



POLITECHNIKA ŚLĄSKA

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

Katedra Mechatroniki

mgr inż. Piotr Hylla

**HYBRYDOWE MAGAZYNY ENERGII –
ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZENIA UDZIAŁU
OZE W SUMARYCZNEJ PRODUKCJI ENERGII
ELEKTRYCZNEJ**

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem:
dr hab. inż. Tomasza Trawińskiego, prof. PŚ

Promotor pomocniczy:
dr hab. inż. Wojciech Burlikowski, prof. PŚ

Opiekun ze strony przedsiębiorstwa:
dr inż. Bartosz Polnik

GLIWICE, 2025

PODZIĘKOWANIA

Pragnę serdecznie podziękować mojemu promotorowi **dr hab. inż. Tomaszowi Trawińskiemu** za merytoryczne wsparcie, inspirujące wskazówki oraz życzliwość i zaangażowanie, które towarzyszyły mi nie tylko na etapie realizacji niniejszej rozprawy, ale również w całym toku kształcenia w Katedrze Mechatroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

Szczególne wyrazy wdzięczności kieruję do opiekuna ze strony partnera przemysłowego **dr inż. Bartosza Polnika** za zaangażowanie, praktyczne podejście oraz umożliwienie prowadzenia badań w warunkach rzeczywistych wykorzystując zasoby dostępne w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG.

Dziękuję również promotorowi pomocniczemu **dr hab. inż. Wojciechowi Burlikowskiemu** za nieocenioną pomoc, konstruktywne uwagi oraz wsparcie merytoryczne i organizacyjne w realizacji projektu.

Serdecznie dziękuję również **dr inż. Krzysztofowi Stankiewiczowi** za opiekę i wsparcie na początkowym etapie mojej pracy w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, a także umożliwienie mi uczestnictwa w projektach badawczych, warsztatach i konferencjach, które miały kluczowy wpływ na moją decyzję o realizacji doktoratu.

Słowa szczególnej wdzięczności kieruję do wszystkich **pracowników Katedry Mechatroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej**, którzy mi towarzyszyli na ścieżce kształcenia i rozwoju – od projektu inżynierskiego, przez pracę magisterską, aż po rozprawę doktorską. Ich życzliwość, profesjonalizm i otwartość stworzyły mi środowisko, w którym mogłem rozwijać się naukowo i zawodowo.

Wyrazy wdzięczności kieruję również do **Instytutu Techniki Górniczej KOMAG** w szczególności do **Zakładu Systemów Mechatronicznych oraz grupy tematycznej ds. napędu i sterowania** za stworzenie warunków do realizacji doktoratu wdrożeniowego oraz dostęp do zaplecza technicznego i wiedzy eksperckiej.

Dziękuję wszystkim osobom, z którymi miałem przyjemność współpracować, za pomoc, inspirujące rozmowy i pozytywną atmosferę.

Na koniec pragnę podziękować mojej rodzinie i bliskim za cierpliwość, zrozumienie i nieustające wsparcie, bez którego realizacja tej pracy nie byłaby możliwa.

Spis treści

Wykaz Oznaczeń	7
1. Wstęp.....	9
Teza pracy	9
Cel pracy	9
2. Przedstawienie problemu naukowego	9
2.1. Wprowadzenie	9
2.2. Przedstawienie ograniczeń w stosowanie odnawialnych źródeł energii.....	10
2.3. Przegląd technologii magazynowania energii	13
2.3.1. Metodologia	15
2.3.2. Hybrydyzacja magazynów energii.....	29
3. Bilans energetyczny rzeczywistych obiektów	37
3.1. Bilans energetyczny.....	37
3.2. Analiza pozyskanych danych pomiarowych	41
3.2.1. Dobór parametrów komponentów instalacji elektrycznej	41
3.2.2. Dobór parametrów instalacji PV	52
3.2.3. Dobór parametrów magazynów energii	56
3.2.4. Analiza otrzymanych wyników.....	60
4. Model symulacyjny hybrydowego magazynu energii.....	61
4.1. Implementacja komponentów instalacji w środowisku symulacyjnym	61
4.1.1. Panele fotowoltaiczne	61
Turbiny wiatrowe	67
4.1.2. Baterie litowe.....	69
4.1.3. Superkondensatory.....	72
4.2. Integracja poszczególnych elementów w ramach hybrydowego zasobnika energii	75
5. Prototyp rutera energii	81
5.1. Koncepcja rutera DC.....	81
5.1.1. Dobór konfiguracji rutera energii	81
5.1.2. Analiza algorytmów zarządzania przepływem energii.....	86
5.2. Opracowanie regulatora logiki rozmytej.....	92
5.3. Uruchomienie prototypu	95
6. Badania i testy funkcjonalne prototypu	96
7. Analiza możliwości zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej	113
8. Podsumowania i wnioski	115
8.1. Podsumowanie.....	115

8.2.	Wnioski.....	118
8.3.	Cele dalszych prac	119
9.	Bibliografia.....	121

Wykaz Oznaczeń

A	-	obszar aktywny diody, związany z konstrukcją ogniwa,
A_r	-	miesięczne zapotrzebowanie na energię elektryczną obiektu.
A_t	-	powierzchnią omiatania turbiny w m^2 ,
$Auto_{ESS}$	-	stopień autokonsumpcji uwzględniający dobowy magazyn energii,
$E_{PV,i}$	-	miesięczna produkcja energii z PV.
C	-	pojemność nieobciążonego akumulatora
C_{BOL}	-	pojemność nowej baterii
C_{EOL}	-	pojemność wyeksploatowanej baterii
C_{OTC}	-	pojemność w gałęzi RC
c_p	-	współczynnik efektywności
G_r	-	rzeczywiste natężenie promieniowania słonecznego,
G_{ref}	-	Referencyjna wartość promieniowania słonecznego,
G_{STC}	-	Natężenie promieniowania w warunkach standardowych testowych,
I_{pv}	-	prąd elektryczny w schemacie zastępczym ogniwa PV,
i_{batt}	-	prąd płynący przez ogniwo
I_d	-	prąd diody w modelu ogniwa fotowoltaicznego,
I_{ph}	-	źródło prądu fotowoltaicznego,
I_s	-	prąd nasycenia diody,
I_{sc}	-	prąd zwarcia ogniwa fotowoltaicznego,
I_{sh}	-	prąd bocznikowy,
S_{aut}	-	stopień niezależności uwzględniający dobowy magazyn,
k_B	-	stała Boltzmanna
K_i	-	współczynnik temperaturowy prądu zwarcia,
η	-	współczynnik idealności diody
q	-	ładunek elementarny
R_{OTC}	-	rezystancja w gałęzi RC
R_s	-	rezystancja szeregową,
R_{sh}	-	rezystancja bocznikowa ogniwa fotowoltaicznego,
End	-	miesięczny niedobór energii,
Enw	-	miesięczna nadwyżka energii
t	-	czas

T	-	temperatura nieobciążonego akumulatora
T_c	-	temperatura ogniwa [K]
u_{batt}	-	napięcie na zaciskach ogniwa
u_{OC}	-	napięcie obwodu otwartego
U_{OTC}	-	napięcie gałęzi RC
U_{pv}	-	napięcie na zaciskach ogniwa fotowoltaicznego,
V_a	-	potencjał w punkcie a,
V_b	-	potencjał w punkcie b,
U_t	-	napięcie termiczne ogniwa,
v_{wiatr}	-	prędkość wiatru w m/s.

1. Wstęp

Teza pracy

Dynamicznie zmieniając się sytuacja elektroenergetyczna na świecie, w Europie oraz w Polsce w ostatnich dwóch dekadach (szczególnie po 2010 roku) jest w dużej mierze wynikiem rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz intensywnej popularyzacji odnawialnych źródeł energii (OZE). Nie istnieje możliwość nieograniczonego zwiększania OZE w systemie elektroenergetycznym ze względu na ich okresowy i trudny do przewidzenia charakter. Infrastruktura elektroenergetyczna w Polsce nie jest obecnie przystosowana do efektywnego odbioru i zagospodarowania nadwyżek energii wytwarzanej z OZE. Z tego względu niezbędne jest opracowanie i wdrażanie rozwiązań eliminujących te bariery, w szczególności w odniesieniu do źródeł opartych na energii słonecznej oraz wiatrowej.

W związku z powyższym postawiona została teza:

„Zastosowanie systemów zarządzania przepływem energii wykorzystujących hybrydowe zasobniki energii zwiększy udział OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej. Wykorzystanie dodatkowej stałoprądowej instalacji stanowiącej tzw. ruter DC umożliwi bardziej efektywne bilansowanie energii pozyskanej z OZE i magazynów energii.”

Teza opiera się na założeniu, że obecnie zdecydowana większość komponentów związanych z odnawialnymi źródłami energii, magazynowaniem energii oraz odbiornikami wykorzystuje prąd stały – bezpośrednio lub pośrednio – zarówno do zasilania, jak i generacji oraz akumulacji energii. Wprowadzenie dodatkowej instalacji prądu stałego w obiekcie umożliwia efektywne zarządzanie przepływem energii pomiędzy poszczególnymi elementami systemu.

Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie, zbadanie oraz wdrożenie systemu do zarządzania przepływem energii pomiędzy zróżnicowanymi technologicznie zasobnikami energii, w formie tzw. rutera DC.

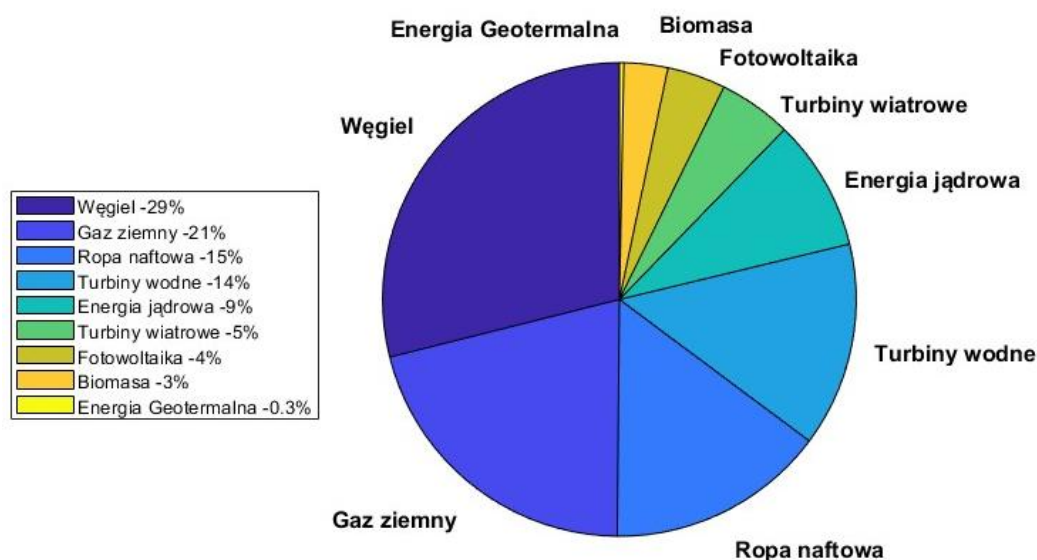
2. Przedstawienie problemu naukowego

2.1. Wprowadzenie

Wydarzenia z początku lat '20 XXI wieku takie jak wybuch pandemii Covid-19, rozwijająca się wojna na Ukrainie i Bliskim Wschodzie spowodowały zakłócenie lub wręcz przerwanie łańcuchów dostaw surowców energetycznych. Dodatkowo, rosnąca troska o środowisko naturalne, przejawiająca się odchodzeniem od paliw kopalnych, takich jak ropa naftowa, gaz ziemny czy węgiel, a także wzrost zainteresowania odnawialnymi źródłami energii, przyczyniają się do stopniowej dekarbonizacji sektora

energetycznego. Dynamicznie zmieniająca się sytuacja w Europie i na świecie skutkuje problemami w produkcji energii elektrycznej oraz zwiększa koszty zakupu tego medium. W związku z rosnącym udziałem odnawialnych źródeł energii, opartych na energii wiatru i promieniowania słonecznego, konieczna staje się reorganizacja dotychczasowego systemu elektroenergetycznego. Celem tych działań jest ograniczenie ryzyka wystąpienia tzw. blackoutu, czyli poważnej awarii systemu wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej. Większość światowej produkcji energii elektrycznej (około 65%) oparta jest na paliwach kopalnych, takich jak węgiel (29%), ropa naftowa (15%) oraz gaz ziemny (21%). Taki model wytwarzania energii wiąże się z nadmierną emisją gazów cieplarnianych oraz zależnością od zewnętrznych dostawców surowców energetycznych. Wykres udziału poszczególnych źródeł w światowej produkcji energii przedstawiono na Rys. 1.

Roczna światowa produkcja energii elektrycznej z podziałem na źródła



Rys. 1 Roczna światowa produkcja energii z podziałem na źródła [1]

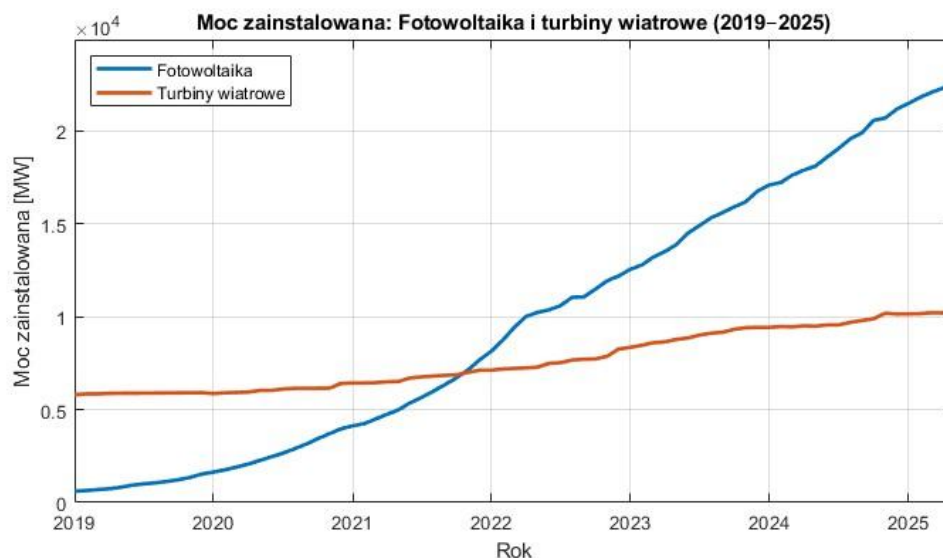
Rozwiązaniem problemów związanych z produkcją energii może być stopniowe zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii w sumarycznej produkcji energii przy równoczesnym stopniowym ograniczaniu udziału elektrowni konwencjonalnych [2]. Ze względu na niestabilny i okresowy charakter pracy najpopularniejszych odnawialnych w Polsce źródeł energii czyli fotowoltaiki oraz turbin wiatrowych konieczne jest zastosowanie dodatkowych elementów magazynujących energię oraz mechanizmów umożliwiających predykcję produkcji energii elektrycznej.

2.2. Przedstawienie ograniczeń w stosowanie odnawialnych źródeł energii

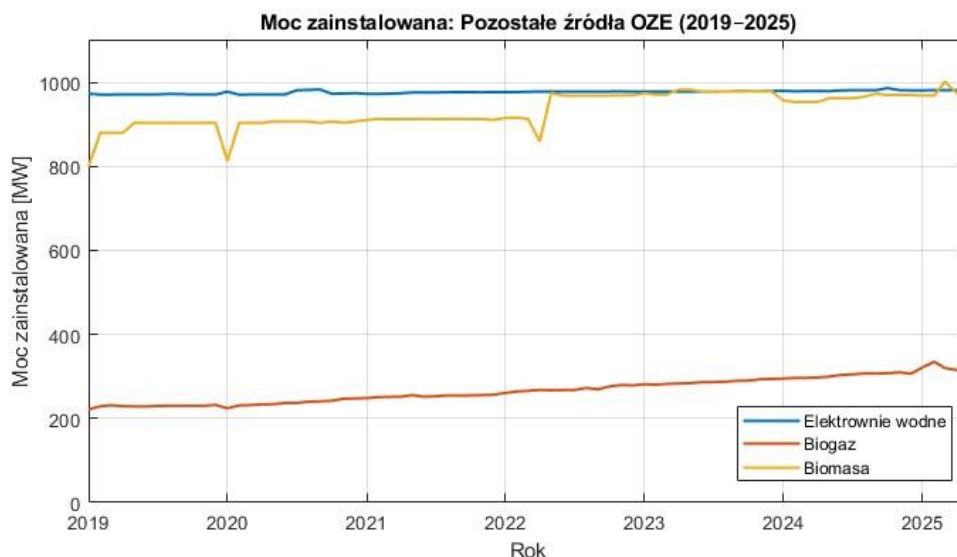
W ostatnich latach w Polsce widoczne jest coraz większe zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE), szczególnie w postaci prosumenckich instalacji fotowoltaicznych opartych na

wykorzystaniu energii słonecznej. Obecnie w naszym kraju można wyróżnić następujące rodzaje OZE według Agencji Rynku Energii (ARE) [3]:

- fotowoltaika,
- turbiny wiatrowe,
- elektrownie wodne,
- elektrownie biogazowe,
- elektrownie biomasowe.



Rys. 2 Moc zainstalowanych najpopularniejszych źródeł OZE w Polsce w latach 2019-2025[4]



Rys. 3 Moc zainstalowanych pozostałych źródeł OZE w Polsce według [4] w latach 2019-2025

Z przedstawionych na Rys. 2 oraz Rys. 3 danych można zauważyć, że największą popularnością cieszą się instalacje fotowoltaiczne ok. 23GW (Maj 2025) mocy zainstalowanej oraz turbiny wiatrowe ok. 10 GW (Maj 2025) mocy zainstalowanej[4]. Pozostałe źródła OZE charakteryzują się dużo mniejszą

ilością mocy zainstalowanej oraz niewielką dynamiką wzrostu ich ilości. Generatory energii elektrycznej wykorzystujące energię słoneczną i prędkość wiatru są silnie uzależnione od warunków atmosferycznych, co powoduje niestabilność oraz nieprzewidywalność pracy tych systemów.

Ograniczenia po stronie sieci dystrybucyjnej

Ograniczenia w produkcji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii takich jak m.in. turbiny wiatrowe, a przede wszystkim fotowoltaiki można podzielić na rynkowe i nierynkowe. Wynikają one w głównej mierze z regulacji krajowych lub regionalnych będących odpowiedzią na nieprzewidziane obciążenia sieci oraz stany destabilizacji jej pracy. W głównej mierze problemy z działaniem OZE wynikają z produkcji nadwyżek energii elektrycznych dużo wyższych niż zapotrzebowanie w KSE (Krajowym Systemie Elektroenergetycznym). W takiej sytuacji dyspozytorzy KSE powinni w sposób priorytetowy traktować energię wyprodukowaną z OZE. Jednak w rzeczywistości ze względu na ograniczone możliwości sterowania pracą konwencjonalnych elektrowni, przykładowo starsze bloki węglowe są w stanie ograniczyć produkcję maksymalnie do połowy wartości dla jakiej zostały zaprojektowane [5], jest to zadanie wysoce trudne w realizacji. W celu zapewnienia wystarczającego poziomu ujemnej mocy rezerwowej czyli możliwości ograniczenia wytwarzania energii elektrycznej, PSE (Polskie Sieci Elektroenergetyczne) redukują produkcję energii z wiatrowych źródeł energii w celu zbilansowania systemu elektroenergetycznego. W wyniku tych działań niewykorzystany zostaje potencjał zainstalowanych OZE, co też uniemożliwia ograniczenie emisję CO₂ związanego z produkcją energii elektrycznej w konwencjonalnych elektrowniach.

Ograniczenia po stronie prosumentów

Ograniczenia w produkcji energii elektrycznej mogą dotyczyć również indywidualnych posiadaczy instalacji fotowoltaicznych zabudowanych np. na dachach budynków mieszkalnych lub gospodarczych. Moc takich instalacji ograniczona jest zazwyczaj do powierzchni na której zabudowanej są ogniwa fotowoltaiczne np. powierzchnia dachów, wiat. Kolejnym ograniczeniem jest moc zainstalowanej instalacji fotowoltaicznej, co wynika z przepisów obowiązujących do 31 marca 2022 [6]. Wspomniane ograniczenie wynikało ze sposobu rozliczania czyli tzw. netmetering polegającym na możliwości oddawania nadwyżek energii z instalacji fotowoltaicznej do sieci oraz nieodpłatne pobieranie energii z sieci w okresie zmniejszonej lub zerowej produkcji energii z OZE w stosunku 0,8 mocy pobranej do mocy zwróconej do sieci w przypadku instalacji PV do 10kW oraz w stosunku 0,7 mocy pobranej do mocy zwróconej w przypadku instalacji powyżej 10kWp. W tym sposobie rozliczania nadwyżek energii sieć elektroenergetyczna pełni funkcję magazynu energii o sprawności 80% w przypadku instalacji do 10kWp oraz 70% w przypadku instalacji powyżej 10kWp. Od 1 kwietnia 2022 roku wprowadzono nowy sposób rozliczania nadwyżek z instalacji PV polegający na tzw. Net-billingu. Właściciel w dalszym ciągu może oddawać nadwyżki wyprodukowanej energii do sieci, jednak na zasadzie jej odsprzedaży po średniej miesięcznej cenie rynkowej. Pobieranie energii elektrycznej z sieci

jest traktowane jako zakup energii po cenie rynkowej wraz z dodatkowymi opłatami m.in. dystrybucyjną, podatkiem. Od 1 lipca 2024 planowana jest kolejna zmiana zasad rozliczania nadwyżek energii [7]. Podobnie jak dotychczas całość oparta będzie na net-bilingu, jednak cena sprzedaży nadwyżek energii do sieci będzie oparta na godzinowych cenach energii. Wysokość godzinowych cen wynika w głównej mierze z zapotrzebowania sieci na energię elektryczną, im mniejsze zapotrzebowanie na energię elektryczną tym cena niższa. W przypadku korzystnych warunków produkcji energii z OZE, przy równoczesnym ograniczonym zapotrzebowaniu na energię np. w dni wolne od pracy może wystąpić sytuacja ujemnych cen energii. W przypadku obecnych metod rozliczania energii niekorzystnym jest oddawanie nadwyżek do sieci, natomiast zachęca się do instalacji dodatkowych magazynów energii.

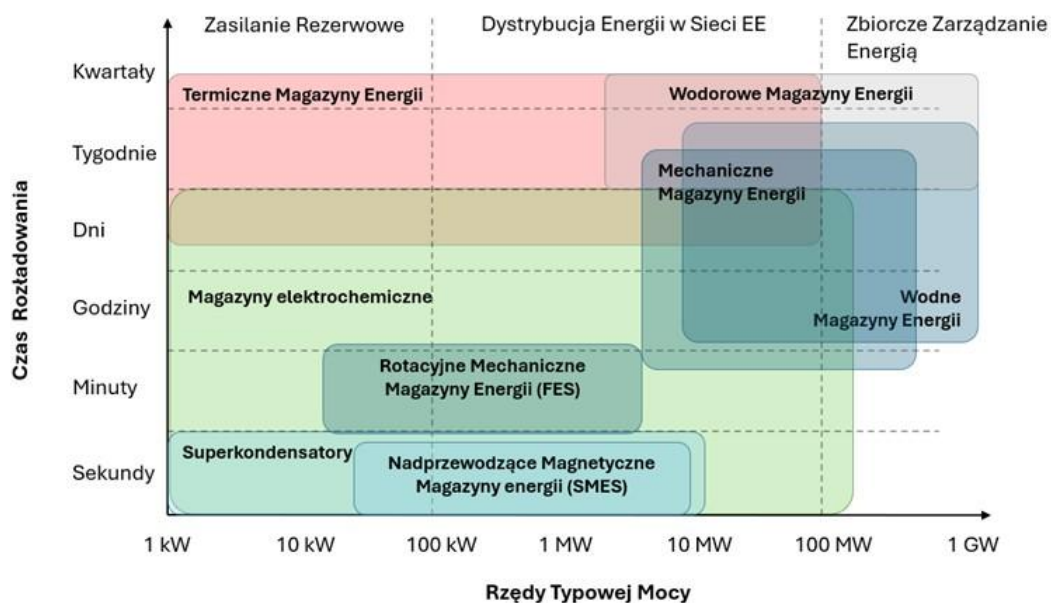
2.3. Przegląd technologii magazynowania energii

Aktualnie coraz więcej sektorów gospodarki zamienia dotychczasowe rozwiązania oparte na energii z konwencjonalnych źródeł takich jak (węgiel, gaz ziemny czy ropa naftowa) na nowoczesne urządzenia zasilane energią elektryczną [8]. Najlepszymi przykładami takich branż są m.in. automotive przechodzący transformację z napędu spalinowego na napęd elektryczny lub sektor budowlany wykorzystujący coraz częściej wysokowydajne źródła energii w postaci pomp ciepła zastępując tym samym konwencjonalne kotły na paliwo stałe (węgiel, gaz, olej opałowy) [9]. Takie działania skutkują coraz większym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, wytwarzaną w dużej mierze w elektrowniach zasilanych paliwem stałym, co zwiększa emisję CO₂ do atmosfery. W celu redukcji negatywnych skutków produkcji energii stosuje się odnawialne źródła energii w postaci np. paneli fotowoltaicznych lub turbin wiatrowych. Jak już wspomniano, te rodzaje odnawialnych źródeł energii charakteryzują się niestabilnym oraz nieprzewidywalnym działaniem. Z tego powodu obecnie nie ma możliwości stosowania OZE jako podstawowego źródła energii elektrycznej. Przykładowo coraz większa ilość prosumenckich instalacji fotowoltaicznych negatywnie wpływa na parametry sieci elektroenergetycznej poprzez podwyższanie napięcia sieci. Celowym więc staje się opracowywanie mechanizmów umożliwiających bilansowanie energii z OZE na jak najmniejszym obszarze [10]. Rozwiązaniem tego problemu mogą być magazyny energii zwane również zasobnikami energii. Stosowanie magazynów energii połączonych z siecią niskiego napięcia umożliwia dodatkowo:

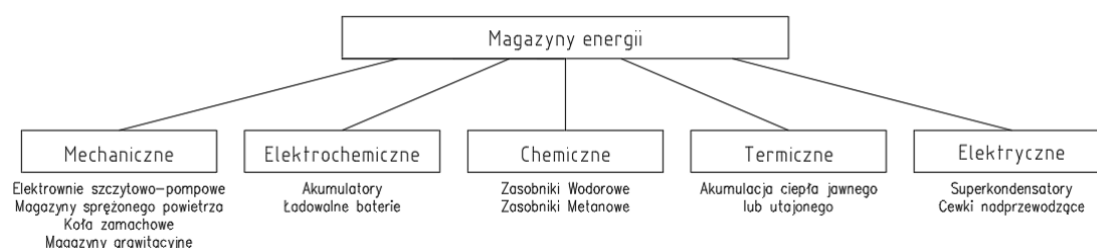
- tworzenie mikrosieci zapewniających bilansowanie energetyczne poszczególnych źródeł i odbiorców energii, umożliwiając tym samym uzyskanie całkowitej lub częściowej niezależności energetycznej [1].
- gwarancję dostaw energii dla odbiorców/budynków wymagających nieprzerwanego dostępu do energii elektrycznej np. szpitale, chłodnie, laboratoria, serwerownie itd. [1].

