu Modbus i wyposażona jest we wszystkie niezbędne zabezpieczenia, które chronią baterię przed

szkodliwymi stanami takimi jak: przeciążenie, nadmierne rozładowanie i innymi, niebezpiecznymi zarówno dla użytkownika, jak i samej baterii.

**Tabela 34 Zestawienie parametrów technicznych układu magazynowania energii**

| Nazwa parametru                       | Wartość i Jednostka                    |
|---------------------------------------|----------------------------------------|
| Liczba modułów (szaf)                 | 1 szt                                  |
| Pojemność znamionowa przy 25°C        | 62,3,2 kWh                             |
| Napięcie maksymalne                   | 747 VDC                                |
| Napięcie znamionowe                   | 662 VDC                                |
| Napięcie minimalne                    | 486 VDC                                |
| Maksymalny prąd rozładowani przy 25°C | 230A                                   |
| Znamionowy prąd rozładowani           | 150A                                   |
| Maksymalny prąd ładowania przy 25°C   | 100A                                   |
| Żywotność                             | do 5000 cykli przy 80% DoD             |
| Temperatura pracy                     | 0C do +50°C                            |
| Temperatura pracy oczekiwana          | 0°C do +50°C                           |
| Budowa ogniwa                         | Struktura NMC (nikiel, mangan, kobalt) |
| Typ ogniw                             | Samsung SDI 94 Ah                      |

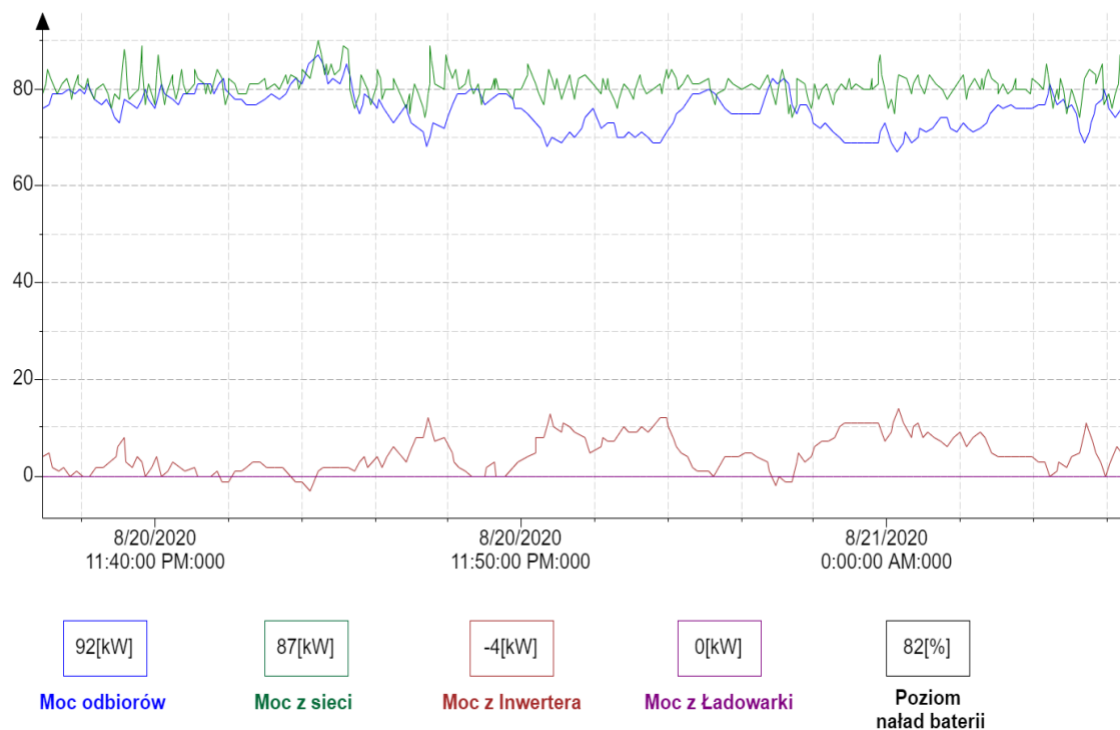
Wdrożeniowym, a zarazem innowacyjnym aspektem implementacji takiej stacji SN/nN w sieci dystrybucyjnej jest zastosowanie algorytmu pozwalającego na samodzielną decyzję urządzenia co do momentu pobierania energii z sieci i momentu jej oddawania do sieci na podstawie pomiaru prądu w sieci nN. Algorytm sterujący ma za zadanie adaptację do zmiennej w ciągu 9 dni krzywej obciążenia. Wstępnie zaproponowany algorytm będzie mieć możliwość późniejszej modyfikacji w celu dostosowania jego działania pod specyfikę pracy stacji po pewnym okresie eksploatacji.