- możliwość obciążania sieci mocą większą niż moc przyłączeniowa bez zagrożenia przeciążenia lub awarii sieci. Przykładowym zastosowaniem mogą być punkty szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych przyłączone do sieci niskiego napięcia[12].
- udział w całkowitym przywróceniu dostaw energii elektrycznej po rozległej awarii tzw. Black Start [1].
- wykorzystanie różnic cenowych energii w danych godzinach poprzez ładowanie zasobnika w ekonomicznie korzystnym okresie oraz rozładowanie w momencie zwiększonych cen energii [1].
- poprawa jakości parametrów sieci poprzez regulację częstotliwości, napięcia i kompensacji mocy biernej [13].

Pierwsze badania nad ogniwami umożliwiającymi gromadzenie energii sięgają początków XIX w., natomiast pierwszy zasobnik energii w postaci elektrowni szczytowo-pompowej uruchomiono w 1907 roku w Szwajcarii, w okolicach Lugano. Był to pierwszy znany przypadek zastosowania systemu magazynowania energii przez pompowanie wody do zbiornika położonego wyżej, z zamiarem odzysku energii w czasie szczytowego zapotrzebowania. Dynamiczny rozwój zasobników energii można zaobserwować na końcu XX w. ze względu na rosnące zapotrzebowanie związane z popularyzacją elektromobilności oraz rozwojem mobilnych urządzeń elektronicznych np. telefony komórkowe lub laptopy. Obecnie istnieje wiele różnych technologii umożliwiających magazynowanie energii pod względem właściwości i stosowanego medium magazynującego energię (Rys. 4). Podstawowy podział przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 4 Podział technologii magazynowania ze względu na ich właściwości [14]



Rys. 5 Podział zasobników energii ze względu na wykorzystywaną technologię

2.3.1. Metodologia

W trakcie prowadzonych badań obecnego stanu wiedzy szeroko zbadano zagadnienia związane z zastosowaniem hybrydowych magazynów energii w systemach z odnawialnymi źródłami energii. Jako hybrydowe magazyny energii (HESS) skwalifikowano wszystkie rozwiązania zasobników energii integrujące w swojej budowie co najmniej 2 zróżnicowane technologicznie magazyny energii np. baterie litowe oraz magazyn wodorowy. Podczas opracowania metodologii przeglądu literaturowego wyznaczono trzy podstawowe etapy realizacji zadania obejmujące: analizę globalnego, europejskiego i krajowego rynku energetycznego w zakresie produkcji i zużycia energii, technologie magazynowania energii elektrycznej oraz hybrydowe systemy magazynowania energii. Określono kluczowe obszary badawcze wraz ze źródłami informacji i słowami kluczowymi wykorzystanymi do wyszukiwania informacji. Badania aktualnego stanu wiedzy przeprowadzono na podstawie źródeł technicznych oraz naukowych takich jak: Google Scholar, IEEE Explorer, Scopus, Science Direct, Springer, ResearchGate, Web of Science itp. Informacje wyszukiwane były za pomocą następujących słów kluczowych: systemy magazynowania energii (ESS), hybrydowe systemy magazynowania energii (HESS), mikro sieci, kondycjonery, odnawialne źródła energii (OZE), fotowoltaika (PV), bateryjne magazyny energii (BESS), kinetyczne magazyny energii (FESS) itd. Tabela 1 przedstawia liczbę odpowiedzi na poszczególne słowa kluczowe w poszczególnych źródłach technicznych w okresie ostatnich 5 lat

Tabela 1 Ilość odpowiedzi z podziałem na poszczególne słowa kluczowe i źródła techniczne.

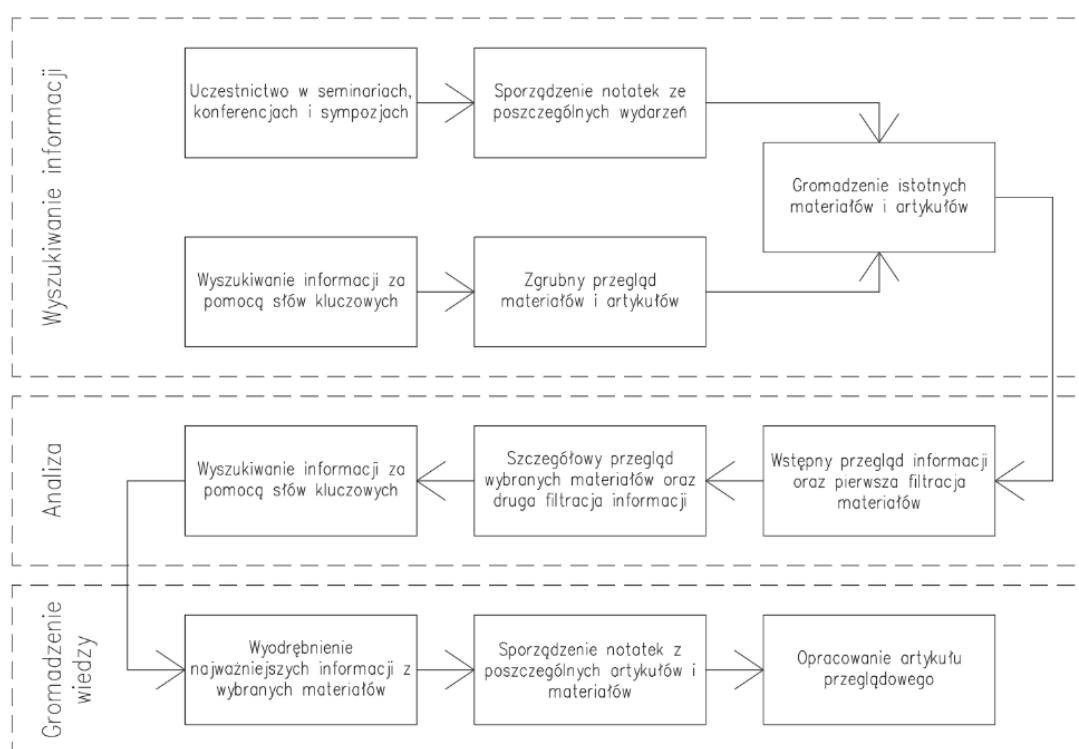
Słowa kluczowe	Źródło techniczne				
	IEEE Explorer	Web of Science	Google Scholar	Scopus	Science Direct
Energy storage system	26 661	79 721	5 570 000	26 603	383 027
Hybrid energy storage system	8 342	12 032	2 730 000	12 818	12 032
Microgrids	16 445	12 335	178 000	19 270	12 364

Renewable energy sources	27 023	43 177	469 000	53 897	183 779
Battery energy storage system	11 525	25 847	477 000	28 992	89 298

W niniejszej pracy przeanalizowano źródła literaturowe pod kątem:

- zapoznania się z istniejącymi artykułami przeglądowymi oraz głównymi zakresami artykułów badawczych.
- analizy światowej, europejskiej oraz krajowej produkcji i zapotrzebowania na energię elektryczną,
- klasyfikacji i charakterystyki technologii magazynowania energii elektrycznej oraz układów hybrydyzacji zasobników energii,
- kategoryzacji tematów poruszanych w istniejących artykułach,
- określeniu ograniczeń istniejących technologii sygnalizowanych w publikacjach naukowych i branżowych.

Przeprowadzoną analizę obecnego stanu wiedzy podzielić można na 3 główne części: wyszukiwanie informacji, analiza materiałów oraz gromadzenie wiedzy z badanego obszaru.



Rys. 6 Schemat blokowy metodologii postępowania przy prowadzeniu przeglądu literaturowego

Schemat blokowy przeprowadzonego przeglądu obecnego stanu wiedzy przedstawiono na Rys. 6.

I. Wyszukiwanie informacji

Celem tego etapu jest pozyskanie informacji na temat zbadanego obszaru hybrydowych magazynów energii poprzez wyszukiwanie artykułów z baz naukowych za pomocą słów kluczowych oraz uczestnictwo w konferencjach, konwersatoriach, seminariach i sympozjach..

II. Analiza

W tym etapie przeprowadzono wstępny przegląd materiałów i informacji w celu wybrania treści bezpośrednio związanych z badanym obszarem nauki. Część prac została odrzucona ze względu na brak lub niewielki związek treści z obszarem badań hybrydowych magazynów energii. Następnie przeprowadzono szczegółowy przegląd wybranych materiałów oraz ich weryfikacja pod względem zawartych treści. W tym etapie odrzucono materiały o zbieżnych treściach oraz o niskiej wartości naukowej. Ostatnią czynnością tego etapu jest klasyfikacja pozostałych informacji. Materiały naukowe podzielono na 3 główne grupy: informacje dotyczące konsumpcji i produkcji energii, technologie magazynowania energii oraz hybrydowe układy magazynowania energii.

III. Gromadzenie wiedzy

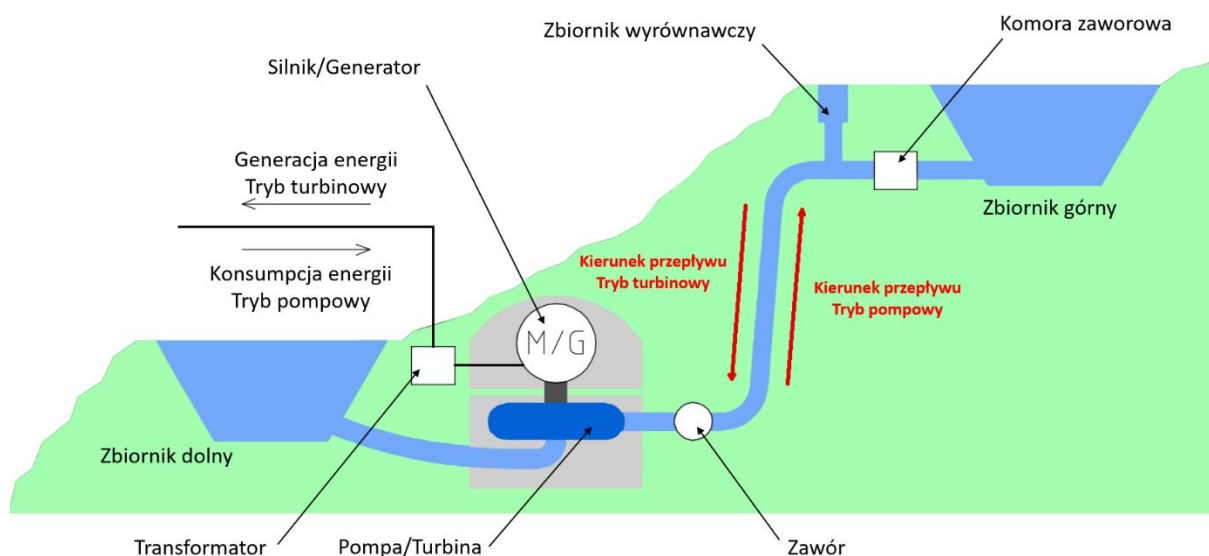
Po przeprowadzonej analizie kolejnym etapem jest gromadzenie wiedzy na temat hybrydowych magazynów energii. Z pozostały po weryfikacji treści wyodrębniono najważniejsze informacje, które następnie zostały zapisane w formie krótkich notatek zawierających streszczenie oraz najważniejsze informacje. Ostatnim elementem przeprowadzonej analizy obecnego stanu wiedzy jest opracowanie artykułu przeglądowego podsumowujące badania.

Elektrownie Szczytowo-pompowe

Elektrownie szczytowo-pompowe jest to jedna z metod magazynowania energii wykorzystująca wodę jako medium gromadzenia energii. Technologia jest szeroko stosowana, a pierwsza tego typu instalacja uruchomiona została w roku 1907 w okolicy miejscowości Schaffhausen w Szwajcarii [18],[19]. Zasada działania elektrowni szczytowo-pompowych polega na przekształceniu energii elektrycznej na energię mechaniczną w postaci energii potencjalnej wody, umożliwiając gromadzenie i zarządzanie energią. Podstawowe elementy składowe oraz zasada działania przedstawiona została na Rys. 7 [20].

Elektrownie szczytowo-pompowe zazwyczaj składają się z dwóch zbiorników górnego oraz dolnego. W momencie niskiego obciążenia sieci woda z dolnego zbiornika przepompowywana zostaje do górnego zbiornika. Natomiast w przypadku zwiększonego poboru energii elektrycznej woda z górnego zbiornika zostaje uwolniona i przepływając przez generator doprowadzona do dolnego zbiornika w celu wytworzenia energii elektrycznej. Elektrownia szczytowo-pompowa umożliwia więc przekształcenie nadwyżek energii w sieci powstających na skutek obniżonego poboru energii na energię potencjalną wody, która zostaje z powrotem przekształcona na energię elektryczną w momencie szczytowego

obciążenia sieci elektroenergetycznej. Dodatkowo obiekty tego typu stosowane są do modulacji częstotliwości, modulacji fazy oraz stabilizacji napięcia w systemach elektroenergetycznych [21].



Rys. 7 Zasada działania Elektrowni szczytowo-pompowych [21]

Energię elektryczną zmagazynowaną w zasobnikach szczytowo-pompowych można obliczyć za pomocą wzoru (1).

$$E_{el} = \eta E_p = \eta \rho V g h \quad (1)$$

Gdzie η – sprawność ogólna, E_p [kWh] – energia potencjalna wody zmagazynowanej w układzie wyrażonej wzorem (2)

$$E_p = m g h = \rho V g h \quad (2)$$

Gdzie m [kg] – masa zgromadzonej wody w zbiorniku górnym, ρ [kg/m³] – gęstość zmagazynowanej cieczy, V [m³] – objętość wody w zbiorniku górnym, g [m/s²] – przyspieszenie ziemskie, h [m] – różnica wysokości pomiędzy powierzchniami wody w obu zbiornikach.

Elektrownie szczytowo-pompowe są od kilkudziesięciu lat najpowszechniejszą metodą magazynowania energii bo aż 95 % zasobów o mocy 184GW. Obecnie szacuje się, że w przyszłości technologia ta nadal będzie rozwijana i powszednie stosowana [22]. W przedstawiono 10 największych elektrowni szczytowo-pompowych na świecie, natomiast w Tabela 3 przedstawiono 5 największych elektrowni szczytowo-pompowych działających obecnie w Polsce.

Tabela 2 Największe elektrownie szczytowo-pompowe na świecie

Lp.	Nazwa obiektu	Kraj	Max. moc generacji
1	Fengning Pumped Storage Power Station [23]	Chiny	3 600MW
2	Bath County Pumped Storage Station [24]	USA	3 003MW
3	Huizhou Pumped Storage Power Station [25]	Chiny	2 448MW
4	Guangdong Pumped Storage Power Station [26]	Chiny	2 400MW
5	Meizhou Pumped Storage Power Station [27]	Chiny	2 400MW
6	Changlongshan Pumped Storage Power Station [28]	Chiny	2 100MW
7	Okutataragi Pumped Storage Power Station [29]	Japonia	1 932MW
8	Ludington Pumped Storage Power Plant [30]	USA	1 872MW
9	Tianhuangping Pumped Storage Power Station [31]	Chiny	1 836MW
10	Tumut-3 [32]	Australia	1 800MW

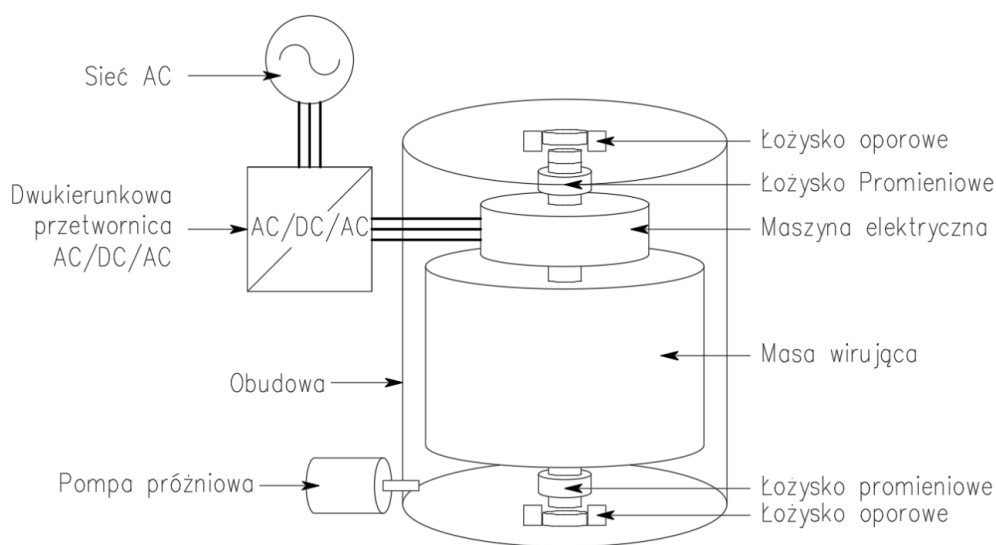
Tabela 3 Największe elektrownie szczytowo-pompowe w Polsce

Lp.	Nazwa obiektu	Max. moc generacji	Pojemność magazynu	Źródło
1	Elektrownia Żarnowiec	716-800MW	3,6GWh	[33]
2	Elektrownia Porąbka-Żar	500-540MW	2GWh	[34]
3	Zespół Elektrowni Wodnych Solina-Myczkowce	199MW	1,3GWh	[35]
4	Elektrownia Żydowo	167MW	0,7GWh	[36]
5	Elektrownia Czorsztyn-Niedzica-Sromowce Wyżne	94,6MW	1GWh	[35]

Kinetyczne Magazyny Energii

Inną technologią gromadzenia energii są kinetyczne magazyny energii (FESS – ang. Flywheel Storage System). FESS wykorzystuje energię kinetyczną obracającego się obiektu (np. koła zamachowego) do magazynowania energii. Jednym z pierwszych zastosowań kół zamachowych są koła garncarskie wykorzystujące ten efekt do utrzymywania energii pod własną bezwładnością. Z czasem koła zamachowe znalazły zastosowanie w prostych konstrukcjach takich jak koła wodne, młynki ręczne oraz

inne obiekty obsługiwane przez ludzi lub zwierzęta [37]. Określenie koła zamachowe pierwszy raz zastosowane zostało około roku 1784 [39]. Na początku rewolucji przemysłowej koła zamachowe stosowane były w łodziach i pociągach z silnikami parowymi oraz jako akumulatory energii w fabrykach [38]. Wraz z rozwojem techniki w XX w. koła zamachowe są rozwijane oraz udoskonalane dzięki czemu znajdują w latach 50 XX w. zastosowanie w transporcie (żyrobusy)[40], a w następnych latach w pojazdach elektrycznych, systemach zasilania awaryjnego oraz misjach kosmicznych [41]. W magazynach energii z kołami zamachowymi następuje zamiana energii elektrycznej na mechaniczną energię kinetyczną zgromadzoną w ruchu obrotowym masy wirującej [42]. Uproszczony schemat działania oraz podstawowe komponenty kinetycznego magazynu energii przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8 Schemat blokowy kinetycznego magazynu energii

Nadwyżka energii elektrycznej dostarczona zostaje poprzez dwukierunkową przetwornicę AC/DC/AC do maszyny elektrycznej pracującej w trybie pracy silnikowej. Silnik przekształca energię elektryczną w mechaniczną energię kinetyczną. Przez współosiowe połączenie silnika z masą wirującą sterowanie kołem zamachowym odbywa się bezpośrednio poprzez sterowanie maszyną elektryczną. W trakcie zasilania magazynu energii masa wirująca zostaje rozpędzona do prędkości nominalnej zasobnika energii. W przypadku rozładowania maszyna elektryczna pracuje w trybie generatora umożliwiając przekształcenie zgromadzonej mechanicznej energii kinetycznej obracającego się koła zamachowego w energię elektryczną. Rozładowanie FESS powoduje hamowanie koła zamachowego. W celu ograniczenia samorozładowania czyli procesowi strat energii w trakcie stanu jałowego stosuje się elementy takie jak łożyska oraz obudowa próżniowa. Energia gromadzona w kinetycznym magazynie energii wyznaczona jest poprzez wzór (3)

$$E_{el} = \eta E_k = \eta \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3)$$

Gdzie η – sprawność ogólna, E_k – energia kinetyczna masy wirującej
 I – moment bezwładności, ω – prędkość kątowa

Obecnie stosuje się magazyny energii z kołem zamachowym w szerokim zakresie mocy i pojemności od wielkoskalowych zasobników przeznaczonych dla sieci elektroenergetycznych do magazynów w małej skali przeznaczonych dla klienta indywidualnego [43]. Zwiększająca się popularność stosowania FESS związana jest licznymi zastosowaniami w obszarze gromadzenia i zarządzania energią. Obecnie do najważniejszych zastosowań kinetycznych magazynów energii można zaliczyć:

- poprawę jakości energii elektrycznej [44],
- regulacja częstotliwości [45],
- kontrola skoku napięcia [46],
- bezprzewodowe zasilacze awaryjne (UPS) [47],
- elektromobilność i transport [48],
- przemysł kosmiczny [49],
- przemysł wojskowy [50],
- odnawialne źródła energii [51].

Jednym z największych systemów wykorzystujących jako magazyn energii koła zamachowe jest uruchomiany w 2011r. przez firmę Beacon Power zasobnik o pojemności 5MWh i umożliwiający pobór energii wynoszący 20MW przez 15min. Kinetyczny magazyn energii znajduje się w Stephentown, Nowy Jork i obejmuje 200 kół zamachowych.

Bateryjne magazyny energii

Rozwój przemysłu szczególnie branży energetycznej i elektromobilności wymusiło rozwój tanich i łatwych w obsłudze zasobników energii elektrycznej. Sprawilo to dynamiczny rozwój rynku obejmującego technologie bateryjne.

Powodem zwiększającej się popularności tego rodzaju zasobnika energii jest:

- Ogólnie dostępna na rynku technologia [11],
- Obecnie technologia uważana za dojrzałą, popularnie wykorzystywana w przemyśle [52],

- Elektrochemiczna konwersja energii umożliwiająca ładowanie i rozładowanie w tej samej technologii [11].,
- Możliwość zabudowy modułowej [54],
- Dobre parametry prądowo-napięciowe ogniw [52],

Dzięki powyższym zaletom ogniwa bateryjne są stosowane w przemyśle jako zasobniki energii przeznaczone do zastosowań stacjonarnych (magazyny energii, UPS) oraz mobilnych (elektromobilność oraz zasilanie maszyn mobilnych). Powszechnie stosuje się różne technologie bateryjne charakteryzujące się różnymi właściwościami i zastosowaniami co zostało przedstawione w Tabeli 4.

Tabela 4 Właściwości elektrochemicznych magazynów energii [11],

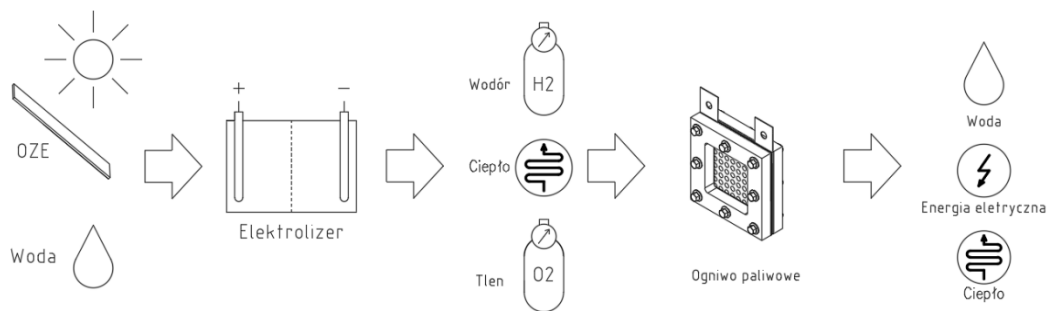
Grupa	Typ	Zalety	Wady
Litowo-jonowe	NMC	• Duża dostępność na rynku, • Dojrzałość rynkowa, • Duża gęstość energii,	• Technologia powszechnie uważana za niebezpieczną, • Stosunkowo wysoka cena, • Średnia ilość cykli ładowania • Priorytet branży elektro-mobilności (ograniczona dostępność) • Kosztowny recykling
Litowo-żelazowo-fosforanowe	LFP	• Powszechnie uważana za technologię bezpieczną, • Stosunkowo niska cena	• Konieczność zabezpieczenia przed głębokim rozładowaniem , • Wysokie koszty eksploatacyjne w przypadku częstego ładowanie i rozładowania (>1 cykl dziennie) • Średnia żywotność ogniw • Degradacja • Kosztowny recykling
Litowo-tytanowe	LTO	• Powszechnie uważana za technologię bezpieczną, • Duża żywotność w porównaniu z innymi technologiami, • Wysoka sprawność ogniw,	• Stosunkowo wysoki koszt ogniw, • Ograniczenia w stosowaniu związane z kosztem ogniw, • Kosztowny recykling,
Kwasowo-ołowiowe	LAB	• Bardzo powszechnie stosowane w przemyśle • Niski koszt ogniw, • Dojrzałe technologie recyklingu ogniw,	• Wysokie koszty eksploatacji, • Niewielka liczba cykli, • Degradacja ogniw przy głębokim rozładowaniu • Ograniczony zakres stosowania ze względu na wady technologii,
Przepływowe		• Niskie koszty eksploatacyjne, • Uważane za bezpieczne, • Pomijalna degradacja ogniw, • Praktycznie nieograniczona liczba cykli	• Stosunkowo świeża technologia, • Niska gęstość energii • Niskie prądy w porównaniu do pojemności.

		• Możliwość skalowania ze względu na moc i pojemność • Pomijana wartość samorozładowania • Możliwość recyklingu w 100%	
--	--	--	--

Ogniwa bateryjne są powszechnie stosowane w przenośnych sprzętach elektronicznych (laptopy, telefony komórkowe, tablety), transporcie (samochody elektryczne i hybrydowe), specjalistycznych maszynach przeznaczonych np. do przemysłu wydobywczego oraz stacjonarnych zasobnikach energii [52]. Dynamicznie zwiększające się zapotrzebowanie na bateryjne źródła energii w roku 2018 wyniosło 180GWh, przewiduje się że w roku 2030 zapotrzebowanie może wynieść nawet 2600GWh. Natomiast po uwzględnieniu zmniejszania kosztów ogniw szacuje się, że popyt na bateryjne zasobniki energii może wzrosnąć do 3562GWh [55]. Popularyzacja bateryjnych zasobników energii związana jest w głównej mierze z podejmowanymi działaniami proekologicznymi takimi jak odejście od konwencjonalnych źródeł energii na korzyść odnawialnych źródeł energii oraz promowanie samochodów elektrycznych. Zastosowanie poszczególnych rodzajów baterii różni się ze względu na cechy poszczególnych technologii przykładowo zasobniki energii zawierające ogniwa litowe umożliwiają działanie w systemach wymagających dużych chwilowych mocy oraz szybkiej reakcji. Przykładem takiego systemu może być instalacja znajdująca się w niemieckiej miejscowości Cremzow o mocy 22MW i sumarycznej pojemności na poziomie 35MWh. Bateryjny zasobnik energii został zastosowany w celu regulacji częstotliwości w sieci (usługa regulacji pierwotnej) [53]. Inny rodzaj baterii to ogniwa przepływowe charakteryzujące się długim czasem pracy umożliwiające długoterminowe magazynowanie energii dzięki prawie niewystępującemu zjawisku samorozładowania. Przykładem takiej instalacji jest przepływowy zasobnik energii w mieście Jeonju w Południowej Korei o mocy 260kW i pojemności 2,2MWh. System jest częścią instalacji do zasilania wytwórni papieru i przeznaczona jest do arbitrażu. Zasobnik ładowany jest w trakcie korzystnej ekonomicznej nocnej taryfie energii elektrycznej, a rozładowywany jest w trakcie dnia w momencie pracy fabryki [11].

Wodorowe magazyny energii

Wodorowe zasobniki energii to dopiero rozwijana technologia magazynowania energii wykorzystująca wodór jako medium magazynujące. Proces gromadzenia energii w wodorze odbywa się w 3 podstawowych etapach: wytwarzania wodoru za pomocą elektrolizerów, magazynowanie wodoru w specjalistycznych zbiornikach ciśnieniowych lub w postaci związków chemicznych, przetwarzanie wodoru w energię elektryczną za pośrednictwem ogniw paliwowych. Sprawność takiego procesu jest obecnie określana na 25-45% [1]. Uproszczony schemat działania wodorowych zasobników energii przedstawiono na Rys. 9[56].



Rys. 9 Uproszczony schemat procesu magazynowania energii w wodorowych zasobnikach

Nadwyżki energii z odnawialnych źródeł energii (OZE) umożliwiają przeprowadzenie procesu elektrolizy wody w celu produkcji wodoru. Dodatkowymi produktami są ciepło oraz tlen, który może zostać również zmagazynowany w zbiornikach lub wyemitowany do atmosfery. W trakcie zapotrzebowania na energię elektryczną wodór i tlen zostaje podany do ogniwa paliwowego gdzie zachodzi proces odwrotnej elektrolizy wody w celu produkcji energii elektrycznej. Dodatkowymi produktami reakcji jest woda i ciepło. Często w połączeniu z wodorowymi magazynami energii stosuje się bateryjne magazyny energii w celu zabezpieczenia układu przed nagłymi i chwilowymi zmianami obciążenia [57]. Pojemność zasobnika energii związana jest z możliwościami zgromadzenia wodoru w zbiornikach. Straty w przetwarzaniu energii redukowane są poprzez stosowanie mechanizmów mających na celu zagospodarowanie energii termicznej wydzielającej się do celów użytkowych. Instalacje umożliwiające magazynowanie energii elektrycznej za pośrednictwem wodoru oraz wykorzystanie ciepła odpadowego do celów użytkowych osiągają sprawność na poziomie 90% [58]. Wodorowe zasobniki energii umożliwiają długoterminowe magazynowanie energii, a niskie koszty skalowalności magazynów umożliwiają ich stosowanie w rozwiązaniach instalacji wyspowych czyli niezależnych energetycznie od sieci zewnętrznej. W przemyśle dostępne są rozwiązania przeznaczone dla indywidualnych odbiorców oraz dla przedsiębiorstw. Przykładem rozwiązań przeznaczonych dla indywidualnych odbiorców jest firma homepowersolutions (HPS) oferująca rozwiązanie PICEA. Producent oferuje rozwiązania wodorowego magazynu energii składającego się z modułu przeznaczonego do zastosowania wewnątrz obiektu pełniący funkcję elektrolizera, ogniwa paliwowego oraz układu zarządzającego i jednostki magazynującej wodór przeznaczonej do zastosowania na zewnątrz obiektu ze względów bezpieczeństwa. Magazyn energii ma podstawową pojemność zasobnika wodorowego na poziomie 300kWh z możliwością rozbudowy do 1500kWh oraz zasobnika baterijnego o pojemności 20kWh pełniącego funkcje magazynu krótkoterminowego. Moc nominalna wynosi 7,2kW, natomiast moc ciągła ogniwa paliwowego wynosi 1,5kW. Zasobnik energii umożliwia również zagospodarowanie energii termicznej w zakresie 2000-4000kWh rocznie. Magazyn umożliwia pracę z instalacjami fotowoltaicznymi i siecią 3x400VAC. Według danych podanych przez producenta rozwiązania szacunkowy koszt inwestycyjny wynosi 45 000 – 79 000€. Na Rys. 10 przedstawiono wodorowy zasobnik energii przeznaczony do zastosowania w obiektach mieszkalnych [59].



Jednostka zewnętrzna



Jednostka wewnętrzna

Rys. 10 Wodorowy magazyn energii firmy HPS [59]

Innym rozwiązaniem wodorowych magazynów energii są produkty firmy GKN Hydrogen. Rozwiązania przeznaczone są dla zastosowań przemysłowych, jako sezonowe zasobniki energii, zabezpieczenie dostaw energii oraz stacji ładowania pojazdów. Firma oferuje zasobniki w budowie kontenerowej w 3 głównych rozmiarach: HY2MINI o pojemności 165-420kW i mocy nominalnej 8kW oraz chwilowej 14kW (30min), HY2MEDI o pojemności 1 000 – 2 000 kWh, nominalnej mocy w zakresie 8-24kW i mocy chwilowej na poziomie 75kW (30min), HY2MEGA o pojemności >8 600 kWh. W przypadku rozwiązania HY2MEGA stosuje się zewnętrzne ogniwa paliwowe i elektrolizery. Podobnie jak w przypadku rozwiązań HPS zasobniki GKN Hydrogen łączą w swojej konstrukcji wodorowy zasobnik energii połączony z bateryjnym magazynem energii. Napięcie wyjściowe produktów HY2MINI oraz HY2MEDI wynosi 120/230/400VAC 50Hz [60].



HY2MINI



HY2MEDI



HY2MEGA

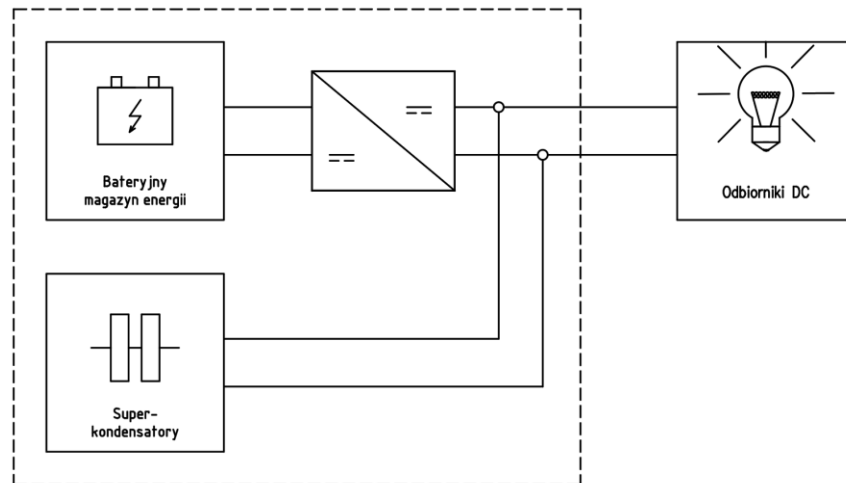
Rys. 11 Rozwiązania wodorowych zasobników energii firmy GKN HYDROGEN[60]

Superkondensatory

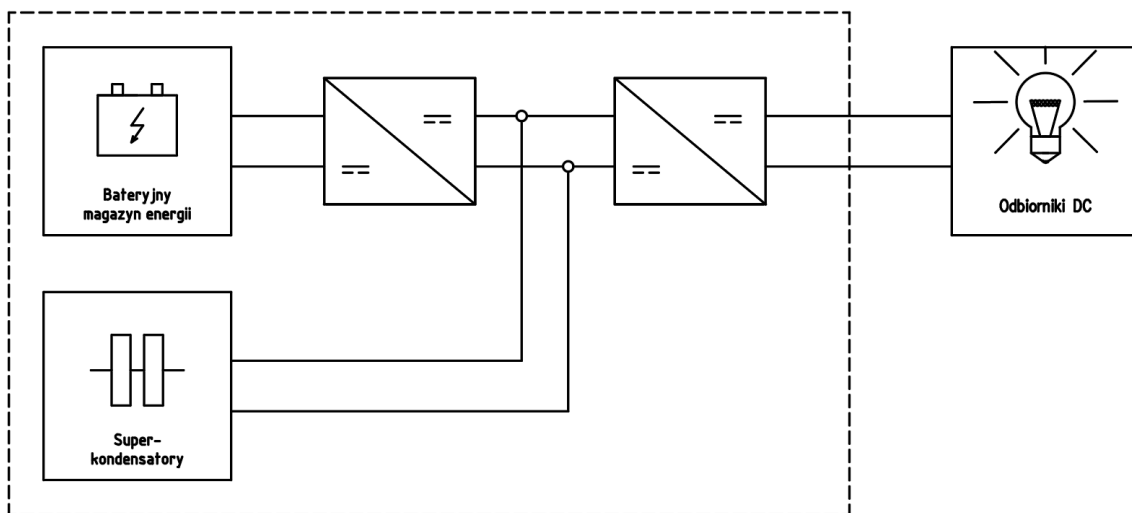
Superkondensatory to technologia magazynowania energii za pomocą kondensatorów elektrolitycznych o specjalnej budowie. Zasobniki energii wykorzystujące tę technologię charakteryzują się niską gęstością energii na poziomie 10Wh/kg i jedną z największych sprawności gromadzenia energii na poziomie 95% [61]. Dodatkowymi zaletami superkondensatorów w aplikacjach zasobników energii jest trwałość wynosząca 20 lat oraz duża liczba cykli ładowania i rozładowania (do 1 000 000 cykli) [62]. Zasobniki superkondensatorowe powszechnie uważane są za magazyny krótkoterminowe, dlatego że umożliwiają szybkie ładowanie i rozładowanie. Obecnie najczęściej superkondensatory stosuje się w połączeniu z innymi technologiami magazynowania energii np. baterie, ogniwa paliwowe. Zaletą takiego połączenia jest możliwość krótkotrwałego dostarczenia mocy szczytowej, co stabilizuje pracę innych zasobników energii, zmniejszenie wymiarów zasobnika energii, zwiększenie żywotności połączonego magazynu energii. Jednym z najpopularniejszy hybrydyzacji jest połączenie superkondensatorów z ogniwami bateryjnymi, które odbywa się w następujących topologiach[63]:

- Pasywnej (P-HEST) – stanowiącą najprostszą formę hybrydyzacji odbywającej się poprzez połączenie równoległe dwóch lub więcej rodzajów ogniw. Połączenie tych typów ogniw odbywa się pasywnie, bez użycia pośredniego konwertera elektroniki mocy [64].
- Aktywne (A-HEST)– aktywna hybrydowa topologia magazynowania energii wykorzystuje elementy pośredniczące w postaci np. przetwornic DC/DC w celu zapewnienia optymalnych warunków pracy poprzez ich od sprzęganie [65]. Ze względu na ilość zastosowanych przetwornic jak również konfiguracji połączeń można wyróżnić półaktywną hybrydową topologię magazynowania energii (SA-HEST) przedstawiona na Rys. 12 oraz w pełni aktywną

hybrydową topologię magazynowania energii (FA-HEST) przedstawiona na Rys. 13 [66],[67],[68].

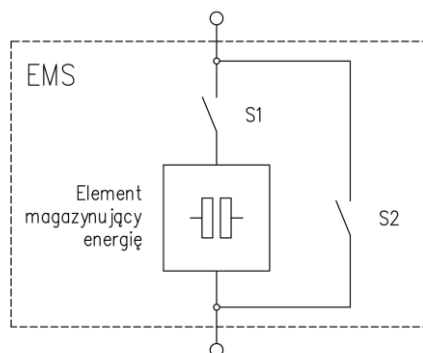


Rys. 12 Topologia półaktywnego hybrydowego magazynowania energii [63]



Rys. 13 Topologia w pełni aktywnego kaskadowego hybrydowego magazynowania energii [63]

- Dyskretne (D-HEST) - wykorzystuje moduły magazynowania energii (ESM) Rys. 14 z wbudowanymi przełącznikami, które umożliwiają ich aktywację, ominięcie lub dezaktywację. Moduły te można dynamicznie rekonfigurować, dostosowując system do różnych wymagań, co eliminuje potrzebę stosowania kosztownych przetwornic DC/DC, zapewniając jednocześnie elastyczność i łatwiejsze zarządzanie [63].



Rys. 14 Moduł magazynowania energii (ESM)[63]

Superkondensatory będące początkowo używane jedynie do podtrzymywania zasilania układów pamięci obecnie zyskują coraz nowsze obszary zastosowań. Do podstawowych branży wykorzystujących tę technologię można zaliczyć: energetyka (stabilizacja parametrów sieci), telekomunikacyjny (zasilanie telefonów), motoryzacja (elementy zasilania samochodów elektrycznych i hybrydowych, przemysł kosmiczny (zasobniki energii).[70] Przykładowy widok superkondensatora przedstawiona na Rys. 15.



Rys. 15 Pakiet superkondensatorów firmy EATON

Przykładowy pakiet superkondensatorów o nominalnym napięciu stałym na poziomie 51,3V o pojemności energetycznej wynoszącej 188F. Maksymalny prąd pakietu wynosi 2485A, czyli 131,6kW mocy chwilowej. Przedstawiony zasobnik umożliwia do 1 000 000 cykli ładowania i rozładowania. Pojemność zasobnika określono zgodnie z wzorem (5) na 68,7Wh [70].

$$E_{el} = \frac{0,5 C V^2}{3600} \quad (5)$$

Gdzie: E_{el} – energia zgromadzona w zasobniku [Wh], C – pojemność elektryczna [F],
 V –maksymalne napięcie pracy [V].

Cechą charakterystyczną superkondensatorów jest możliwość przepływu prądu o dużych wartościach przy niewielkich wartościach pojemności zasobnika. Duża ilość cykli pracy oraz możliwość głębokiego rozładowania umożliwiają stosowanie superkondensatorów jako krótkoterminowych zasobników energii w hybrydowych systemach magazynowania energii (HESS).

2.3.2. Hybrydyzacja magazynów energii

Dynamiczne zmiany w systemach elektroenergetycznych, popularyzacja odnawialnych źródeł energii oraz konieczność zapewnienia nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej powoduje wymóg stosowania zasobników energii o zróżnicowanych właściwościach. Dodatkowo inwestycja związana z pozyskaniem magazynu musi być opłacalna i w pełni funkcjonalna tak aby zwiększyć komfort indywidualnego odbiorcy. W celu zapewnienia pełnej funkcjonalności konieczne jest połączenie różnych technologii w taki sposób by zapewnić odpowiednią wszechstronność. Rozwiązaniem mogą być hybrydowe systemy magazynowania energii (HESS), łączy dwa lub większą ilość technologii zasobników energii o komplementarnych właściwościach takich jak szybki czas reakcji, znikoma wartość samorozładowania oraz duża ilość cykli pracy [11].

Hybrydowy magazyn energii w ramach projektu HyStore

Obecnie badania nad hybrydowymi magazynami energii prowadzone są przez zespół ekspertów Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk. W 2018r. uruchomiano stanowisko badawcze hybrydowego magazynu energii (Rys. 16) w centrum badawczym KEZO w Jabłonie [71].

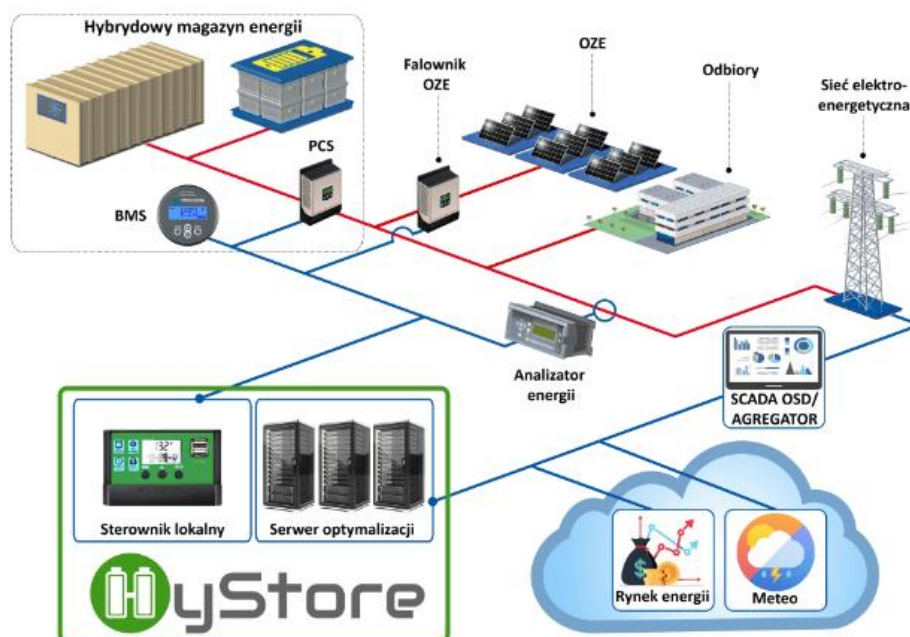
Łączna moc systemu magazynowania wynosi 60kW, a sumaryczna pojemność wynosi 180kWh. Hybrydowy system magazynowania integruje 4 technologie zasobników energii [72]:

- Bateria przepływowa o mocy 12kW i pojemności 100kWh
- Bateria litowo-żelazowo-fosforanowa LiFePO₄ o mocy 24kW i pojemności 24kWh
- Bateria węglowo-ołowiowa o mocy 12kW i pojemności 24kWh
- Bateria kwasowo-ołowiowa o mocy 12kW i pojemności 32kWh



*Rys. 16 Demonstrator hybrydowego systemu magazynowania energii
w centrum badawczym KEZO[11]*

Hybrydowy system magazynowania energii jest częścią mikrosieci centrum badawczego i służy między innymi do bilansowania energii pozyskane z odnawialnych źródeł energii (paneli PV, turbiny wiatrowe) oraz odbiorów elektrycznych (zasilanie biur i laboratoriów, ładowanie pojazdów elektrycznych, ogrzewanie pompą ciepła). Przedstawiony system jest obiektem na którym przeprowadzane są badania dotyczące doboru metodologii konfiguracji hybrydowych magazynów energii na potrzeby odbiorcy przy zachowaniu wysokiej żywotności baterii składowych. Hybrydowy magazyn energii działający w KEZO Centrum Badawczym Polskiej Akademii Nauk w Jabłonie jest częścią projektu HyStore. HyStore to system zarządzania energią (EMS) przeznaczonym do aplikacji z magazynami energii w różnych technologiach zintegrowanych ze sobą. Zarządzanie przepływem energii odbywa się poprzez sterownik lokalny oraz aplikację sieciową (serwer optymalizacji). Sterownik lokalny odpowiedzialny jest za bezpośrednie sterowanie baterią, bilansowanie energii, poprawa jakości parametrów sieci, zarządzaniem pracą baterii oraz zapewnienie ciągłości zasilania w przypadku awarii (praca wyspowa). Rolą serwera optymalizacji natomiast jest wyznaczenie harmonogramu działania zasobnika energii, bieżące analizy finansowe (arbitraż cenowy) oraz predykcja bilansu energetycznego obejmująca produkcję energii z OZE oraz bieżące zużycie energii [71]. Schemat blokowy systemu HyStore przedstawiono na Rys. 17.

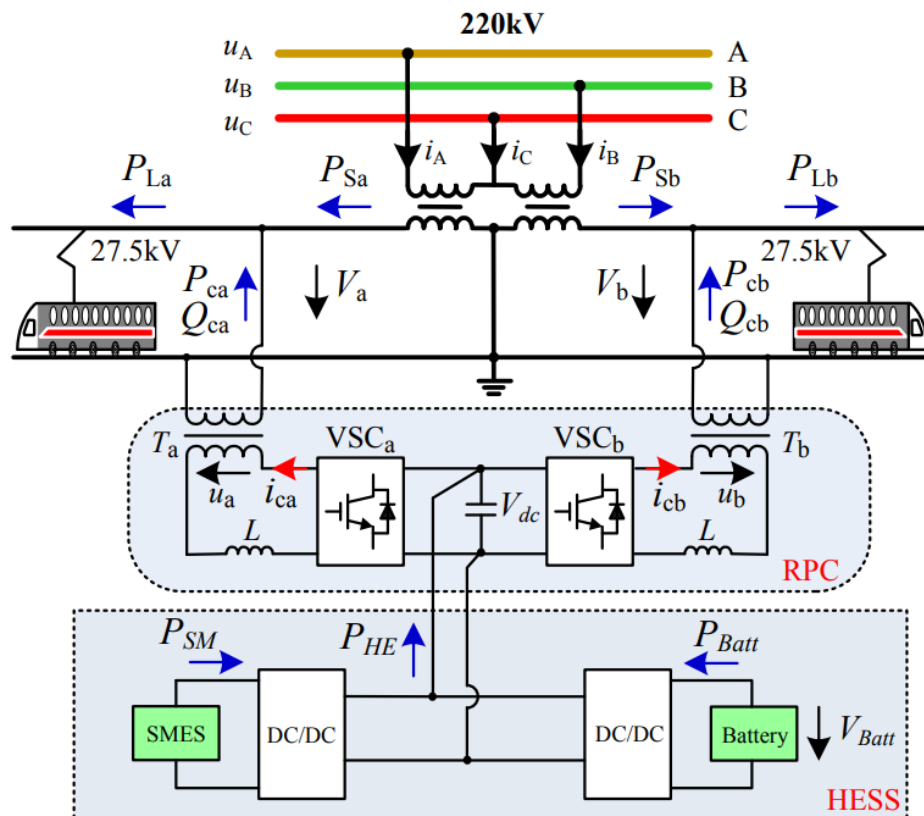


Rys. 17 Schemat blokowy systemu HyStore[73]

Hybrydowy system magazynowania energii zintegrowany z kondycjonerem kolejowym

System został opracowany w celu redukcji zagrożeń powstających w wyniku działania kolei szybkich prędkości powodujące serię impulsów negatywnie wpływających na parametry sieci elektroenergetycznej, dodatkowo zwiększający koszty podstacji trakcyjnych [74]. Trakcje kolei wysokich prędkości w przeważającej mierze zasilane są z sieci jednofazowych co przyczynia się do powstania negatywnych skutków takich jak rosnące straty generatora, awarie zabezpieczeń oraz straty na transformatorze. W celu redukcji negatywnych skutków działania szybkiej kolei na sieć dystrybucyjną zaproponowano układ HESS-RPC składający się z hybrydowego magazynu energii obejmującego zasobnik energii magnetycznej (SMES) z akumulatorowym zasobnikiem energii oraz kondycjonera zasilania kolejowego (RCP)[75]. Na Rys. 18 przedstawiono schemat blokowy układu HESS-RCP.

Przedstawiony na Rys. 18 układ jest zasilany z przyłącza wysokiego napięcia 220kV za pomocą trójfazowego transformatora o przekładni KT. Wysokie napięcie zostaje zredukowane do dwóch źródeł napięcia fazowego o wartości 27.5kV zasilające oba nadajniki. Kondycjoner zasilania kolejowego (RCP) składa się z dwóch jednofazowych konwerterów napięcia typu back-to-back połączonych ze sobą za pośrednictwem szyny prądu stałego z dołączonym kondensatorem, zasilanych poprzez 2 transformatory obniżające napięcie linii 27,5kV.



Rys. 18 Schemat blokowy układu HESS-RCP[75]

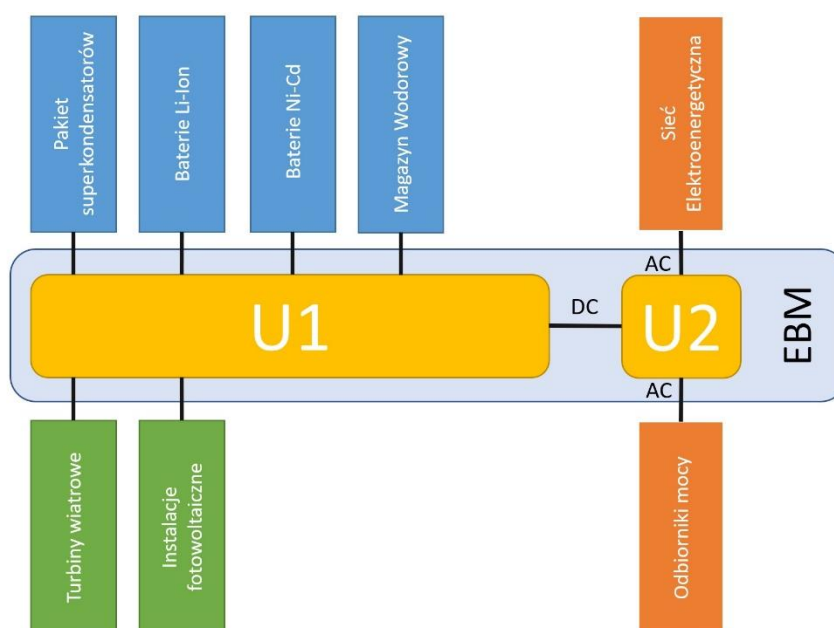
Hybrydowy system magazynowania energii składa się z akumulatorowego zasobnika energii oraz magnetycznego zasobnika energii (SMES)[75]. HESS połączony jest z RCP za pomocą szyny prądu stałego poprzez odpowiedni obwód interfejsowy. Zastosowanie HESS-RCP w układach zasilania szybkich kolei umożliwi:

- Minimalizację mocy szczytowej podstacji trakcyjnej, natomiast moc transformatora trakcyjnego i przyłącza może zostać zmniejszona, co wiąże się z obniżeniem kosztów eksploatacyjnymi podstacji trakcyjnej.
- Poprawę jakości paramentów sieci: kompensacja mocy biernej oraz zmniejszenie zakłóceń przekazywanych do sieci.
- Hybrydyzacja zasobników energii umożliwi poprawę żywotności pakietu bateryjnego poprzez obniżenie mocy oraz zmniejszenie liczby cykli ładowania i rozładowania.