Dodatkowo algorytm sterowania będzie realizować następujące funkcje:

- reakcja na zwarcie w sieci nN i SN – odłączenie układu od sieci i powrót po 60 sekundach do pracy;
- kompensacja wahań napięcia, regulacja napięcia, mocy biernej;
- możliwość pracy: sieć wydzielona (praca wyspowa) lub zabezpieczenie od pracy wyspowej;
- automatyczne wydzielenie wyspy i powrót.

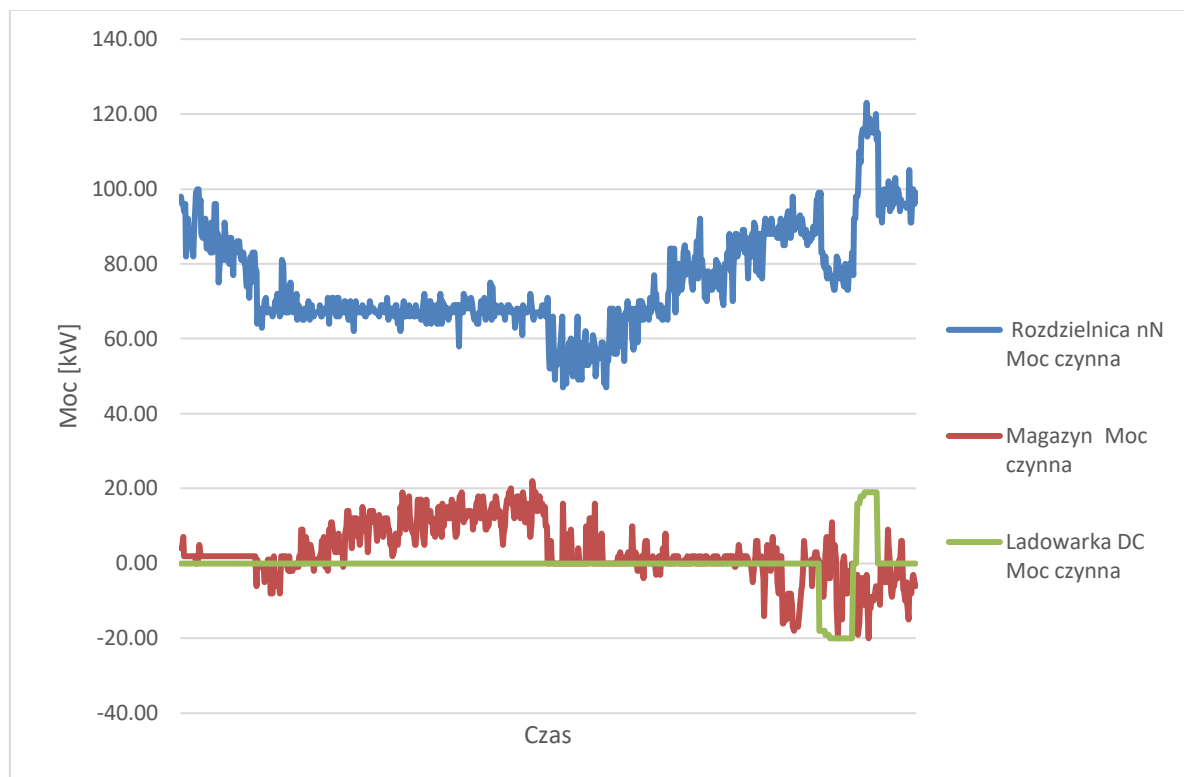
## Załącznik B1

### Wyniki pomiarów rozplywów energii

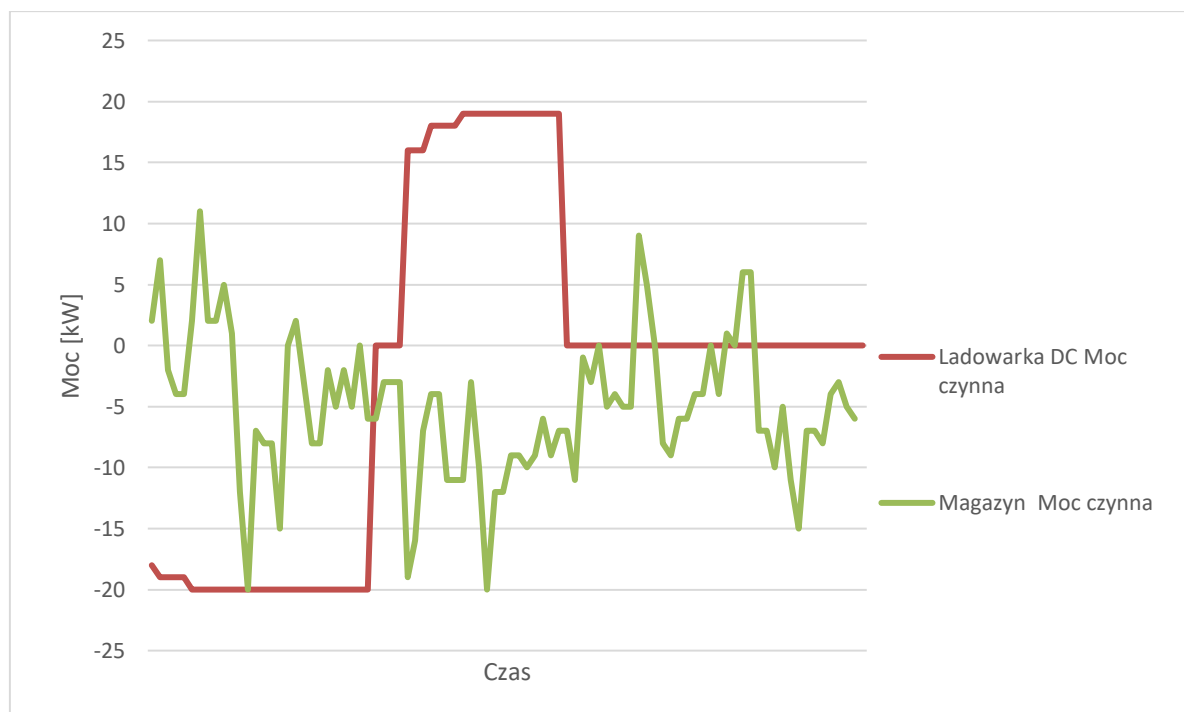


Rys. 32 Moc stacji SN/nN i układu magazynu





**Rys. 33 Moc stacji wraz z magazynem i ładowarką DC**



**Rys. 34 Moc stacji z magazynem energii i ładowarką DC**

Spostrzeżenia:

Przedstawione wyniki pomiarów oraz ich analiza potwierdzają, że stosowanie układów zasobnikowych przez OSD pozwala na poprawę warunków pracy sieci poprzez optymalizację wykorzystania urządzeń oraz redukcję dolin i szczytów obciążenia stacji SN/nN. Dzięki zastosowanemu algorytmowi i empirycznemu doborowi nastaw histerezy załączania i wyłączania układu udało się uzyskać obcięcie szczytu zapotrzebowania stacji na moc i utrzymywanie go w granicach 90-95kW (w stosunku do 115-120kW). Dołączenie układu mobilnego magazynu energii w postaci samochodu elektrycznego pozwala pozyskać dodatkowe 20-30kW mocy możliwe do wykorzystania.

Na bazie otrzymanych wyników widać, że takie połączenie mobilnych i stacjonarnych zasobników może przyczynić się do poprawy warunków napięciowych sieci a tym samym zapewnić właściwą (zgodną z przepisami) jakość dostarczanej energii. Mając na uwadze dynamiczny rozwój prosumenckich instalacji PV, a więc i ryzyka powstawania przekroczeń napięciowych w sieciach nN, można wnioskować, że zastosowanie zasobników przez OSD jest niezbędne.

Na bazie tego projektu i otrzymanych wyników widać także, że współpraca między SEE a samochodami elektrycznymi z funkcjonalnością zwrotu energii z pojazdu, może być oparta na synergii. Interwencyjne wykorzystanie takich pojazdów przez OSD może zapewnić poprawę stabilności pracy sieci a także tymczasowe ograniczenie konieczności rozbudowy sieci. Daje też gwarancję uniknięcia problemów sieciowych związanych z przeciążeniami ciągów liniowych.