Inteligentny hybrydowy magazyn energii z przekształtnikami energoelektronicznymi wykorzystującymi wysokonapięciowe, niskiindukcyjne moduły mocy SiC Mosfet.

Hybrydowy magazyn energii zaprezentowany przez firmę MARKEL Sp. z o.o. oparty jest na wykorzystaniu energoelektronicznego bloku mocy (EBM). Układ EBM zarządza przepływem energii pomiędzy źródłami OZE, magazynami energii, odbiorcami energii oraz siecią dystrybucyjną. System składa się z dwóch podstawowych członów U1 i U2. Człon U1 odpowiedzialny jest za zarządzanie

przepływem energii pomiędzy poszczególnymi układami magazynów energii. Człon U2 odpowiedzialny jest natomiast za połączenie z siecią dystrybucyjną i odbiornikami prądu zmiennego[76]. Schemat hybrydowego magazynu energii z EBM przedstawiono na Rys. 19.



Rys. 19 Hybrydowy magazyn energii z OZE [76]

W celu zapewnienia dużej dynamiki zarządzania przepływem energii przy równoczesnej redukcji zakłóceń EMC koniecznej jest by budowa modułu EBM była zintegrowana wewnątrz jednej obudowy o możliwie minimalnych gabarytach, opłacalna ekonomicznie oraz o wysokiej sprawności. W celu realizacji przedstawionych założeń w EBM zastosowano niski indukcyjne tranzystory mocy SiC MOSFET umożliwiające przełączanie z częstotliwością w zakresie 10-50kHz przy napięciu nawet 4kV[77]. Układ EBM umożliwia w członie U1 sterowanie przepływem energii z wykorzystaniem szyny prądu stałego co dodatkowo umożliwia przyłączenie odbiorników DC bez obciążania sieci dystrybucyjnej [78] oraz izolację galwaniczną [79]. Człon U1 połączony jest z instalacją prądu zmiennego (siecią dystrybucyjną oraz odbiornikami AC) za pośrednictwem dwukierunkowego przekształtnika AC/DC. W członie U2 zastosowano transformator połączony z przekształtnikiem energoelektronicznym. Zastosowanie tzw. inteligentnego transformatora umożliwia zmniejszenie gabarytów i masy transformatora pracującego z podwyższoną wartością częstotliwości znacznie wyższą od 50Hz. Wymiary transformatora wraz z przekształtnikami energoelektronicznymi są o 3,5 razy mniejsze niż rozwiązanie z transformatorem pracującym z częstotliwością 50Hz [80]. Dodatkowymi zaletami stosowania inteligentnych transformatorów jest stabilizacja napięcia, kompensacja mocy biernej oraz łączenie instalacji o różnych częstotliwościach pracy. Szacuje się że wraz z popularizacją tzw. sieci Smart Grid ilość rozwiązań z inteligentnymi transformatorami będzie wzrastać [81]. Dodatkowym elementem inteligentnego magazynu energii powinno być oprogramowanie oparte na algorytmach samouczących, które zwiększa elastyczność adaptacji do

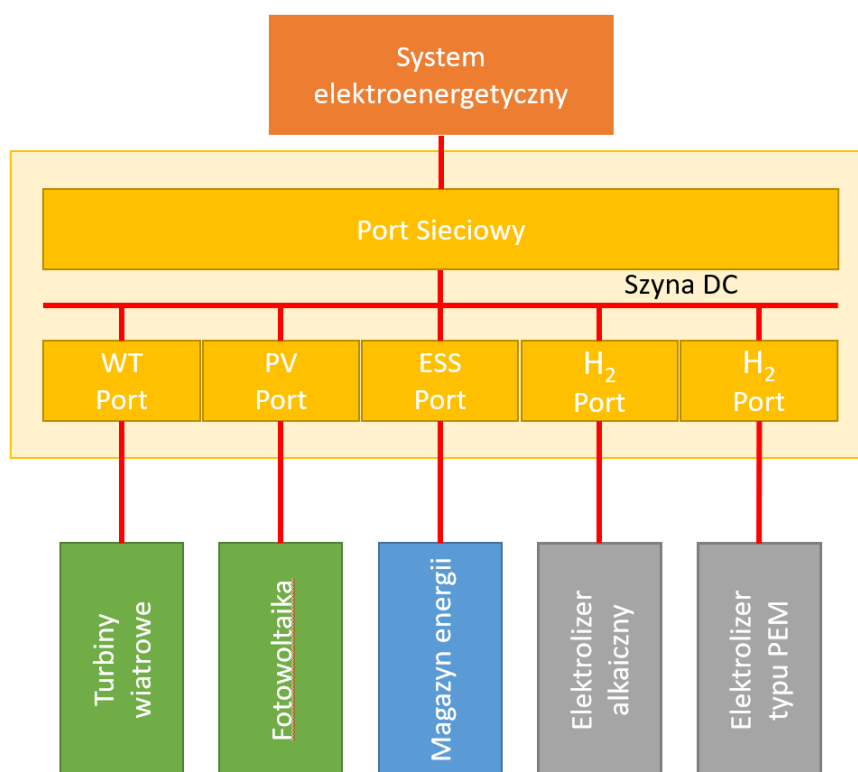
bieżącego obciążenia sieci oraz aktualnych zmian taryfowych zwiększając tym samym sprawność i opłacalność systemu.

Wieloportowy ruter prądu stałego[83]

W celu integracji odnawialnych źródeł energii z zasobnikami bateryjnymi i wodorowymi zaproponowano rozwiązanie wieloportowego rutera energetycznego DC. Ruter składa się z następujących 6 portów:

- Port sieciowy: obejmuje przekształtnik interfejsowy w postaci przetwornicy AC/DC umożliwiający połączenia napięcia sieciowego z szyną prądu stałego rutera DC. Port odpowiedzialny jest za wymianę energii pomiędzy generowaną z OZE a instalacją prądu zmiennego oraz stabilizację napięcia na szynie prądu stałego. W trakcie pracy wyspowej (off-grid) port jest wyłączony.
- Port energii wiatru: obejmuje przetwornicę AC/DC, której strona pierwotna połączona jest z turbiną wiatrową natomiast strona wtórna z szyną prądu stałego. Port odpowiedzialny za odbiór energii wygenerowanej przez turbinę wiatrową i przekształcenie na napięcie stałe o parametrach dostosowanych do wspólnego napięcia szyny DC.
- Port energii PV: obejmuje przetwornicę DC/DC, której strona pierwotna połączona jest z instalacją fotowoltaiczną natomiast wtórna połączona jest z szyną DC rutera. Port odpowiedzialny jest za dostosowanie poziomu napięć instalacji PV do wspólnego napięcia układu.
- Port bateryjny zasobnik energii: obejmujące przetwornicę DC/DC, której strona pierwotna przyłączona jest do bateryjnego zasobnika energii, natomiast wtórna do wspólnej szyny DC. Porty te odpowiedzialne są za stabilizację napięcia na szynie DC w przypadku zaniku napięcia z portu sieciowego czyli pracy w trybie off-grid. Bateryjny zasobnik energii zapewnia również niezawodną pracę rutera w przypadku awarii zasilania.
- Porty wodorowe: obejmuje przetwornice DC/DC, której strona pierwotna zasilana jest z rutera DC natomiast strona wtórna połączona z elektrolizerem. Port odpowiedzialny jest za sterowanie produkcją wodoru poprzez regulację prądu i mocy elektrolizera. Możliwe jest zastosowanie różnych rodzajów elektrolizerów w tym najpopularniejszych typu PEM i alkalicznych.

Schemat blokowy 6-portowego rutera energii przeznaczonego do produkcji wodoru przedstawiono na Rys. 20.



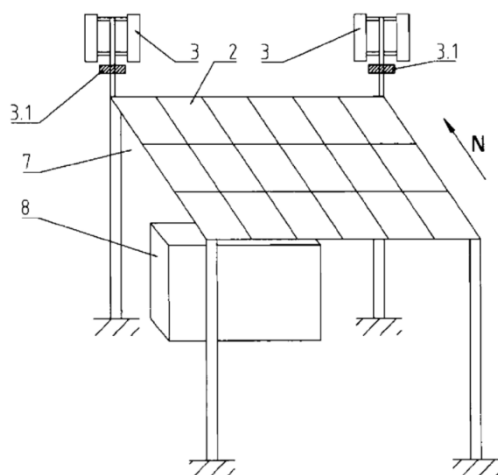
Rys. 20 Schemat blokowy rutera DC[83]

Zastosowanie rutera DC w produkcji wodoru umożliwia stabilizację pracy elektrolizerów wymagających stałych warunków napięciowych w celu prawidłowej pracy, wysokiej sprawności oraz żywotności. Dodatkową zaletą stosowania rutera DC jest możliwość maksymalnego wykorzystania energii pozyskanej z OZE (paneli PV, turbin wiatrowych)[83].

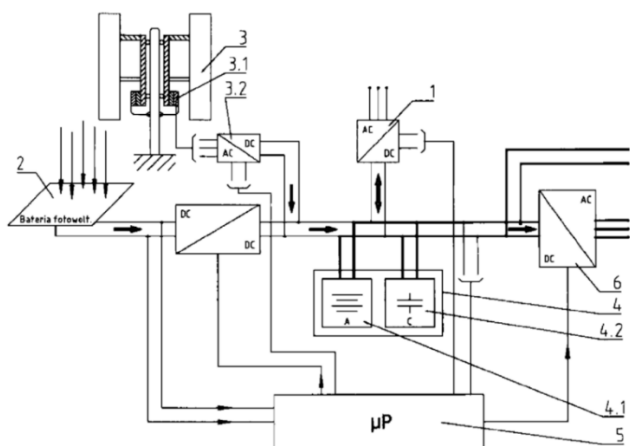
Stacja szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych[82]

Hybrydyzację zasobników energii zastosowano w patencie stacji szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych przeznaczonych do zastosowania w miejscach publicznych np. parkingi, zajezdnie autobusowe, czy też stacje benzynowe. Stacja ładowania będąca przedmiotem wynalazku składa się z hybrydowego magazynu energii, układu zasilania sieciowego wyposażonego w przetwornik AC/DC, układu zasilania z odnawialnych źródeł energii (instalacji fotowoltaicznej z chopperem DC/DC oraz turbiny wiatrowej zintegrowanej z prostownikiem AC/DC). Integracja poszczególnych komponentów przeznaczonych do generacji, magazynowania i odbioru energii odbywa się poprzez szynę prądu stałego. Zasobnik energii wyposażony jest w dwa wyjścia: wyjście prądu stałego oraz wyjście prądu zmiennego poprzez trójfazowy falownik. Sterownie przepływem energii przez poszczególne elementy układu odbywa się poprzez układ mikroprocesorowy. Hybrydowy magazyn energii zastosowany w tym wynalazku składa się z baterii akumulatorów połączonych równolegle z baterią superkondensatorów. Hybrydowy zasobnik energii wraz z energoelektroniką zabudowane są w szafce umieszczonej wewnątrz wiaty. Trójfazowe przyłącze prądu zmiennego oraz przyłącze prądu stałego wyprowadzone zostały na zewnątrz obudowy.

Wizualizację obiektu przeznaczonego do ładowania pojazdów elektrycznych przedstawiono na Rys. 21, natomiast blokowy schemat elektryczny na Rys. 22. Proponowane rozwiązanie stacji ładowania pojazdów ma postać wiaty (7) z zamontowanymi odnawialnymi źródłami energii w postaci dwóch turbin wiatrowych (3) oraz instalacji PV (2). Układ sterowania (5), energoelektronika (1, 3.2, 6) oraz zasobnik energii (4) umieszczono w szafie sterowniczej wewnątrz wiaty. Ze względu na wysoką sprawność oraz brak konieczności wzbudzenia korzystne jest zastosowanie prądnic z magnesami trwałymi (3.1) współpracującymi z prostownikiem (3.2) połączonymi z szyną DC. Panele fotowoltaiczne (2) zintegrowane są z układem poprzez chopper DC/DC (2.1). Dodatkowo układ może być zasilany z sieci poprzez dwukierunkowy przekształtnik AC/DC. Bezpośrednio do szyny prądu stałego przyłączono hybrydowy zasobnik energii (4) składający się z baterii akumulatorów (4.1) oraz baterii superkondensatorów (4.2).



Rys. 21 Wiaty przeznaczona do ładowania pojazdów elektrycznych [82]



Rys. 22 Blokowy schemat elektryczny stacji ładowania pojazdów [82]

Układ umożliwia ładowanie pojazdów elektrycznych bezpośrednio napięciem prądu stałego oraz poprzez jednokierunkową przetwornicę AC/DC (6) prądem zmiennym. Ładowanie pojazdów odbywa się z dużą mocą za pomocą energii zgromadzonej w zasobniku. Hybrydowy magazyn energii ładowany jest w głównej mierze z OZE czyli zamontowanych turbin wiatrowych i paneli fotowoltaicznych. Dodatkowo zasobnik może być ładowany z sieci o ograniczonej mocy przyłączeniowej wynoszącej do 20kW. Przedstawione rozwiązanie stacji ładowania pojazdów umożliwia skrócony czas ładowania samochodów wynikający z wykorzystania dużej mocy. Energia gromadzona w zasobniku w głównej mierze pochodzi z zeroemisyjnych odnawialnych źródeł z możliwością ładowania z sieci elektroenergetycznej.

3. Bilans energetyczny rzeczywistych obiektów

3.1. Bilans energetyczny

Metodologia

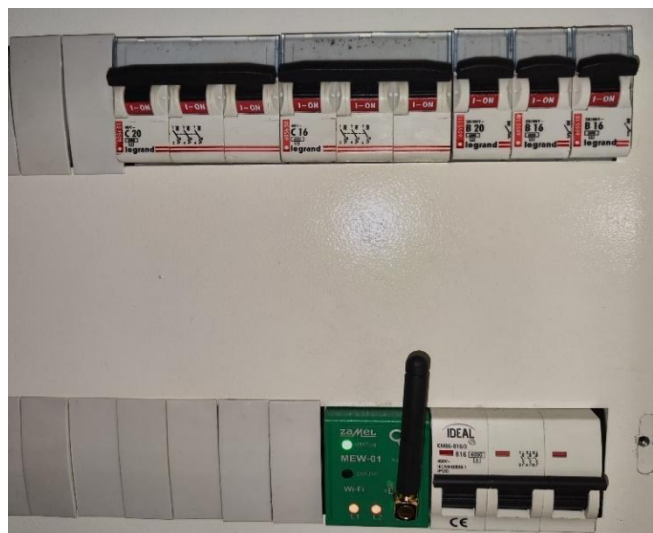
Celem bilansu energetycznego jest gromadzenie danych dotyczących zużycia energii w rzeczywistych obiektach oraz produkcji energii z mikroinstalacjach odnawialnych źródeł energii (OZE). W ramach prowadzonych badań wybrano następujące 4 obiekty:

- Dom jednorodzinny wyposażony w instalację fotowoltaiczną o mocy 4,65kWp,
- Dom jednorodzinny wyposażony w instalację fotowoltaiczną o mocy 4,83kWp
- Obiekt przemysłowo-biurowy wyposażony w instalację fotowoltaiczną o mocy 10kWp.
- Obiekt mieszkalny (akademik) bez dodatkowej instalacji PV.

W celu pomiaru parametrów energii pobieranej i oddawanej do sieci wykorzystano aparaturę będącą częścią instalacji elektrycznych obiektów np. falowniki PV, inteligentne liczniki energii (e-licznik) oraz systemy pomiaru i monitoringu zużycia energii elektrycznej IPOE. Natomiast w instalacjach w instalacjach domów jednorodzinnych zainstalowano monitory energii do pomiaru poboru i produkcji energii elektrycznej w budynku. Dodatkowo w celu pomiaru dodatkowych parametrów zainstalowano w lokalizacji domów jednorodzinnych czujnik temperatury zewnętrznej oraz nasłonecznienia. Okres bilansu energetycznego obejmował 6 miesięcy (2.06.2022-2.01.2023). Zgromadzone dane wykorzystane zostały w kolejnym etapie jako parametry wejściowe do modelu symulacyjnego.

Domy jednorodzinne znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie jednak różnią się charakterem zużycia energii oraz usytuowaniem i parametrami mikroinstalacji PV. Obiekt pierwszy to dom jednorodzinny wyposażony w instalację elektryczną o maksymalnej mocy przyłączeniowej 20,6kW i rocznym poborze energii na poziomie 2500 kWh. Dotychczasowa instalacja elektryczna obiektu uniemożliwiała pomiar i rejestrację parametrów poboru energii elektrycznej. Bezpośrednio za licznikiem dystrybutora energii w rozdzielnicy głównej budynku wpięto monitor energii MEW-01 w celu pomiaru mocy pobieranej i oddawanej do sieci elektroenergetycznej (Rys. 23). Monitor energii MEW-01 firmy ZAMEL jest urządzeniem wykonanym w technologii IOT wykorzystujący polską aplikację SUPLA. Dzięki zastosowaniu aplikacji SUPLA możliwy jest podgląd podstawowych parametrów instalacji elektrycznej budynku oraz rejestracja następujących parametrów w odstępach czasowych 10 min.:

- Moc czynną pobraną i zwróconą z podziałem na poszczególne fazy
- Moc bierną pobraną i zwróconą z podziałem na poszczególne fazy



Rys. 23 Widok rozdzielnicy głównej

Omawiany budynek wyposażony jest w dachową mikroinstalację PV o mocy 4,65kWp zwróconą w kierunku południowym. Dane dotyczące produkcji energii można pozyskać z aplikacji, bądź strony internetowej producenta falownika PV. Niestety pozyskane dane dotyczą jedynie całości produkcji energii a ich rejestracja odbywa się w odstępach czasowych co 15min. W celu pozyskania bardziej szczegółowych parametrów działania mikroinstalacji PV zainstalowano dodatkowy monitor energii MEW-01 na wyjściu falownika.



Rys. 24 Widok instalacji PV o mocy 4.65kWp.



Rys. 25 Widok falownika PV wraz z zabezpieczeniami

W bezpośrednim sąsiedztwie opisywanego budynku znajduje się drugi dom jednorodzinny również wyposażony w mikroinstalację PV. Średnie roczne zapotrzebowanie budynku na energię elektryczną tego budynku wynosi ok. 3500kWh, a maksymalna moc przyłączeniowa podobnie jak w poprzednim budynku wynosi 20,6kW. Ze względu na brak możliwości bezpośredniego pozyskania szczegółowych danych dotyczących produkcji i zużycia energii konieczne było dostosowanie instalacji. W tym celu zainstalowano monitor energii MEW-01 za licznikiem energii elektrycznej w rozdzielnicy głównej budynku (Rys. 26).

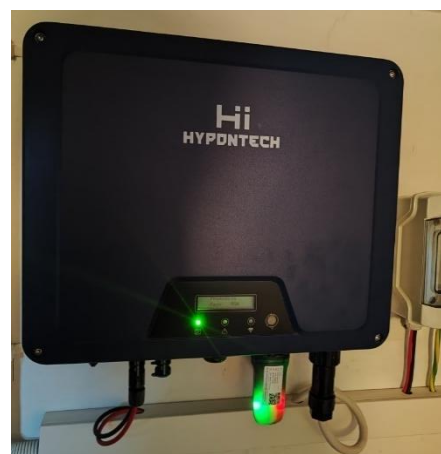


Rys. 26 Widok rozdzielnicę głównej wraz z MEW-01

Do instalacji elektrycznej budynku przyłączona jest dachowa mikroinstalacja PV o mocy 4,83kWp skierowana na wschód. Falownik PV umożliwia podgląd w czasie rzeczywistym parametrów, jednak nie ma możliwości pobrania tych danych, dodatkowo rejestracja parametrów odbywa się w odstępach czasowych co 15min. W celu pozyskania szczegółowych danych dotyczących produkcji energii elektrycznej przez zainstalowane OZE na wyjściu falownika zainstalowano kolejny monitor energii MEW-01. Dzięki temu możliwy jest pomiar nie tylko wyprodukowanej mocy czynnej, ale również pobranej i oddanej przez falownik mocy biernej.



Rys. 27 Widok instalacji PV o mocy 4,83 kWp.



Rys. 28 Widok falownika wraz z zabezpieczeniami

W celu pozyskania dodatkowych parametrów wpływających na pracę mikroinstalacji PV zainstalowano dodatkowe czujniki warunków atmosferycznych (temperatury zewnętrznej oraz nasłonecznienia). W celu zapewnienia synchronizacji pomiarów wraz z możliwością bieżącego podglądu zastosowano czujniki współpracujące z systemem SUPLA. Zastosowany czujnik natężenia światła luksomierz zabudowany jest w hermetycznej obudowie o stopniu ochrony IP65. Czujnik naświetlenia

zainstalowany został w miejscu gdzie w trakcie dnia nie występuje zacienienie, a jego nachylenie względem podłoża wynosi 0° . Czujnik temperatury zewnętrznej również zamontowany został w obudowie zapewniającej ochronę przed warunkami atmosferycznymi. Czujnik temperatury zewnętrznej służy do pomiaru temperatury powietrza, dlatego też został zamontowany w miejscu zacienionym w celu eliminacji błędów pomiarowych wynikających z nagrzania się obudowy poprzez promieniowanie słoneczne. Widok zastosowanego czujnika natężenia naświetlenia przedstawiono na Rys. 29, natomiast czujnik temperatury zewnętrznej na Rys. 30.



Rys. 29 Czujnik natężenia naświetlenia



Rys. 30 Czujnik temperatury zewnętrznej.

Trzecim obiektem bilansu energetycznego był blok mieszkalny (akademik) bez dodatkowej instalacji fotowoltaicznej. Budynek (ds. Karolinka) znajdujący się w kampusie Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Rys. 31). Obiekt ten to pięciokondygnacyjny budynek, w którym znajduje się 80 pokoi gościnnych, jedno- lub dwuosobowych. Akademik ten został wyposażony w system pomiaru i monitoringu zużycia energii elektrycznej IPOE (producent APA Sp. z o.o.). System ten umożliwia bieżący monitoring zużycia energii elektrycznej oraz następujących parametrów elektrycznych:

- moc czynna, bierna i pozorna,
- wartość skuteczna napięcia,
- wartość skuteczna prąd,
- współczynniki mocy,
- zawartości harmoniczných napięcia i prądu.

Ponadto system ten oferuje możliwość integracji informacji z zużycia innych mediów, takich jak woda i gaz, systemów fotowoltaicznych, a przede wszystkim umożliwia zarządzanie zużyciem energii. Pozyskane dane umożliwiły dobór parametrów potencjalnej instalacji fotowoltaicznej wraz z magazynem energii.



Rys. 31 Widok obiektu ds. Karolinka

Ostatnim obiektem przeznaczonym do przeprowadzenia bilansu energetycznego są zabudowania Instytutu Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach znajdujące się nieopodal akademika Karolinka. Obiekty ITG KOMAG charakteryzują się zróżnicowanym charakterem zużycia energii, dodatkowo na budynku biurowca przy ul. Pszczyńskiej 37 zabudowana jest instalacja fotowoltaiczna o mocy 10kWp. Zabudowania składają się z obiektu biurowca, hal laboratoryjnych, budynku auli i laboratoriów, siłowni, obiektu handlowego oraz lokali usługowych. Po przeanalizowaniu schematów instalacji oraz pozostałych dokumentów stwierdzono, że nie ma możliwości przeprowadzenia szczegółowego bilansu energetycznego jak w poprzednich obiektach. Powodem tego jest wielkość instalacji, ilość odbiorców, brak rozbudowanej sieci umożliwiającej zdalny odczyt i rejestrację parametrów. Możliwe jest zapoznanie się z parametrami licznika głównego oraz odczytów poszczególnych liczników energii realizowanych w miesięcznych odstępach czasowych. Po zapoznaniu się z oprogramowaniem falownika instalacji PV zauważono że nie ma możliwości archiwizacji danych. Ze względu na brak możliwości przeprowadzenia szczegółowego bilansu energetycznego zebrane i przeanalizowane zostały wyłącznie dostępne parametry.

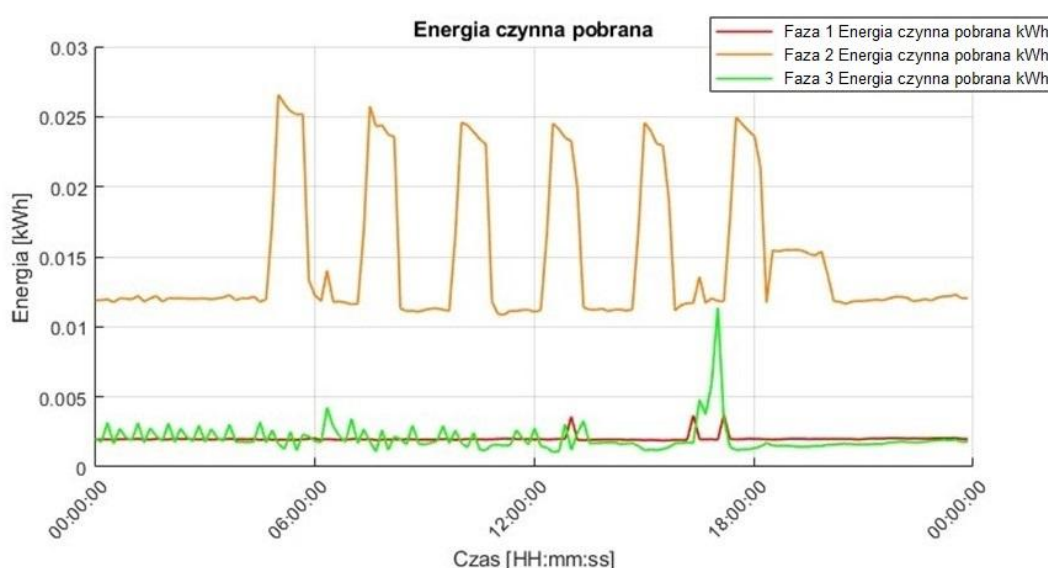
3.2. Analiza pozyskanych danych pomiarowych

3.2.1. Dobór parametrów komponentów instalacji elektrycznej

Jednorodzinny obiekt mieszkalny z zabudowaną instalacją fotowoltaiczną o mocy 4,65kWp

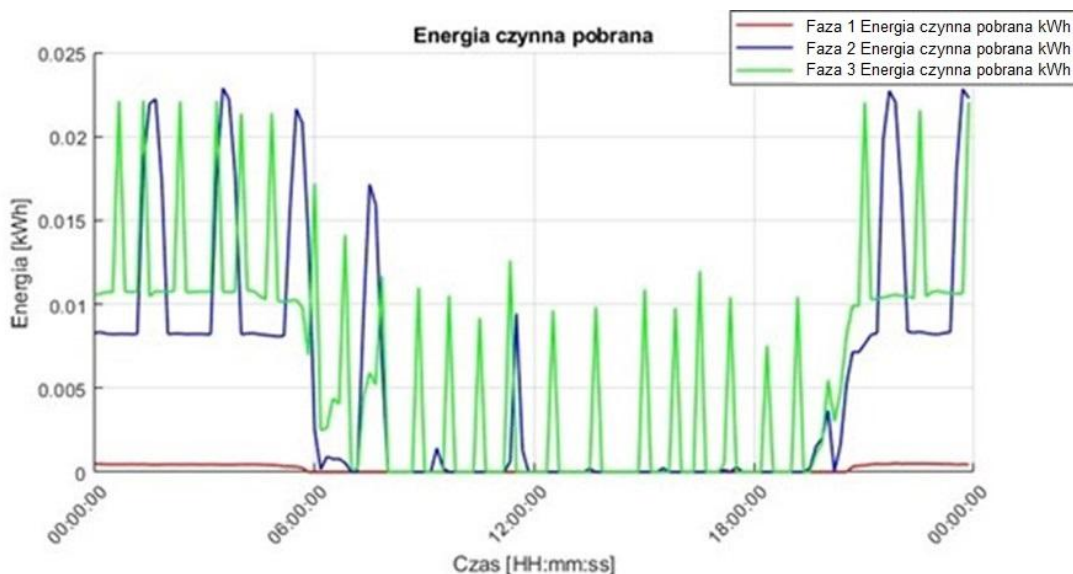
W ramach zadania pozyskano dane dotyczące konsumpcji energii elektrycznej przez obiekt mieszkalny z zainstalowaną i działającą w trybie on-grid instalacją fotowoltaiczną o mocy 4,65 kWp. Monitor

energii MEW-01 zamontowany został na początku roku 2020, dzięki czemu możliwe było pozyskanie danych z okresu przed zainstalowaniem mikroinstalacji PV. Na Rys. 32 przedstawiono 24-godzinny wykres energii czynnej pobranej przez instalację elektryczną. Na podstawie przedstawionych danych można zauważyć, że największy pobór mocy odbywa się poprzez fazę 2. Obciążenie tej fazy jest zdecydowanie większe niż pozostałych faz, dodatkowo zauważalne jest działanie odbiornika działającego okresowo czyli lodówki. Widoczne jest również zwiększone zużycie energii w godzinach wieczornych. Charakter zużycia energii na pozostałych fazach jest stały z jednym wyjątkiem w fazie 3 w godzinach popołudniowych, gdzie zauważalne jest krótkotrwałe zwiększenie zużycia energii.



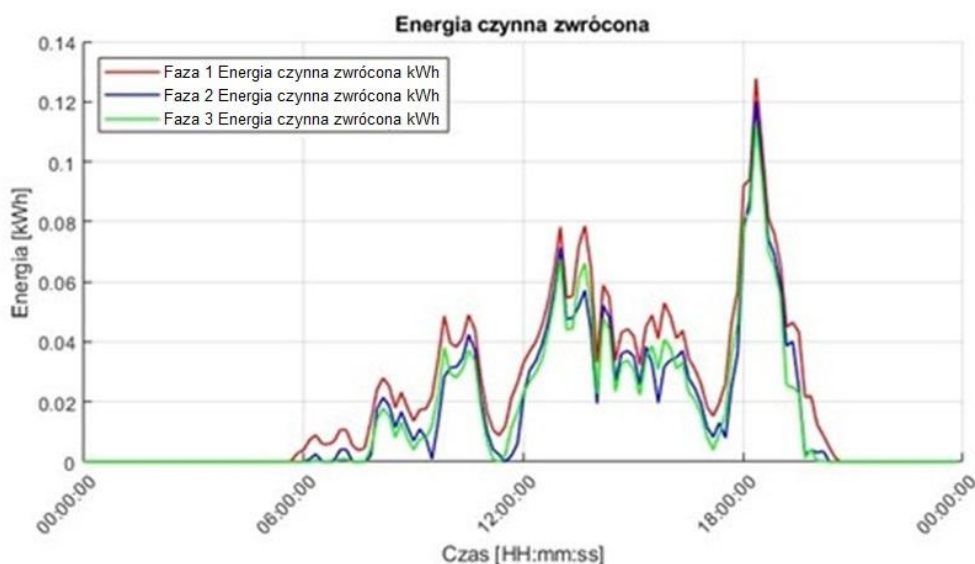
Rys. 32 Wykres energii czynnej pobranej w dniu 8.01.2020

Jak już wspomniano instalacja elektryczna w roku 2020 nie była jeszcze wyposażona w dodatkową mikroinstalację PV, dlatego też analizę wskazań monitora energii w roku 2020 ograniczono jedynie do danych mocy czynnej pobranej. Na Rys. 33 przedstawiono wykres energii czynnej pobranej w dniu 8.06.2022. Wykres ten znacząco różni się od poprzedniego, największy pobór energii w dalszym ciągu odbywa się za pośrednictwem fazy 2, gdzie podobnie jak poprzednio widoczne jest działanie odbiornika działającego okresowo czyli lodówki, której częstotliwość załączania się zwiększyła a spowodowane jest to faktem różnicy temperatur pomiędzy miesiącami styczeń, a czerwiec. Znaczące zwiększenie zużycia energii widoczne jest również w fazie 3, dodatkowo zauważalne jest działanie odbiornika o okresowym charakterze pracy załączającym się średnio jeden raz na godzinę. Faza 1 jest w dalszym ciągu jedynie minimalnie obciążona. Na przedstawionych danych z dnia 8.06.2024 widoczne jest również działanie mikroinstalacji fotowoltaicznej. W trakcie działania fotowoltaiki widocznej jest znaczące obniżenie zapotrzebowania na energię z sieci, okresowo wynoszące nawet 0 kWh.



Rys. 33 Wykres energii czynnej pobranej w dniu 8.06.2022

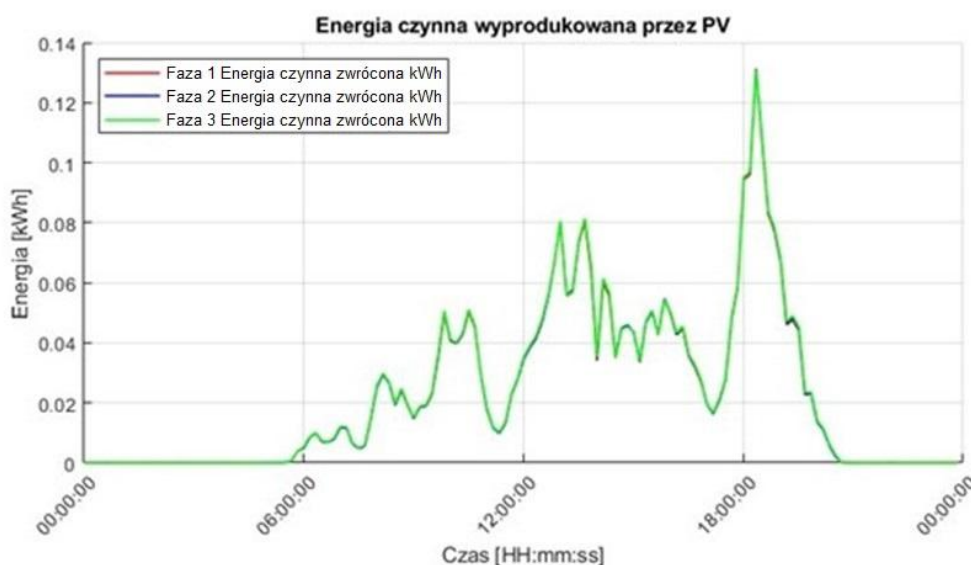
Na Rys. 34 przedstawiono wykres energii czynnej zwróconej do sieci w dniu 8.06.2024. Moc czynna zwrócona stanowi nadwyżkę energii elektrycznej wyprodukowanej przez mikroinstalację PV. Na wykresie widoczny jest okresowy charakter pracy instalacji OZE oraz nieprzewidywalny i nieregularny poziom zwrotu mocy do sieci. W trakcie analizy układu zauważono dwa główne powody tego zjawiska: wewnętrzny i zewnętrzny. Wewnętrznym powodem nieregularnego zwrotu mocy do sieci jest charakter konsumpcji energii, natomiast zewnętrznymi są zmienne warunki atmosferyczne, głównie nasłonecznienie. Mikroinstalacja PV wyposażona jest w falownik 3-fazowy, dlatego produkcja energii odbywa się w sposób symetryczny na każdej z faz.



Rys. 34 Wykres energii czynnej zwróconej w dniu 8.06.2022

Różnice widoczne na wykresie są związane z bieżącym zapotrzebowaniem na poszczególnych fazach. W dniu 8.06.2022 zostało zwrócone do sieci elektroenergetycznej więcej energii (ok. 7,8kW) niż

pobrane (1,7kWh). Związane jest to z faktem, że szczególnie w miesiącach letnich okresy zapotrzebowania i produkcji energii elektrycznej są przesunięte względem siebie w czasie.

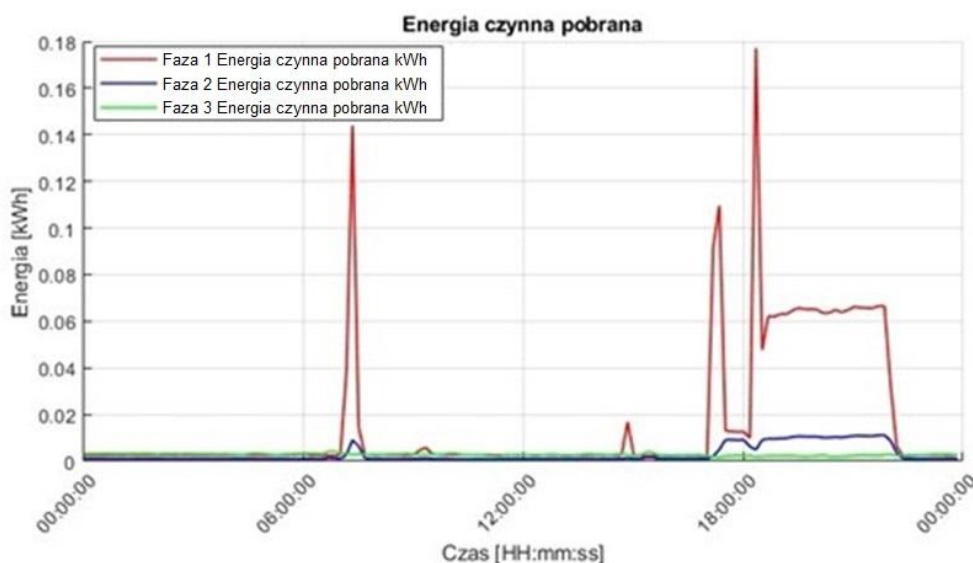


Rys. 35 Wykres energii czynnej wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną w dniu 8.06.2024

Na Rys. 35 przedstawiono wykres energii czynnej wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną w dniu 8.06.2024. Z przedstawionych danych można zauważyć podobieństwa pomiędzy wykresem na Rys. 34 a Rys. 35 potwierdza to, że większość wyprodukowanej energii stanowi nadwyżkę i zostaje przekazana do sieci. Widoczna jest również symetryczność produkcji energii objawiająca się tym, że wykresy produkcji z poszczególnych faz pokrywają się. Przedstawiony na Rys. 35 wykres przedstawia również nieregularność pracy całej instalacji PV, dlatego też nie ma możliwości bezpośredniego zasilania obiektu za pośrednictwem fotowoltaiki bez dodatkowego zasobnika.

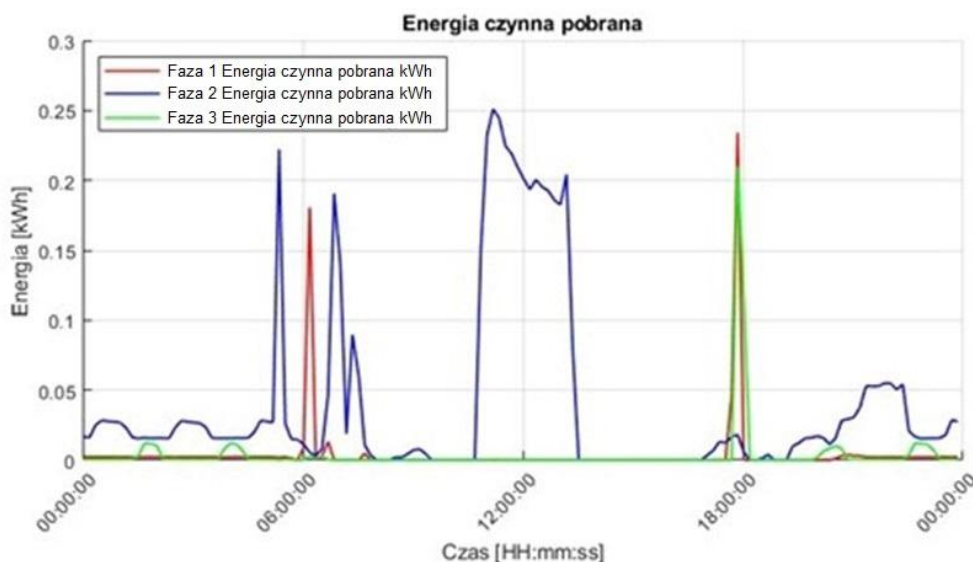
Jednorodzinny obiekt mieszkalny z zabudowaną instalacją fotowoltaiczną o mocy 4,83kWp

Kolejnym obiektem na którym prowadzono pomiary był obiekt jednorodzinny wyposażony w mikroinstalację fotowoltaiczną o mocy 4,83kWp. Pomiary zrealizowane zostały poprzez monitor energii MEW-1 zainstalowany w dniu 10.02.2024. Na Rys. 36 przedstawiono wykres pobranej z sieci energii czynnej w dniu 11.02.2022 (stanowiącego pierwszy pełny dzień pomiarowy). Przedstawiony wykres nie obejmuje działania instalacji fotowoltaicznej ze względu na fakt, że uruchomiona została dopiero w drugiej połowie marca 2022. Na wykresie wyraźnie widać szczyty poranne 6:00-8:00, szczyty popołudniowe związane z powrotem mieszkańców z pracy w godzinach 15:00-16:00. Zauważalne są dwa piki, jeden w godzinach 17:00-17:30, natomiast drugi 18:30-19:00. Pojedyncze piki związane są najprawdopodobniej z przygotowaniem posiłków.



Rys. 36 Wykres energii czynnej pobranej w dniu 11.02.2022

Dodatkowo w fazie pierwszej można zaobserwować w godzinach wieczornych 19:00-22:00 zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną który ma stosunkowo stały charakter. Obciążenie fazy drugiej poza pikiem w godzinach porannych charakteryzuje się zmniejszonym poborem w godzinach nocnych oraz przedpołudniowych natomiast zwiększonym w godzinach popołudniowych i wieczornych. Faza 3, poza jednym wyjątkiem, nie pozostaje obciążona. Na podstawie danych związanych z konsumpcją energii elektrycznej można wywnioskować wiele informacji na temat zwyczaju i codziennych obowiązków mieszkańców.

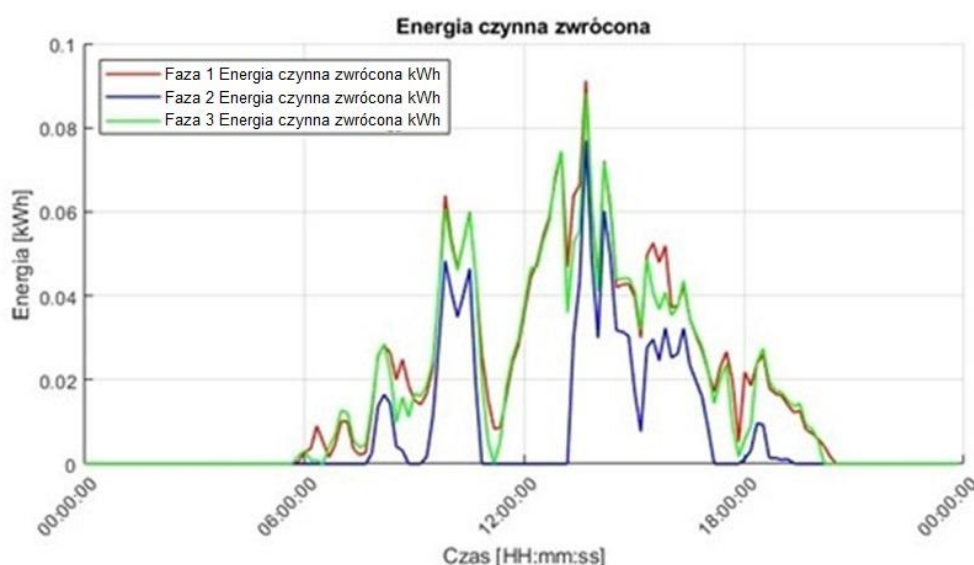


Rys. 37 Wykres energii czynnej pobranej w dniu 8.06.2022

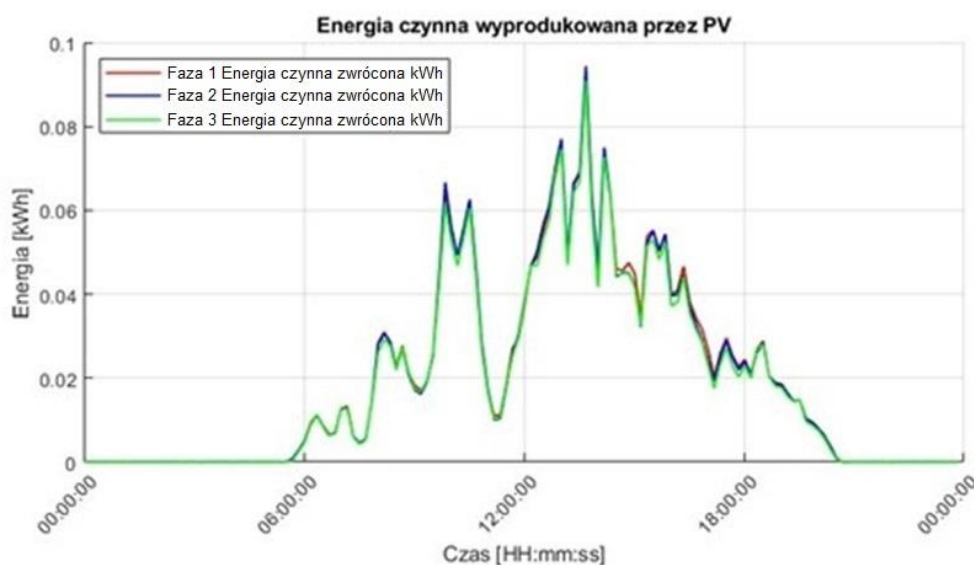
Na Rys. 37 przedstawiono wykres energii czynnej pobranej z sieci w dniu 8.06.2022 w instalacji elektrycznej wyposażonej w mikroinstalację fotowoltaiczną o mocy 4,83kWp. Produkcję energii z fotowoltaiki przedstawiono na wykresie szczególnie w godzinach 7:30-17:30, wyjątkiem tutaj jest

obciążenie fazy 2, które przewyższało produkcję energii i konieczny był pobór energii z sieci. Przedstawiony przypadek spowodował asymetrię obciążenia sieci.

Na Rys. 38 przedstawiono wykres energii czynnej zwróconej do sieci energoelektrycznej wyprodukowanej przez mikroinstalację fotowoltaiczną. Widoczne jest znaczne zróżnicowanie w poborze energii z fazy 2 w porównaniu do zapotrzebowania energii na pozostałych fazach. Wykres produkcji energii elektrycznej z mikroinstalacji OZE w dniu 8.06.2024 przedstawiono na Rys. 39.



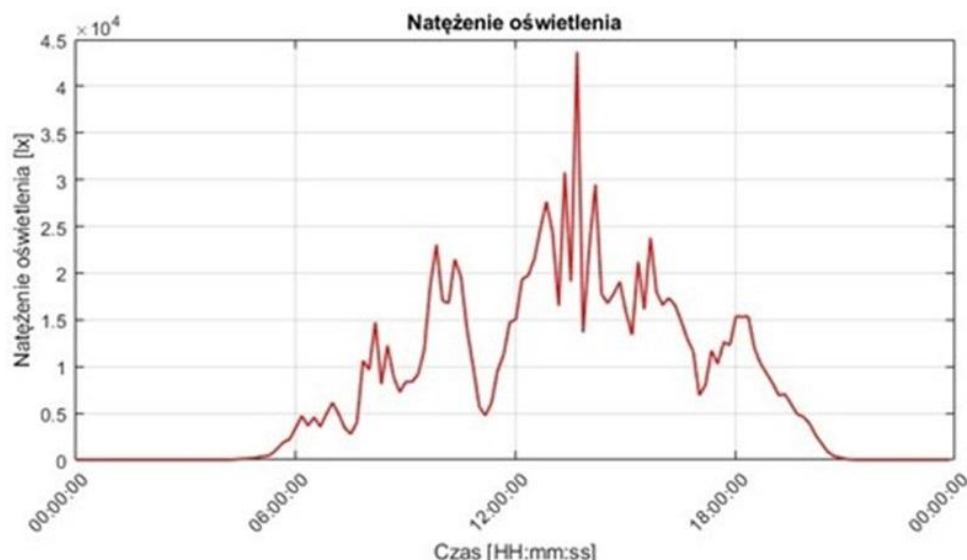
Rys. 38 Wykres energii czynnej zwróconej w dniu 8.06.2022



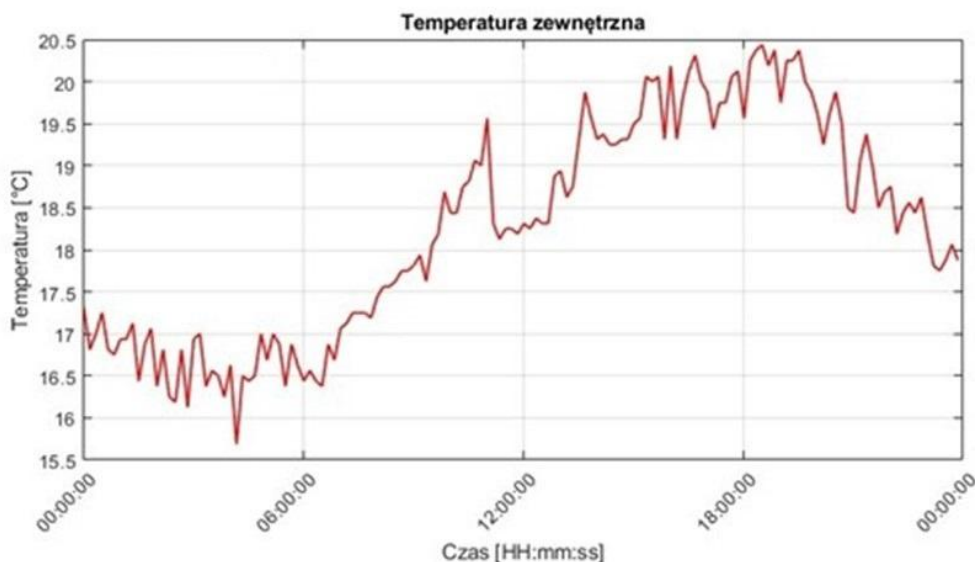
Rys. 39 Energia czynna wyprodukowana przez instalację fotowoltaiczną w dniu 8.06.2022

Znacząca nieregularność w produkcji energii związana jest z silnym uzależnieniem od warunków atmosferycznych, w przypadku fotowoltaiki związana w głównej mierze z nasłonecznieniem oraz temperaturą [83]. Na Rys. 40 przedstawiono wykres natężenia oświetlenia w dniu 8.06.2022

w lokalizacji w której znajdują się obiekty jednorodzinne opisywane w tym rozdziale. Przebieg natężenia oświetlenia charakteryzuje się znacznym stopniem podobieństwa z wykresami produkcji energii przez instalacje fotowoltaiczne. Nasłonecznienie jest więc dominującym czynnikiem wpływającym na pracę generatorów wykorzystujących energię słoneczną, a dynamiczne zmiany tego parametru sprawia niestabilność produkcji energii.



Rys. 40 Wykres natężenia oświetlenia w dniu 8.06.2022



Rys. 41 Wykres temperatury zewnętrznej w dniu 8.06.2022

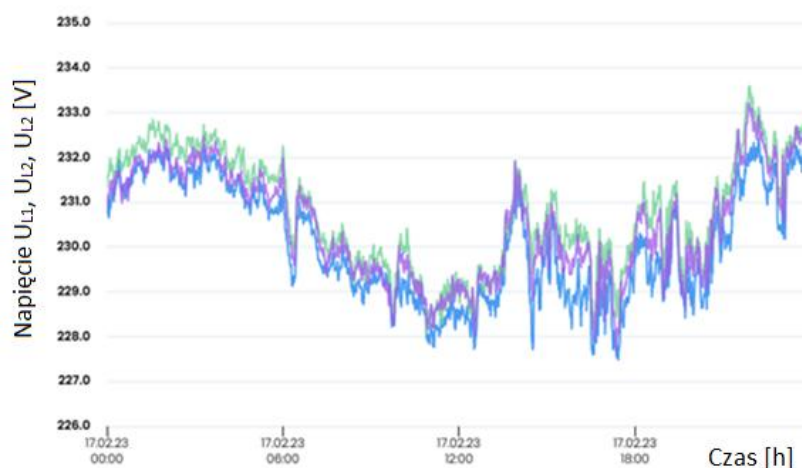
Drugim parametrem, który ma znaczący wpływ na działanie fotowoltaiki jest temperatura. Najlepszymi warunkami do generacji energii elektrycznej ze słońca jest praca w temperaturach ok. 25°C. Przekroczenie tej temperatury o 1°C może skutkować obniżeniem wydajności ogniwa o około 0,4% - 0,5% [84]. Konstrukcja paneli tzn. duża ciemna powierzchnia sprawia, że temperatura na powierzchni panelu jest o wiele wyższa niż temperatura otoczenia a obecnie stosowane panele mogą pracować do

temperatury nagrzania w zakresie 85°C - 90°C [85]. W przypadku domowych instalacji fotowoltaicznych w większości przypadków nie implementuje się paneli z dodatkowym chłodzeniem lub/i grzaniem. Straty związane ze zmianami temperatury nie są w żaden sposób redukowane. Dostępne są jednak rozwiązania paneli fotowoltaicznych, które wyposażone są w dodatkową instalację umożliwiającą utrzymanie optymalnych warunków pracy [86].

Na Rys. 41 przedstawiono wykres zmian temperatury w dniu 8.06.2024. Szczególnie widoczne jest obniżenie temperatury w godzinach 11.00-12:30 co może być spowodowane zmniejszeniem promieniowania słonecznego w przedstawionym przedziale czasowym (Rys. 40). Z przedstawionych danych jednoznacznie wynika, produkcja energii uzależniona jest silnie z warunkami atmosferycznymi, co skutkuje jej nieprzewidywalnością. Trwają jednak prace mające na celu wykorzystanie parametrów meteorologicznych do predykcji produkcji energii z OZE. Jednym z takich projektów jest realizowany w ramach konkursu HORYZON EUROPA projekt RESPONDENT [87].

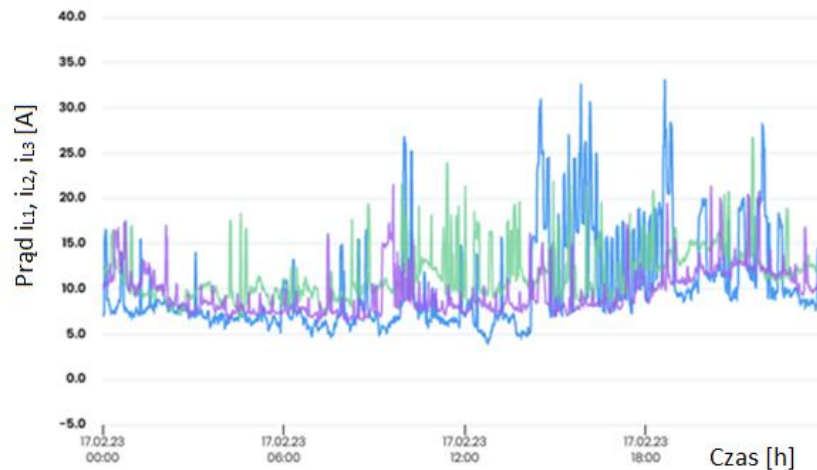
Blok mieszkalny typu akademik

Obiekt składa się z 80 pokoi gościnnych jedno- lub dwuosobowych rozmieszczonych na 5 kondygnacjach. Ds. Karolinka został wyposażony w system pomiaru i monitoringu zużycia energii elektrycznej IPOE produkcji APA Sp. z o.o.. Poza parametrami elektrycznymi system dodatkowo umożliwia pomiar zużycia innych mediów np. woda, ciepło, gaz, instalacja PV wraz z zarządzaniem przepływem energii w określony przez odbiorcę sposób [88].



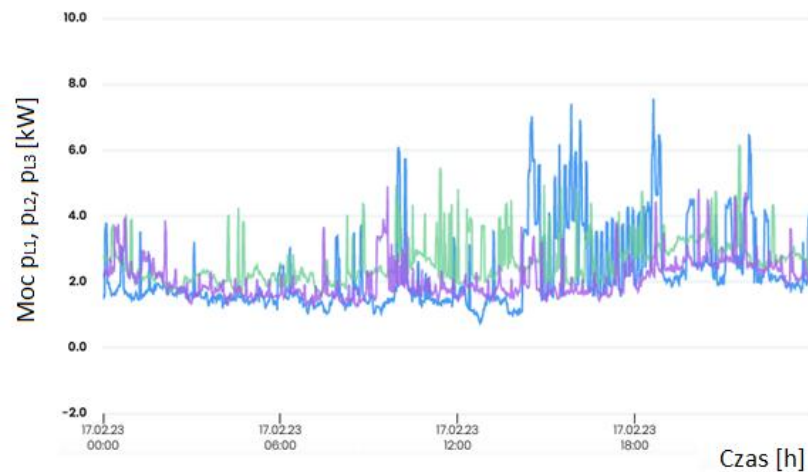
Rys. 42 Wykres czasowy wartości RMS fazowego napięcia przy przyłączy zasilania (u_{L1} – linia niebieska, u_{L2} – linia zielona, u_{L3} – linia purpurowa).

Dzięki zastosowaniu systemu IPOE możliwe było zarejestrowanie przebiegów wartości napięcia na przyłączy głównym budynku (Rys. 42) oraz przebiegu prądów pobieranego z sieci (Rys. 43) w dniu 17.02.2023.

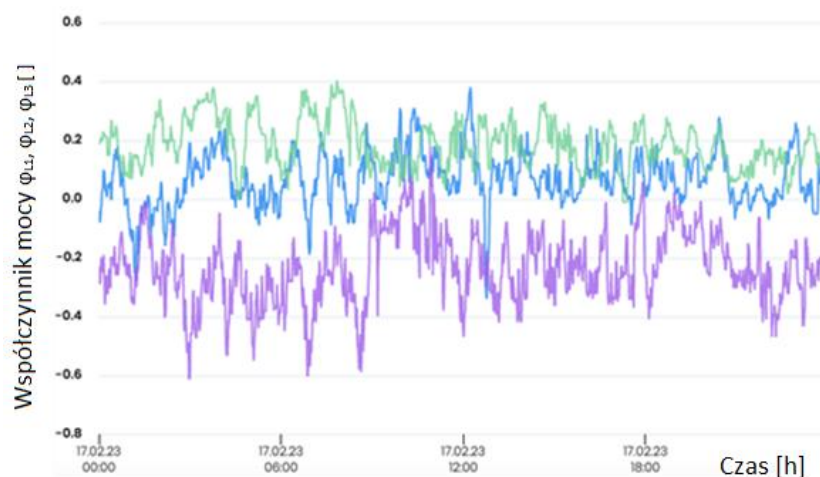


Rys. 43 Wykres wartości RMS fazowego prądu przy przyłączy zasilania (i_{L1} – linia niebieska, i_{L2} – linia zielona, i_{L3} – linia purpurowa).

Z analizy przedstawionych danych wynika, że wartości skuteczne napięć oscylują wokół wartości nominalnej z odchyleniem $\pm 3V$. Najniższe napięcia występują w godzinach porannych, południowych oraz popołudniowych, podczas gdy najwyższe rejestrowane są wieczorem i nocą. Największe wahania poboru prądu z sieci mają miejsce popołudniu, gdzie wartości prądu dochodzą do 32A. W godzinach porannych i nocnych prądy utrzymują się na najniższym poziomie, około 10A, rzadko przekraczając 15A. Moc pobierana przez obiekt akademika jest bezpośrednio powiązana z parametrami prądu i napięcia (Rys. 44).

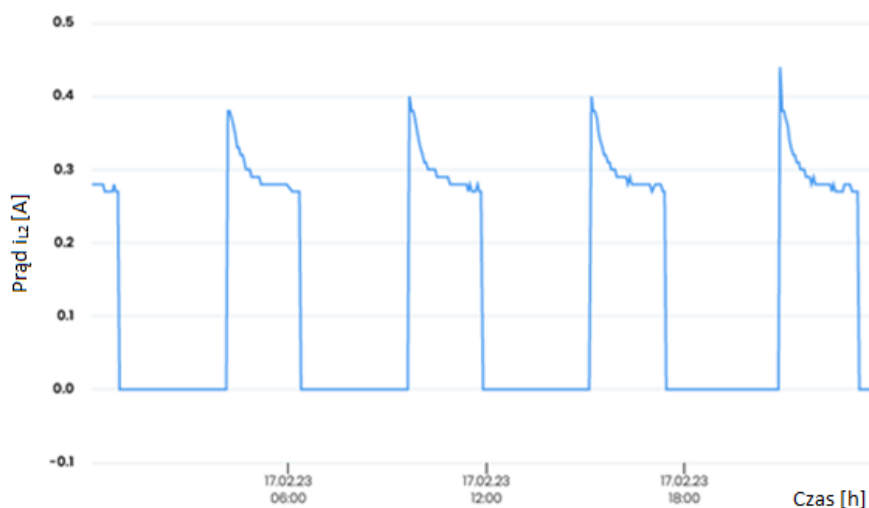


Rys. 44 Wykres mocy fazowej przy przyłączy zasilania (p_{L1} – linia niebieska, p_{L2} – linia zielona, p_{L3} – linia purpurowa).



Rys. 45 Wykres wartości współczynnika mocy fazowej na zaciskach przyłącza zasilania (ϕ_{L1} – linia niebieska, ϕ_{L2} – linia zielona, ϕ_{L3} – linia purpurowa).

Najwyższe zużycie mocy ma miejsce w godzinach popołudniowo-wieczornych na fazach L1 i L2, podczas gdy na fazie 3 pobór mocy jest umiarkowany, z widocznym wzrostem wieczorem i nocą. Wzrost ten jest stabilny i równomierny. Na podstawie danych dotyczących zużycia mocy można przypuszczać, że charakterystyka fazy 1 odpowiada urządzeniom energochłonnym działającym przez krótki czas, jak np. kuchenki mikrofalowe i płyty grzewcze. Faza 2 prawdopodobnie zasilą urządzenia typu lodówka czy czajnik, natomiast faza 3 odpowiada zasilaniu komputerów i oświetlenia. Charakter zużywanej energii można oszacować na podstawie współczynnika mocy $\tan\phi$ (Rys. 45).

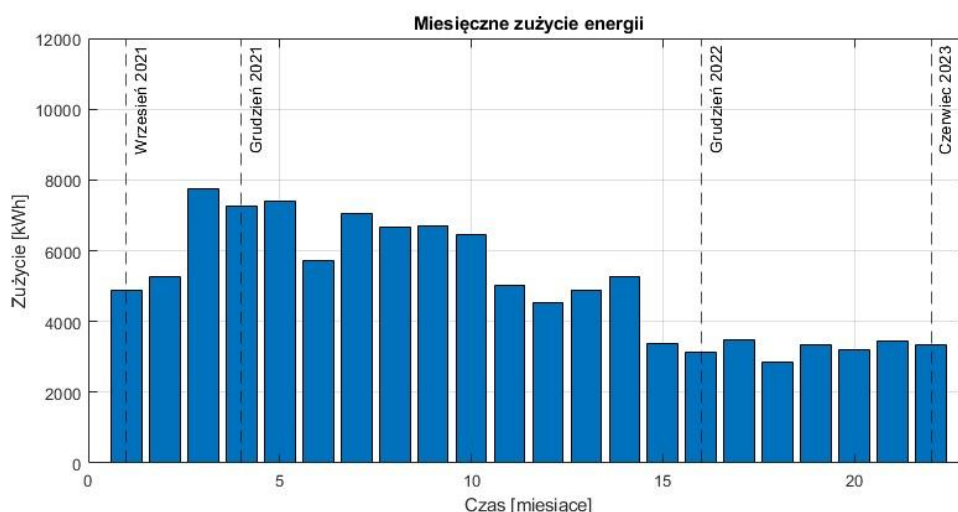


Rys. 46 Wykres wartości prądu fazy L2 według wybranego pomieszczenia. Krzywa typowa dla zużycia prądu przez lodówkę.

Wartość ujemna $\tan\phi$ wskazuje na pojemnościowy charakter odbiornika, jak na przykład w przypadku zasilaczy i oświetlenia LED. Z kolei zerowa wartość współczynnika mocy sygnalizuje rezystancyjny charakter odbiornika, typowy dla czajników bezprzewodowych. Natomiast dodatnie wartości $\tan\phi$

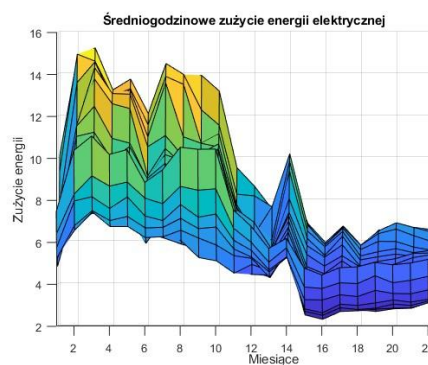
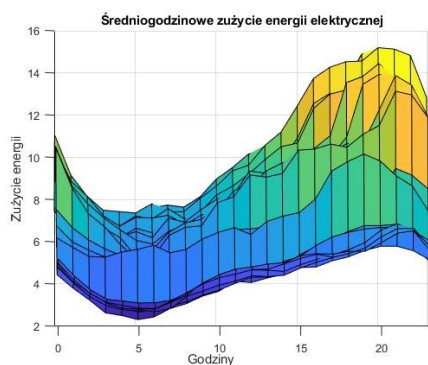
świadczą o indukcyjnym charakterze mocy odbiornika, co występuje m.in. w silnikach znajdujących się w lodówkach i pralkach [89]. Na Rys. 46 przedstawiono przebieg prądu pobieranego przez lodówkę.

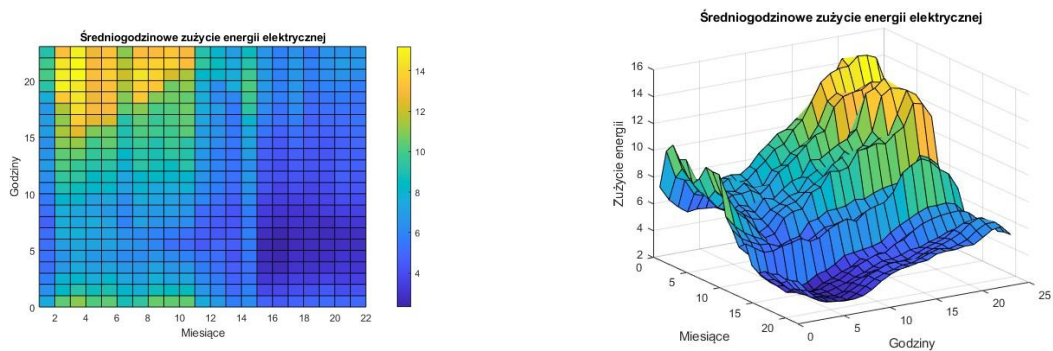
Zaprezentowane analizy opierają się na rzeczywistych danych dotyczących zużycia energii z obiektu Karolinka, który znajduje się w Gliwicach na kampusie Politechniki Śląskiej. Zebrane informacje obejmują okres od września 2021 do czerwca 2023, co daje łącznie 22 miesiące. Na Rys. 47 przedstawiono miesięczne zużycie energii w omawianym okresie, gdzie wrzesień 2021 oznaczony jest jako 1, a czerwiec 2023 jako 22. Z przedstawionych danych na Rys. 47 widać wyraźny spadek zapotrzebowania na energię elektryczną. Szczególnie widoczne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej miało miejsce w okresie listopad 2021 do październik 2022, natomiast stabilizacja wartości zapotrzebowania energetycznego miała miejsce od listopad 2022 do czerwiec 2023.



Rys. 47 Miesięczne zużycie energii elektrycznej w akademiki Karolinka

Redukcja zużycia energii przez mieszkańców obiektu związana jest najprawdopodobniej z coraz większą świadomością społeczeństwa na tematy związane z ochroną środowiska [90] oraz zmianami w rozliczeniu energii elektrycznej. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię elektryczną widoczne jest również podczas analizy średniogodzinnych wartości zużycia energii przedstawionych na Rys. 48.

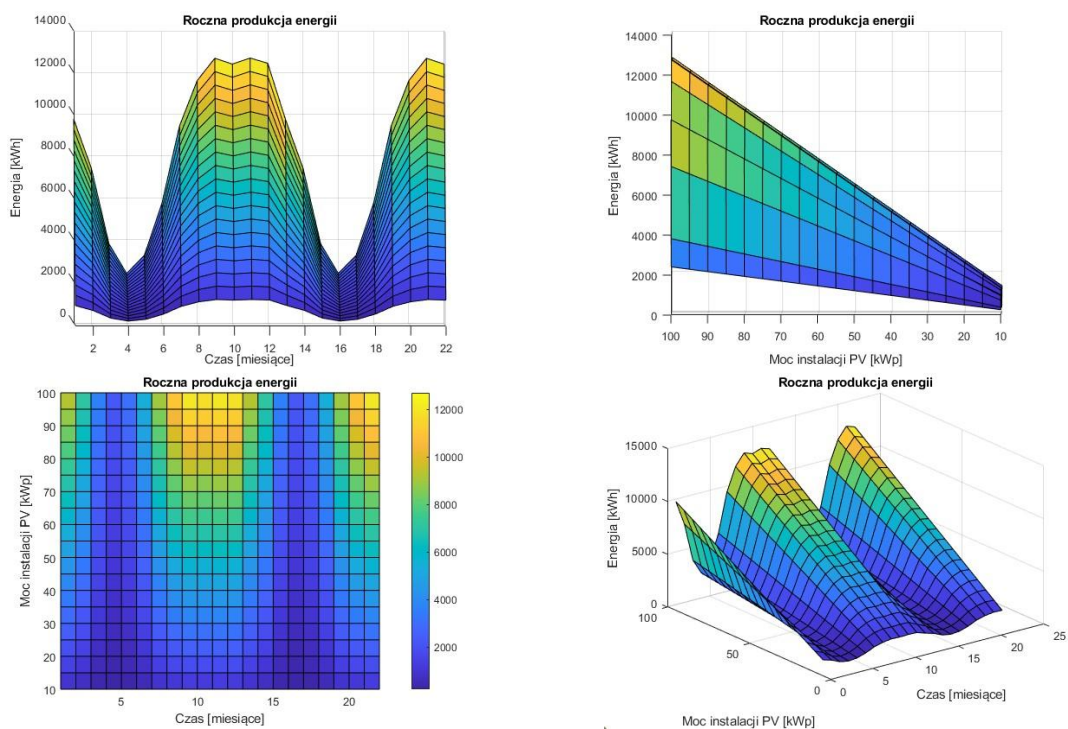




Rys. 48 Średniogodzinowe zużycie energii elektrycznej

3.2.2. Dobór parametrów instalacji PV

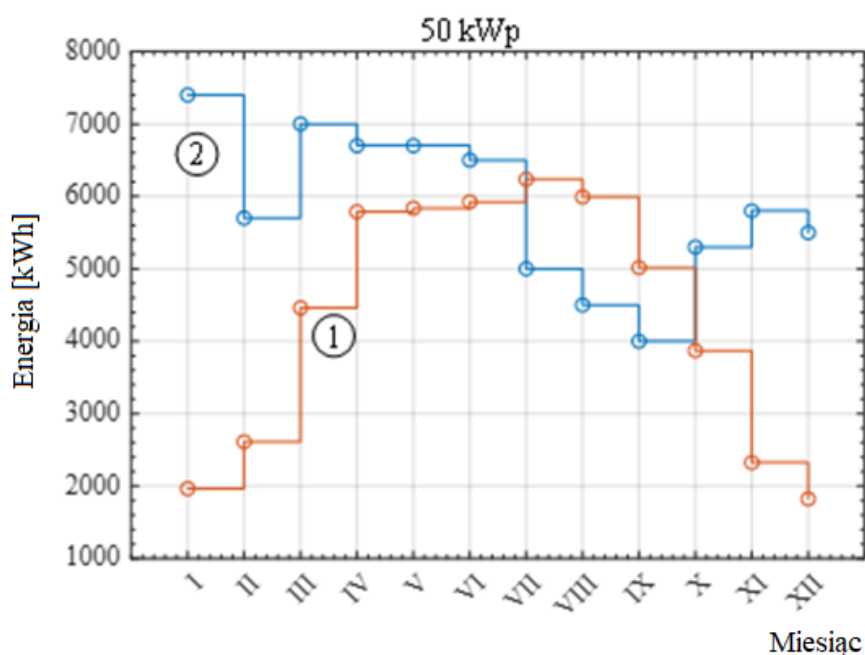
Analizując lokalizację w której znajduje się akademik “Karolinka” nie ma możliwości instalacji innych odnawialnych źródeł energii jak tylko dachowa instalacja PV, dlatego że najbardziej istotnymi parametrami jest ilość dostępnego miejsca, nośność podłoża oraz możliwość zapewnienia odpowiedniego nachylenia i pozycji paneli. Dla omawianego domu studenckiego, jego geograficznej lokalizacji o szerokości 50.286 stopnia oraz długości 8.680 stopnia najbardziej korzystne nachylenie paneli stacjonarnej instalacji fotowoltaicznej wynosi 39 stopni a azymut wynosi -2 stopnie. W celu doboru parametrów fotowoltaiki konieczne jest zapoznanie się charakterystyką średniej produkcji energii dla konkretnej lokalizacji. Dokonano analizy produkcji energii elektrycznej z instalacji o mocy od 10 do 100 kWp w skali 22 miesięcy. Wyniki przedstawiono w postaci wykresu na Rys. 49.



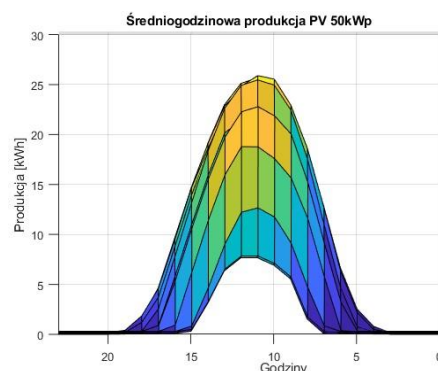
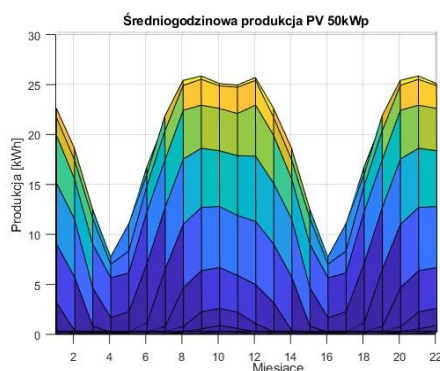
Rys. 49 Roczna produkcja energii dla różnych mocy instalacji PV

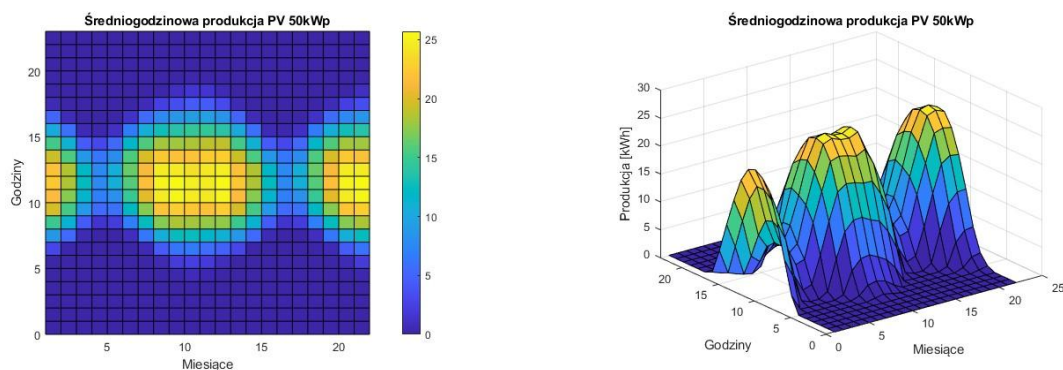
Na podstawie danych [91] o położeniu określono, dla danej lokalizacji maksymalne wartości średniej miesięcznej energii słonecznej, które przedstawione są na Rys. 49, dla przykładowej instalacji o mocy 50 kWp przedstawiono na Rys. 50. Średniomiesięczna energia wyprodukowana przez instalację o mocy 50 kWp (krzywa oznaczona przez „1”) zestawiona została z średniomiesięczną energią zużyta przez akademik (krzywa „2”).

Następnie dokonano szczegółowej analizy produkcji energii z poszczególnych mocy instalacji PV za pomocą średnio-godzinowych wartości generacji. Przykładowy wykres średnio-godzinowej produkcji energii z instalacji o mocy 50kWp przedstawiono na Rys. 51.



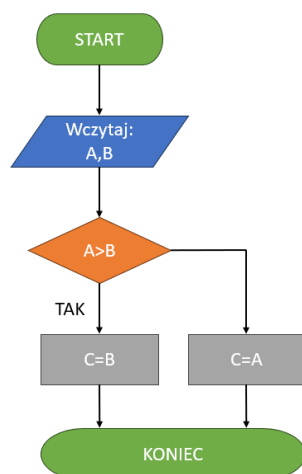
Rys. 50 Miesięczna średnia wartość energii elektrycznej zakładana do wyprodukowania przez instalację fotowoltaiczną o mocy 50 kWp – (1) oraz zużywana – (2) w wyznaczonym akademiku.





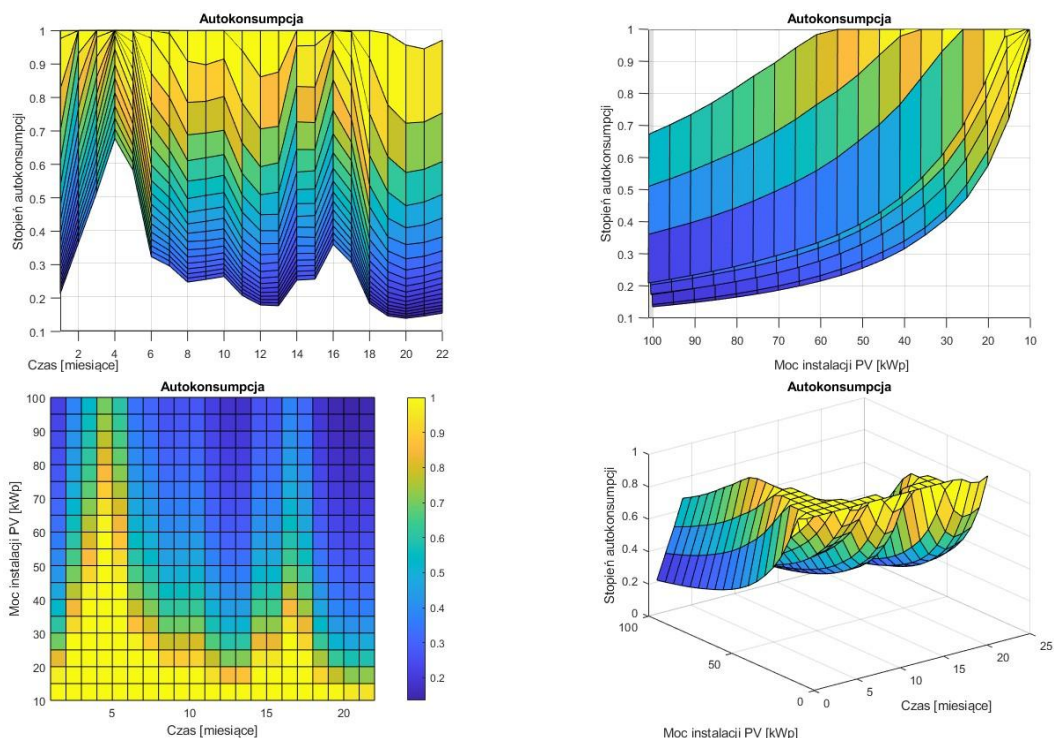
Rys. 51 Średniogodzinowa produkcja energii dla instalacji PV o mocy 50kWp

Na podstawie przedstawionych w poprzednim rozdziale danych obliczono bieżące zużycie energii w trakcie działania instalacji PV. Wyznaczenie tego parametru konieczne jest do wyznaczenia stopni autokonsumpcji oraz niezależności energetycznej. Bieżące zużycie energii obliczono za pomocą algorytmu przedstawionego na Rys. 52. Parametr oznaczony na schemacie blokowym jako A to średniogodzinowe zużycie energii przez obiekt, natomiast B oznacza średniogodzinową produkcję energii przez instalację PV. Bieżące zużycie energii elektrycznej pozyskanej z PV oznaczono jako C.



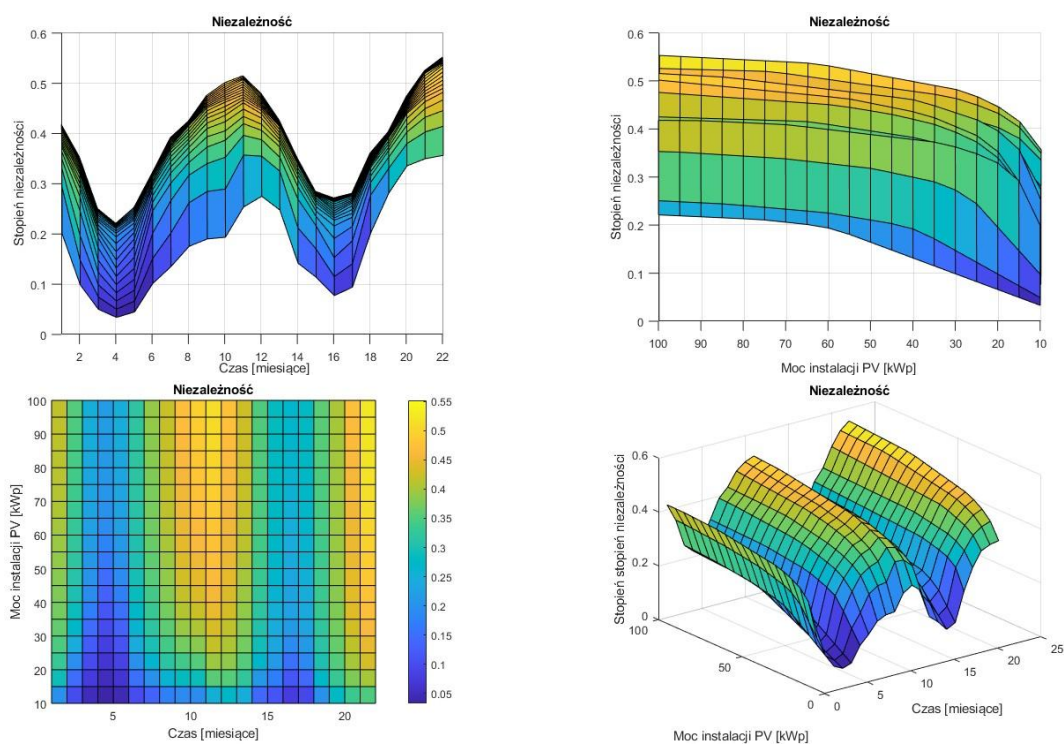
Rys. 52 Algorytm wyznaczania bieżącego zużycia energii

Podczas wyznaczania bieżącego zużycia energii z instalacji PV mogą wystąpić trzy sytuacje. Gdy ilość energii produkowanej z PV jest większa od aktualnego zużycia energii wtedy całość chwilowego zapotrzebowania energetycznego pokryta jest z fotowoltaiki a nadwyżka oddawana do sieci elektroenergetycznej. Druga sytuacja gdy zużycie energii przez obiekt jest większe od produkcji energii z PV wtedy wykorzystywana jest całość energii z fotowoltaiki, a niedobór pobierany jest z sieci. Ostatnia sytuacja występuje w momencie gdy zapotrzebowanie równa się produkcji z PV, wtedy obiekt jest zbilansowany energetycznie.

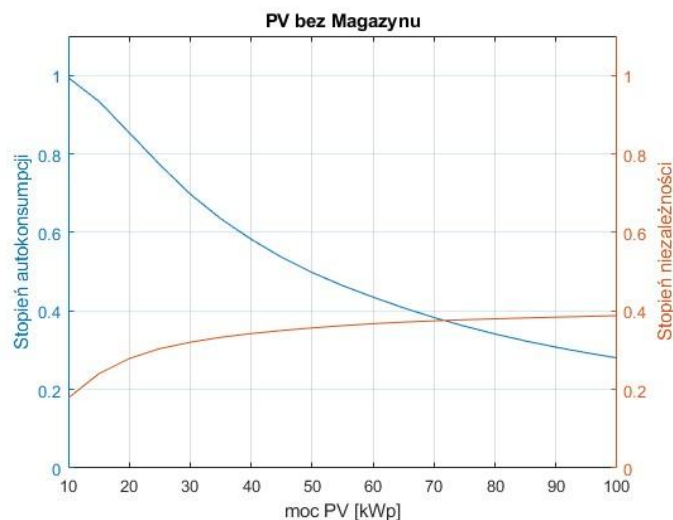


Rys. 53 Stopień autokonsumpcji dla instalacji z przyłączonymi poprzez falownik panelami PV

Następnie wyznaczono stopnie autokonsumpcji (Rys. 53) oraz niezależności energetycznej (Rys. 55). Dodatkowo wyznaczano średnie wartości tych parametrów oraz zestawiono je na Rys. 55. Z przedstawionego na Rys. 55 wykresie wynika, że maksymalny stopień autokonsumpcji bez względu na moc instalacji PV wynosi ok. 40%, natomiast najlepsze parametry autokonsumpcji i niezależności można zauważyć w przypadku instalacji o mocy ok. 70kWp.



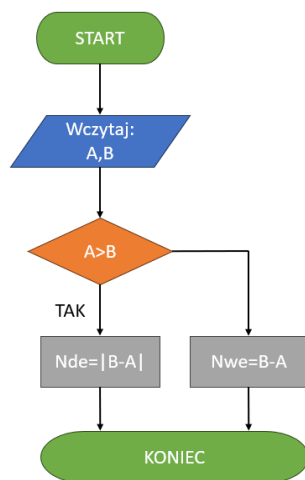
Rys. 54 Stopień niezależności energetycznej dla instalacji z fotowoltaiką



Rys. 55 Autokonsumpcja i niezależność energetyczna dla instalacji z PV

3.2.3. Dobór parametrów magazynów energii

W celu zwiększenia niezależności energetycznej budynku oraz maksymalizacji wykorzystania energii pozyskanej z PV podjęto próbę doboru krótkoterminowego magazynu energii. W pierwszym etapie obliczono nadwyżkę oraz niedobór energii elektrycznej według algorytmu przedstawionego na Rys. 56.

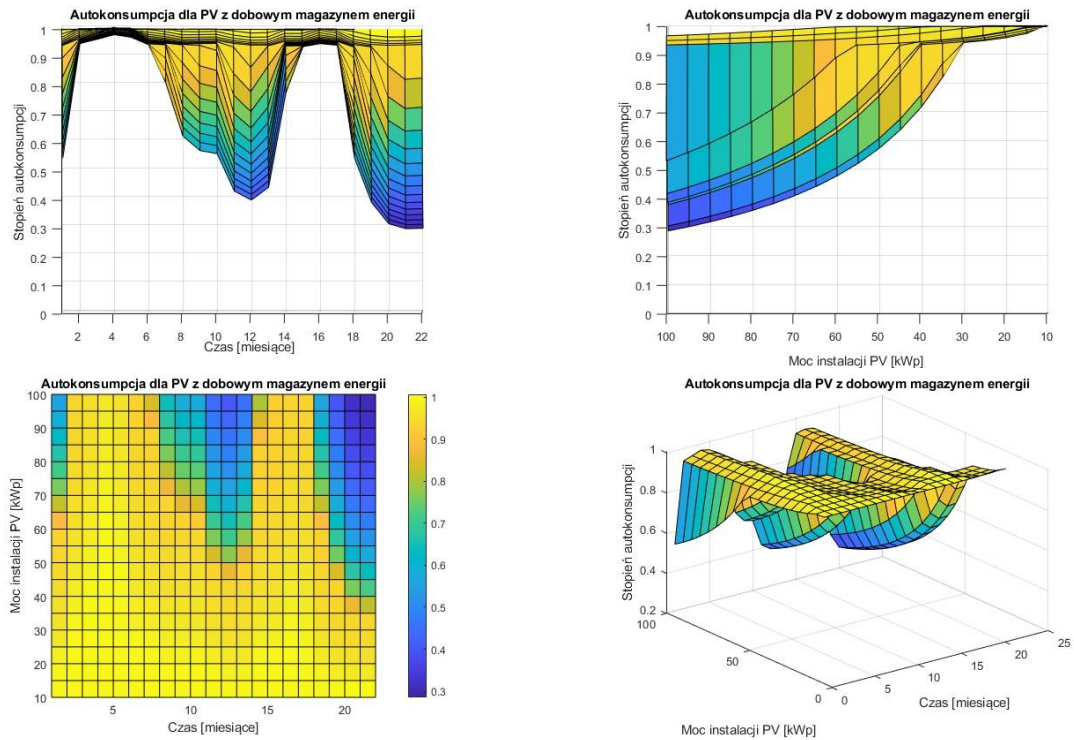


Rys. 56 Algorytm wyznaczenia niedoboru i nadwyżki energii.

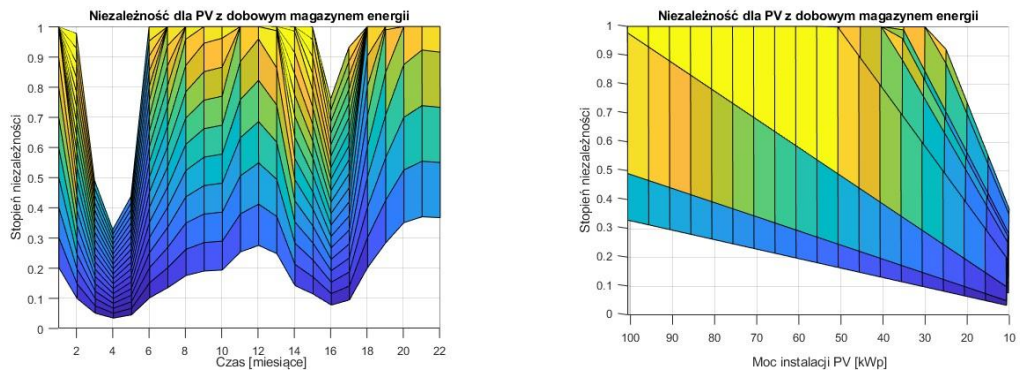
Parametry A i B podobnie jak na Rys. 52 oznaczają zapotrzebowanie i produkcję energii. Nde oznacza niedobór energii, a Nwe oznacza nadwyżkę energii. W kolejnym etapie podjęto próbę wyznaczenia pojemności dobrego magazynu energii umożliwiającego bilansowanie energii w okresie jednego dnia. Dobowy bilans energetyczny to różnica pomiędzy nadwyżką energii z OZE (Nwe), a niedoborem energii (Nde) uwzględniającym sprawność zasobnika energii. Sprawność zasobnika energii μ_{ess} przyjęto na poziomie 80%. Dzienny bilans energetyczny powinien spełniać warunek (6).

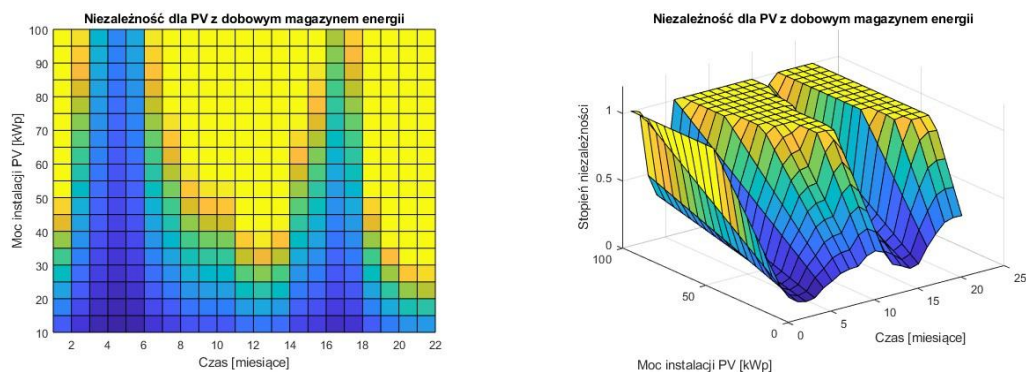
$$N_{we} - \frac{N_{de}}{\mu_{ess}} \geq 0 \quad (6)$$

Następnie wyznaczono stopnie niezależności energetycznej oraz autokonsumpcji dla instalacji elektrycznej akademika “Karolinka” wyposażonego w instalację PV oraz dobowy magazyn energii. Wyniki symulacji przedstawiono za pomocą wykresów Rys. 57, Rys. 58 oraz Rys. 59.

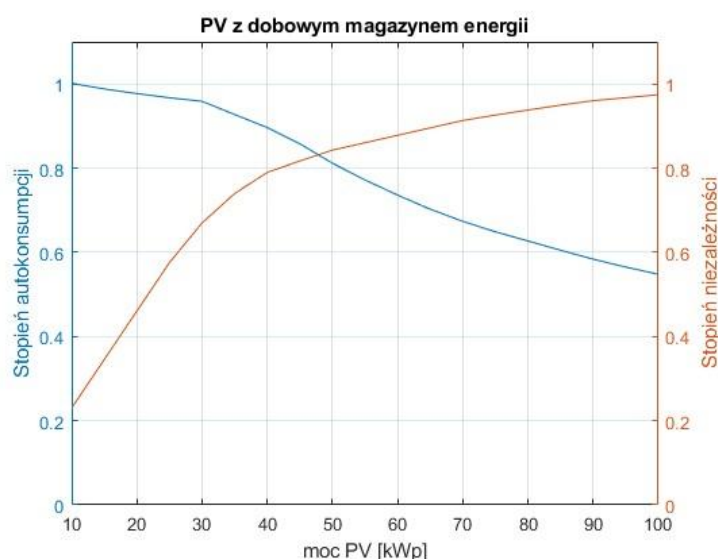


Rys. 57 Stopień autokonsumpcji dla instalacji z PV oraz dobowym magazynem energii.





Rys. 58 Stopień niezależności energetycznej dla instalacji z PV oraz dobowym magazynem



Rys. 59 Autokonsumpcja i niezależność energetyczna dla instalacji z dobowym magazynem energii

Dzięki zastosowaniu dobowego magazynu energii możliwe jest bardziej efektywne zarządzanie energią w obrębie budynku akademika. Zastosowanie dodatkowego magazynu energii umożliwi zwiększenie wykorzystania energii pozyskanej z OZE czego wskaźnikiem jest wyższy stopień autokonsumpcji. Natomiast wyższy stopień niezależności energetycznej oznacza zmniejszenie ilości pobieranej energii z sieci elektroenergetycznej. Niestety w dalszym ciągu nie ma możliwości uzyskanie pełnej niezależności energetycznej obiektu, spowodowane ograniczoną produkcją energii w trakcie części roku. Rozwiązaniem tego problem może być zastosowanie sezonowego magazynu energii umożliwiającego magazynowanie energii w okresie do jednego roku. Analizowany okres ograniczono do jednego roku od lipca 2022 do czerwca 2023. Podobnie jak w przypadku dobowego magazynu energii konieczne było wyznaczenie parametrów nadwyżek i niedoborów energii. Na podstawie uzyskanych danych w poprzednim etapie obliczono nadwyżkę energii dla instalacji PV w skali miesiąca na podstawie wzoru (7).

$$Rnw = (1 - Auto_{ESS})E_{PV,i} \quad (7)$$

Gdzie: Rnw – miesięczna nadwyżka energii, $Auto_{ESS}$ – stopień autokonsumpcji uwzględniający dobowy magazyn energii, $E_{PV,i}$ – miesięczna produkcja energii z PV.

Nadwyżki energii w skali miesiąca oznaczają że bilans energetyczny ma wartość dodatnią, natomiast ujemny wskaźnik występuje w okresach niedoboru energii z instalacji PV i dobowego magazynu energii. Niedobór energii wyznaczony został za pomocą wzoru (8).

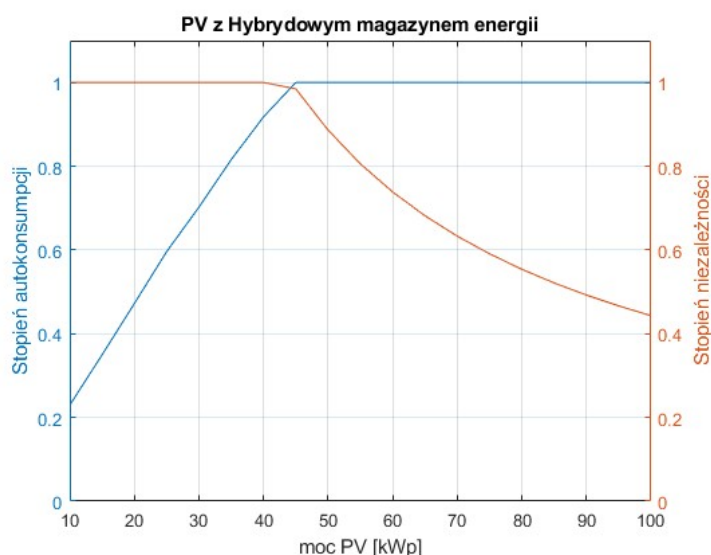
$$End = \frac{(1 - S_{aut}) * A_r}{\mu_{ESS}} \quad (8)$$

Gdzie: End – miesięczny niedobór energii, S_{aut} – stopień niezależności uwzględniający dobowy magazyn energii, A_r – miesięczne zapotrzebowanie na energię elektryczną obiektu.

W celu uzyskania pełnej niezależności energetycznej konieczne jest by różnica pomiędzy nadwyżkami energii a niedoborami uwzględniającymi sprawność sezonowego magazynu energii była większa lub równa 0 co zostało przedstawione we wzorze (9).

$$Enw - End \geq 0 \quad (9)$$

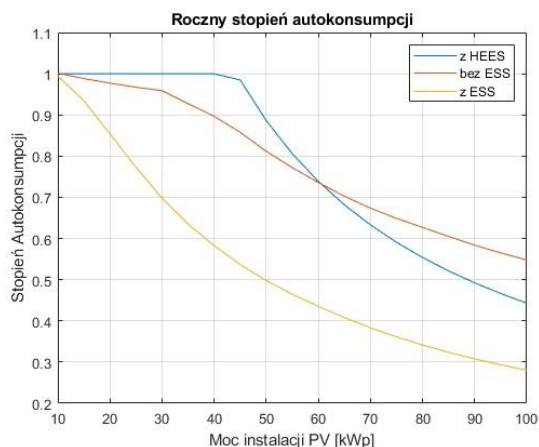
Następnie wyznaczono stopnie niezależności energetycznych oraz stopnie autokonsumpcji dla różnych mocy instalacji PV połączonych z hybrydowym magazynem energii (HESS – Hybrid Energy Storage System) w postaci dobowego i sezonowego magazynu energii (Rys. 60).



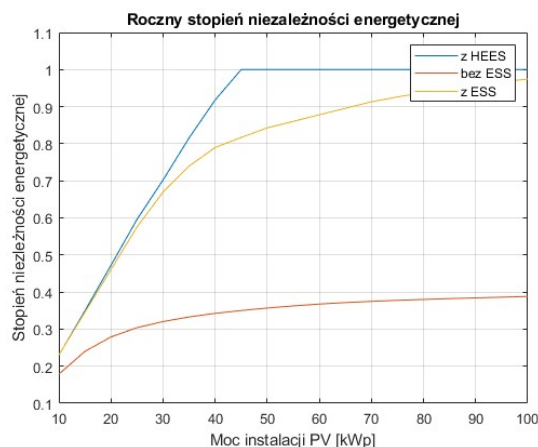
Rys. 60 Stopnie niezależności energetycznej oraz autokonsumpcji dla instalacji z PV i HESS

Z przedstawionych danych wynika, że możliwe jest uzyskanie całkowitej niezależności energetycznej poprzez zastosowanie hybrydowego magazynu energii. Z przedstawionych analiz wynika, że najlepsze

parametry uzyskuje się w przypadku stosowania instalacji PV o mocy ok. 45kWp, jednak sugeruje się zastosowanie instalacji o mocy 50kWp współpracującej z hybrydowym magazynem energii (HESS). Wpływ połączenia instalacji fotowoltaicznej z dobowym magazynem energii (ESS) oraz hybrydowym magazynem energii (HESS) przedstawiono na Rys. 61 oraz Rys. 62.



Rys. 61 Roczny stopień autokonsumpcji



Rys. 62 Roczny stopień niezależności energetycznej

3.2.4. Analiza otrzymanych wyników

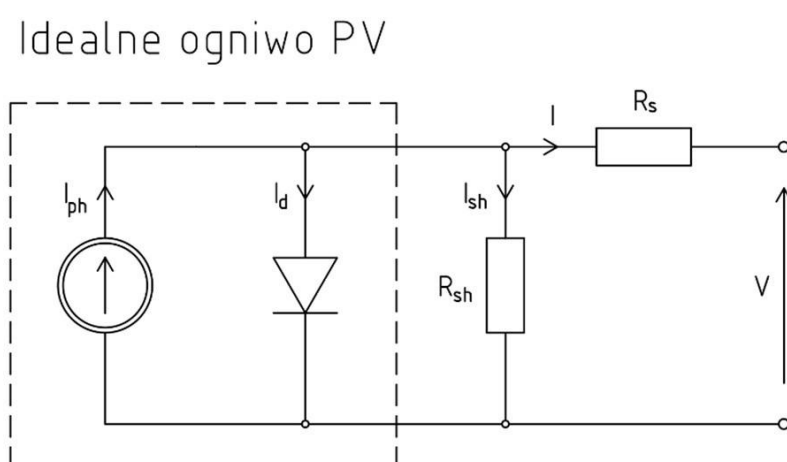
Z przeprowadzonych analiz wynika, że dodanie dodatkowej mikroinstalacji fotowoltaicznej do obecnej instalacji obiektu akademika “Karolinka” umożliwi zmniejszenie kosztów energii elektrycznej. Najlepsze parametry autokonsumpcji i niezależności energetycznej dla instalacji bez dodatkowych zasobników uzyskuje się w przypadku instalacji o mocy ok. 75kWp uzyskując stopień autokonsumpcji 36,12% oraz niezależności energetycznej 37,77%. Zwiększenie tych parametrów możliwe jest dzięki zastosowaniu dobowego magazynu energii. W tym przypadku najlepsze wyniki uzyskuje się w przypadku instalacji o mocy 50kWp wyposażonej w krótkoterminowy zasobnik energii o pojemności ok. 100kWh. Dzięki takiemu połączeniu możliwe jest uzyskanie autokonsumpcji na poziomie 81,1% oraz niezależności energetycznej na poziomie 84,3%. Z przedstawionych danych na wykresie Rys. 59 zauważyć, że możliwe jest uzyskanie w przypadku instalacji o mocy 100kWp oraz krótkoterminowym zasobniku energii o pojemności ok. 90kWh niezależności energetycznej na poziomie 97%. Uzyskanie takiego parametru wiąże się z niską wartością autokonsumpcji (54%), czyli ok. 46% wyprodukowanej przez PV energii zostaje oddana do sieci w postaci nadwyżek. W celu uzyskania pełnej niezależności energii konieczne jest więc zastosowanie długoterminowego magazynu energii połączonego z krótkoterminowym magazynem energii tworząc tym samym hybrydowy zasobnik energii. W takim przypadku najlepsze parametry uzyskuje się przy zastosowaniu instalacji o mocy 45kWp, dobowym magazynie energii o pojemności 100kWh oraz sezonowym zasobniku energii o pojemności ok. 8 MWh. Możliwe jest uzyskanie pełnej niezależności energetycznej od sieci przy równoczesnym wysokim poziomie autokonsumpcji wynoszącym 98%.

4. Model symulacyjny hybrydowego magazynu energii

4.1. Implementacja komponentów instalacji w środowisku symulacyjnym

4.1.1. Panele fotowoltaiczne

Model przedstawiony na Rys. 63 należy do najczęściej stosowanych w analizie charakterystyki prądowo-napięciowej ogniw PV, pozwalając na uwzględnienie zarówno idealnych parametrów pracy, jak i efektów związanych ze stratami rezystancyjnymi oraz upływnością prądu. Model ogniwa PV opiera się na statycznym zachowaniu konwencjonalnej diody półprzewodnikowej z połączeniem P-N. Model ten składa się ze źródła prądu stałego I_{ph} połączonego równolegle z diodą D , rezystancją upływową R_{sh} (rezystancją równoległą) oraz rezystancją szeregową R_s [92][93].



Rys. 63 Schemat zastępczy ogniwa PV

Poprzez zastosowanie metod obliczania obwodów elektrycznych wykorzystujących I prawo Kirchhoffa można wyznaczyć równanie prądu wyjściowego paneli fotowoltaicznych I (10).

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (10)$$

Prąd fotowoltaiczny I_{ph} generowany jest proporcjonalnie do promieniowania słonecznego G_r i jest skorygowany o wpływ temperatury ogniwa T_c . Jego wartość przedstawiono za pomocą wzoru (11).

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G_r}{G_{ref}} \quad (11)$$

Gdzie: I_{ph} - źródło prądu fotowoltaicznego, I_{sc} - prąd zwarcia ogniwa fotowoltaicznego równy 10,3A [94], K_i - współczynnik temperaturowy prądu zwarcia równy +0,0353%/°C [94], T_c - temperatura ogniwa [K], T_{ref} - nominalna temperatura pracy ogniwa 317,15K (44,1°C), G_r - rzeczywiste natężenie promieniowania słonecznego, G_{ref} - promieniowanie słoneczne w warunkach laboratoryjnych 903W/m².

Za pomocą równania Shockleya (12) możliwe jest wyznaczenie prądu płynącego przez diodę w obwodzie zastępczym panelu fotowoltaicznego przedstawionego na Rys. 63.

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot (U_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{\eta \cdot A \cdot k_B \cdot T_c} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

Gdzie: I_d - prąd diody w modelu ogniwa fotowoltaicznego, I_s - prąd nasycenia diody, q - ładunek elementarny ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$), U_{pv} - napięcie na zaciskach ogniwa fotowoltaicznego, R_s - rezystancja szeregową, I_{pv} - prąd elektryczny w schemacie zastępczym ogniwa PV, η - współczynnik idealności diody (zwykle z przedziału 1–2 [95]), A - obszar aktywny diody, związany z konstrukcją ogniwa, k_B - stała Boltzmanna ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), T_c - temperatura ogniwa [K].

Ostatnim elementem równania (10) jest prąd bocznikowy I_{sh} opisujący straty wynikające z przepływu prądu przez rezystancję bocznikową (R_{sh}) ogniwa i można go wyznaczyć za pomocą wzoru (13).

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (13)$$

Rezystancja bocznikowa R_{sh} bezpośrednio wpływa na wartość prądu bocznikowego i odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu strat wynikających z przepływu prądu bocznikowego I_{sh} . Rezystancja bocznikowa R_{sh} jest połączona równolegle do obwodu głównego obwodu prądowego ogniwa fotowoltaicznego, a jej wartość wynika z faktu istnienia defektów struktury materiałów lub innych niedoskonałości konstrukcyjnych.

Rezystancja szeregową (R_s) w obwodzie zastępczym ogniwa fotowoltaicznego reprezentuje straty energii wynikające z ograniczenia przepływu prądu przez wewnętrzne elementy obwodu ogniwa stanowiąc wynik sumę rezystancji materiałów przewodzących, kontaktów elektrycznych oraz złączy półprzewodnikowych.

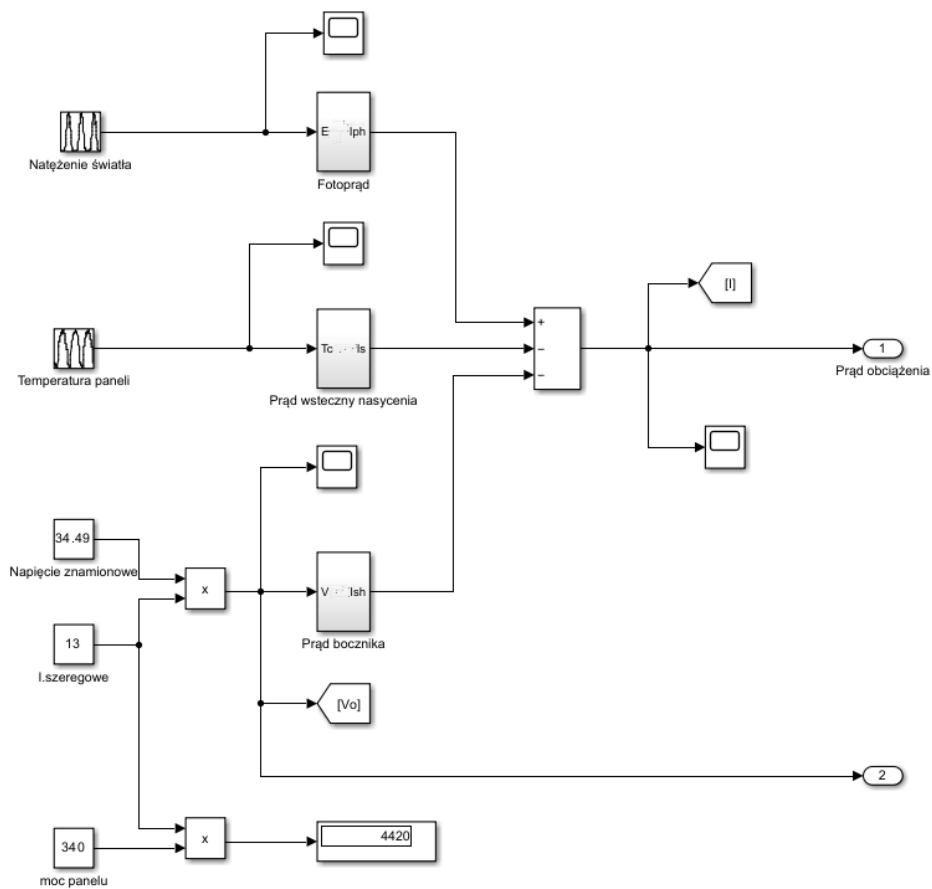
Po uwzględnieniu wszystkich opisanych wcześniej elementów modelu, takich jak prąd generowany (I_{ph}), prąd diody (I_d), prąd bocznikowy (I_{sh}), a także wpływ rezystancji szeregową (R_s) i bocznikowej (R_{sh}), równanie wyjściowe ogniwa fotowoltaicznego można zapisać jako:

$$I = I_{sc} \frac{G_r}{G_{ref}} - I_s \left[\exp \left(\frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{n V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (14)$$

W równaniu (14) uwzględniono parametr napięcia termicznego V_t opisującego zachowanie ładunków w złączu P-N ogniwa PV, wynikający z zależności między temperaturą a energią termiczną cząsteczek co można wyrazić za pomocą wzoru (15).

$$V_t = \frac{k_B \cdot T_c}{q} \quad (15)$$

W kolejnym etapie opracowano model panelu fotowoltaicznego w środowisku Matlab/Simulink (Rys. 64) na podstawie wzoru (14). Model ten składa się z następujących bloków funkcyjnych - danych wejściowych zmierzonych na rzeczywistym obiekcie w postaci natężenia światła oraz temperatury paneli PV, blok fotoprądu (I_{ph}), blok prądu wstecznego nasycenia (I_d) oraz blok prądu bocznika (I_{sh}), dodatkowymi blokami są parametry techniczne paneli PV takie jak napięcie znamionowe, liczba szeregowo połączonych paneli oraz moc znamionowa pojedynczego panelu.

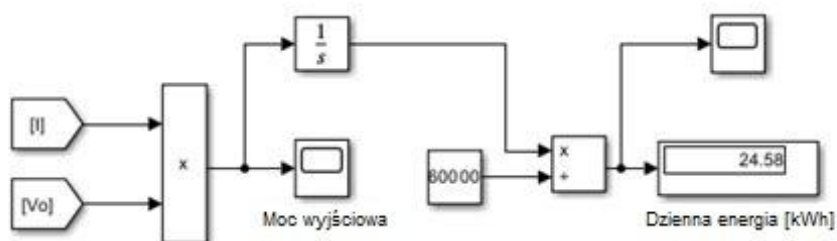


Rys. 64 Schemat implementacji paneli fotowoltaicznych w środowisku MATLAB/ Simulink

Parametry ogniw określono na podstawie ich kart katalogowych [94], które to zestawiono w tabeli – Tab.4 (Tabela 5). Dane dotyczące warunków atmosferycznych, czyli natężenia oświetlenia oraz temperaturę ogniw pozyskano z wcześniej przeprowadzonego bilansu energetycznego. Za obliczenie sumarycznej produkcji energii w ciągu jednego dnia odpowiedzialny jest fragment programu przedstawiony na Rys. 65.

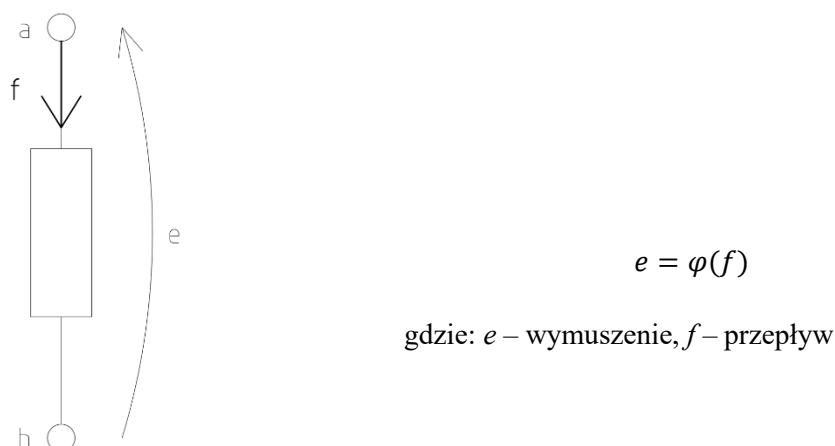
Tabela 5 Podstawowe parametry ogniwa CHSM60M-HC BF 340Wp [94]

Parametr	Symbol	Wartość
Moc maksymalna	$P_{\max}$	340 Wp
Napięcie w punkcie mocy maks.	V_{mp}	34.69 V
Prąd w punkcie mocy maks.	I_{mp}	9.80 A
Napięcie obwodu otwartego	V_{oc}	41.88 V
Prąd zwarcia	I_{sc}	10.30 A
Sprawność modułu	η	20.1%
Moc maksymalna (NOCT)	$P_{\max, \text{NOCT}}$	253.5 Wp
Napięcie w punkcie mocy maks. (NOCT)	$V_{\text{mp, NOCT}}$	32.35 V
Prąd w punkcie mocy maks. (NOCT)	$I_{\text{mp, NOCT}}$	7.84 A
Napięcie obwodu otwartego (NOCT)	$V_{\text{oc, NOCT}}$	39.37 V
Prąd zwarcia (NOCT)	$I_{\text{sc, NOCT}}$	8.28 A
Temperaturowy współczynnik mocy	γ	-0.3438%/°C
Temperaturowy współczynnik prądu zwarcia	$\alpha_{I_{\text{sc}}}$	+0.0353%/°C
Temperaturowy współczynnik napięcia obw. otwartego	$\beta_{V_{\text{oc}}}$	-0.2722%/°C
Nominalna temperatura pracy	NOCT	44±2°C
Maksymalne napięcie systemu	$V_{\text{sys, max}}$	1500 V DC
Liczba diod bocznikowych	-	3
Stopień ochrony	IP	IP67



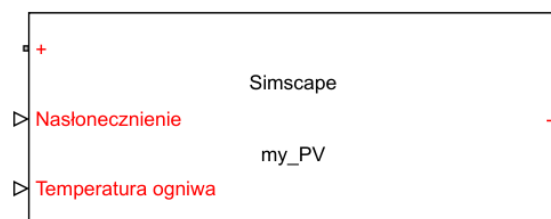
Rys. 65 Schemat blokowy pozwalający na wyznaczenie dziennej produkcji energii

W kolejnym etapie pracy podjęto próbę implementacji ogniwa fotowoltaicznego (PV) z wykorzystaniem grafów przepływu Rys. 66. Metoda ta upraszcza proces implementacji obiektów, przekształcając je do formy, która umożliwia określenie wymuszenia e w funkcji przepływu f .



Rys. 66 Implementacja metody grafów na przykładzie rezystora

Implementację zrealizowano w środowisku Simscape, które jest częścią pakietu Simulink. W tym przypadku, jako zmienną wymuszeniową przyjęto napięcie na ogniwie fotowoltaicznym, a przepływem – prąd generowany przez ogniwo. W celu dokładnego odwzorowania rzeczywistych warunków pracy ogniwa, uwzględniono dwa kluczowe parametry: natężenie promieniowania oraz temperaturę ogniwa, które mają bezpośredni wpływ na jego wydajność. Opracowanie odpowiedniego skryptu w środowisku Simscape umożliwiło zaprojektowanie oraz implementację bloku przedstawionego na Rys. 67, co stanowi podstawę dalszej analizy i symulacji instalacji fotowoltaicznych.

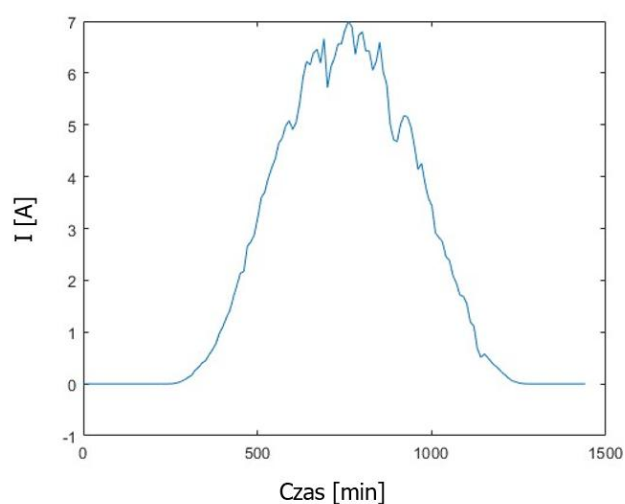


Rys. 67 Implementacja instalacji PV w środowisku MATLAB/Simulink

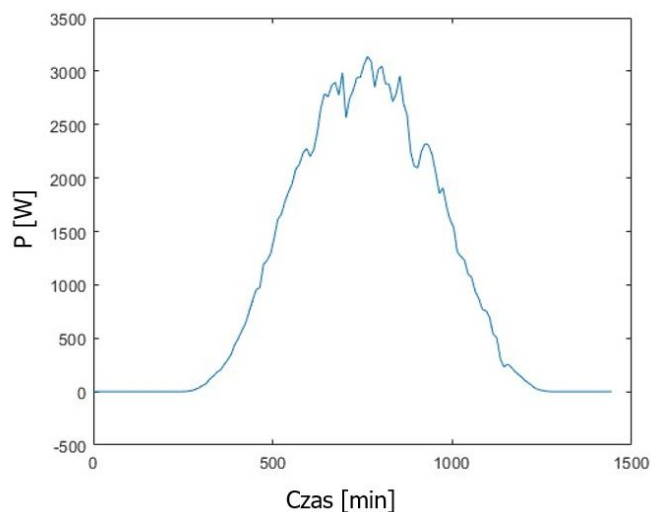
$$I = I_{sc} \frac{G_r}{G_{STC}} + I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{n \frac{k_B T_c}{q}} \right) \right] + \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (16)$$

$$V = V_a - V_b \quad (17)$$

Model instalacji PV opracowano na podstawie wzoru przepływu prądu (16) oraz napięciu na zaciskach paneli PV (17). Napięcie wyznaczono jako różnicę potencjałów pomiędzy pkt. a i pkt. b (patrz Rys. 66). Po przeprowadzeniu wstępnych symulacji otrzymano wstępne wyniki przebiegu prądu (Rys. 68) oraz mocy (Rys. 69).



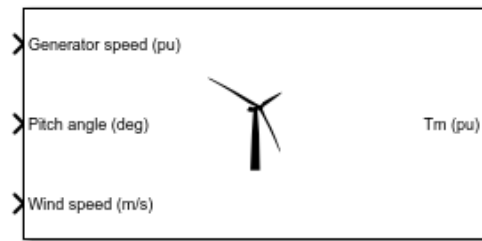
Rys. 68 Wykres przebiegu prądu w instalacji PV



Rys. 69 Wykres przebiegu mocy generowanej na panelach PV

4.1.2. Turbiny wiatrowe

Turbiny wiatrowe to kluczowy element systemów energetyki odnawialnej i drugi co do ilości zainstalowanej mocy OZE w Polsce [97]. Działanie tego typu generatorów polega na przekształcaniu energii kinetycznej wiatru w energię mechaniczną, a następnie w energię elektryczną [98]. Model implementacji opiera się na odwzorowaniu energetycznych charakterystyk turbin wiatrowych w stanie ustalonym. Turbina wiatrowa w Simscape jest modelowana jako system oparty na zależnościach między podsystemami aerodynamicznymi, mechanicznymi oraz elektrycznym i jest reprezentowany w środowisku Matlab/Simulink za pomocą bloku Wind Turbine (Rys. 70).



Rys. 70 Blok wind turbine w środowisku Matlab/Simulink [98]

Blok Wind Turbine służy do modelowania mechanicznej mocy turbiny P_m , zależnej od takich parametrów jak prędkość wiatru, współczynnik efektywności c_p , gęstość powietrza ρ , powierzchnia omiatania turbiny A , stosunek prędkości końcówki łopat do prędkości wiatru λ , oraz kąt nachylenia łopat β .

Zależność ta jest opisana równaniem (18).

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho A_t}{2} \cdot v_{wiatr}^3 \quad (18)$$

Gdzie: P_m - moc mechaniczną turbiny wyrażoną w watach (W), $c_p(\lambda, \beta)$ - współczynnik efektywności zależny od λ i β , ρ - gęstość powietrza w kg/m^3 , A_t - powierzchnią omiatania turbiny w m^2 , v_{wiatr} - prędkość wiatru w m/s .

Współczynnik wydajności c_p opisuje, jaka część dostępnej energii wiatru jest przekształcana w energię mechaniczną. Podczas implementacji bloku Wind Turbine zastosowano wzór (19) dla współczynnika c_p .

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (19)$$

gdzie

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (20)$$

$c_1 = 0,5176$ - skalowanie wartości współczynnika c_p w celu uzyskania jego maksymalnej wartości przy optymalnych parametrach pracy turbiny. $c_2 = 116$ - wpływ stosunku prędkości końcówki łopat λ na współczynnik wydajności c_p . $c_3 = 0,4$ - regulacja wpływu kąta nachylenia łopat β na c_p . $c_4 = 5$ - współczynnik regulujący tłumienie c_p w modelu dla nieoptymalnych parametrów pracy. $c_5 = 21$ - czynnik wykładniczy opisujący zmniejszanie się efektywności przy bardzo wysokich prędkościach wiatru lub ekstremalnych wartościach λ . $c_6 = 0,0068$ - korekta liniowa mająca na celu precyzyjne dopasowanie modelu do danych empirycznych.

Dobór tych współczynników wynika z analizy danych eksperymentalnych dotyczących pracy turbin wiatrowych oraz ich charakterystyk aerodynamicznych. Współczynniki te zapewniają, że model $c_p(\lambda, \beta)$ dokładnie odwzorowuje rzeczywiste zachowanie turbin w różnych warunkach [100]. Maksymalna wydajność $c_{p,max} = 0,48$ przy $\beta = 0^\circ$ oraz $\lambda = 8,1$.

W modelu Simulink dla turbiny wiatrowej, struktura składa się z trzech podstawowych wejść:

- **Prędkość generatora ($\omega_{r,pu}$)** – wyrażona w jednostkach względnych (pu), gdzie prędkość generatora jest znormalizowana względem nominalnej prędkości generatora. Jest to kluczowy parametr do określenia mocy mechanicznej generowanej przez turbinę w zależności od prędkości obrotowej.
- **Kąt nachylenia łopat (β)** – w stopniach. Kąt ten wpływa na wydajność turbiny, modyfikując stosunek prędkości końcówki łopat do prędkości wiatru, co w konsekwencji ma wpływ na współczynnik wydajności c_p .
- **Prędkość wiatru (v_{wiatr})** – wyrażona w m/s. Prędkość wiatru jest jednym z najistotniejszych parametrów, który określa ilość dostępnej energii kinetycznej do przekształcenia w energię mechaniczną.

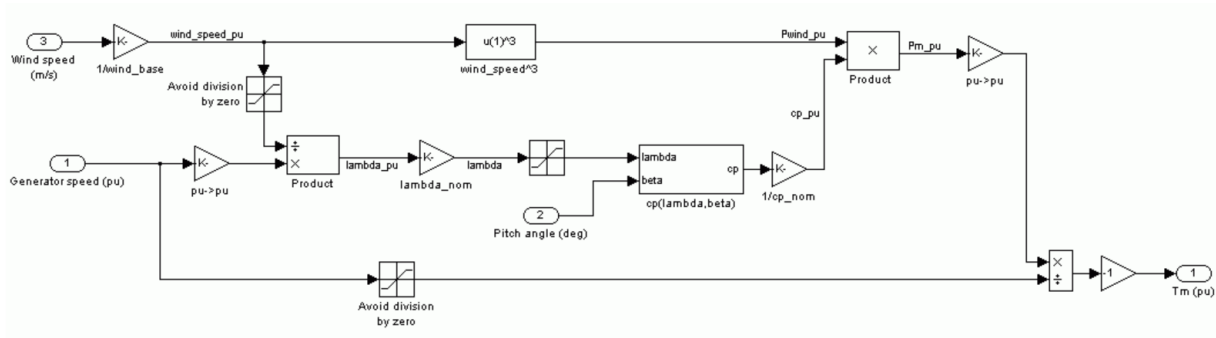
Na wyjściu modelu znajduje się moment mechaniczny T_m , wyrażony w jednostkach względnych (pu). Jest to parametr, który określa moment obrotowy generowany przez turbinę na wale generatora w zależności od wymienionych wejść.

Prędkość końcówki łopat λ jest obliczana na podstawie wzoru, w którym jest iloraz prędkości obrotowej generatora $\omega_{r,pu}$ i prędkości wiatru $v_{wiatr,pu}$ znormalizowanych względem odpowiednich bazowych prędkości, co umożliwia uzyskanie parametru w jednostkach względnych.

$$\lambda = \frac{\omega_{r,pu}}{v_{wiatr,pu}} \quad (21)$$

Model ten opiera się na zasadzie działania turbin wiatrowych, w której wejścia związane z fizycznymi parametrami generatora i warunkami wiatrowymi wpływają na wyjściowy moment, a tym samym na wydajność systemu. Odpowiednie parametryzowanie tych zmiennych umożliwia dokładne odwzorowanie pracy turbiny w różnych warunkach.

Widok schematu w środowisku Matlab/Simulink przedstawiona na Rys. 71. Model umożliwia generowanie wykresów zależności mocy od prędkości generatora, dla różnych prędkości wiatru i kątów nachylenia łopat.

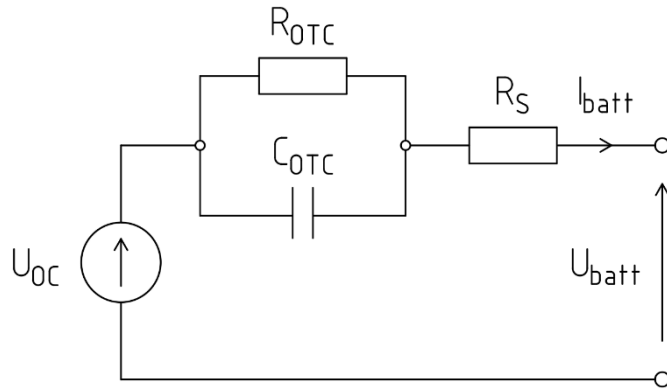


Rys. 71 Schemat turbin wiatrowych w środowisku Matlab/Simulink [98].

4.1.3. Baterie litowe

Akumulatory litowo-jonowe (Li-Ion) to obecnie jedne z najczęściej wykorzystywanych zasobników energii w obszarze urządzeń elektronicznych, pojazdów elektrycznych oraz systemów magazynowania energii. Popularność tej technologii wynika w głównej mierze z wysokiej gęstości energii, długiego czasu eksploatacji oraz niewielkiego efektu pamięci. W trakcie implementacji akumulatorów Li-Ion konieczne było uwzględnienie wielu czynników, takich jak zmieniające się napięcie nominalne, pojemność, wpływ temperatury oraz dynamiczne zmiany zachodzące w trakcie procesów ładowania i rozładowania. W praktyce, w celu symulowania dynamiki akumulatora oraz zmian jego parametrów w trakcie pracy, najczęściej stosuje się modele oparte na obwodach Thevenina.

W celu modelowania pracy akumulatorów litowo-jonowych w różnych warunkach, powszechnie stosuje się modele obwodowe oparte na schematach zastępczych RLC. Modele te odwzorowują zarówno odpowiedź dynamiczną baterii, jak i procesy fizyczne zachodzące wewnątrz ogniw. Podstawowy model pierwszego rzędu (RC) uwzględnia źródło napięcia otwartego (U_{OC}), rezystancję szeregową (R_s) oraz równoległe połączenie rezystora (R_{OTC}) i kondensatora (C_{OTC}), które symulują dynamikę elektrochemiczną. Schemat zastępczy modelu ogniwa pierwszego rzędu przedstawiono na Rys. 72, natomiast odpowiedź modelu można opisać równaniami (22) oraz (23) [101].



Rys. 72 Schemat zastępczy ogniwa Li-Ion[102]

$$\frac{dU_{OTC}}{dt} = \frac{-1}{R_{OTC} \cdot C_{OTM}} U_{OTC} + \frac{1}{C_{OTM}} i_{batt} \quad (22)$$

$$U_{batt} = U_{OC} - U_{OTC} - R_S i_{batt} \quad (23)$$

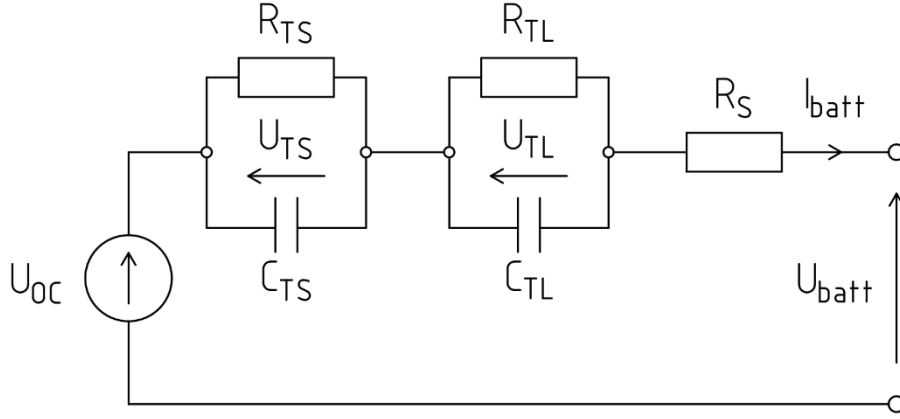
Gdzie: U_{OTC} – napięcie gałęzi RC, R_{OTC} – rezystancja w gałęzi RC, C_{OTC} – pojemność w gałęzi RC, R_S – rezystancja szeregowa, t – czas, i_{batt} – prąd płynący przez ogniwo, U_{batt} – napięcie na zaciskach ogniwa, U_{OC} – napięcie obwodu otwartego.

Napięcie obwodu otwartego (U_{OC}) wynika z stanu naładowania akumulatora (SOC) wyznaczanego z zależności (24).

$$SOC = 1 - \frac{\int_0^\tau i_m(t) dt}{C(0,T)} \quad (24)$$

Gdzie: $C(0,T)$ – pojemność nieobciążonego akumulatora, T – temperatura nieobciążonego akumulatora, τ – łączny czas analizy

W celu bardziej dokładnego odwzorowania działania ogniwa litowego stosuje się schemat zastępczy z większą ilością gałęzi RC o różnych stałych czasowych (Rys. 73), który można opisać za pomocą równań (25), (26), (27).



Rys. 73 Schemat zastępczy ogniwa Li-Ion z dwoma gałęziami RC[102]

$$\frac{dU_{TS}}{dt} = \frac{-1}{R_{TS} \cdot C_{TS}} \cdot U_{TS} + \frac{1}{C_{TS}} \cdot i_{batt} \quad (25)$$

$$\frac{dU_{TL}}{dt} = \frac{-1}{R_{TL} \cdot C_{TL}} \cdot U_{TL} + \frac{1}{C_{TL}} \cdot i_{batt} \quad (26)$$

$$U_{batt} = U_{OC} - U_{TS} - U_{TL} - R_S i_{batt} \quad (27)$$

Gdzie: R_{TS} – rezystancja związana z odpowiedzią o charakterze krótkotrwałym, C_{TS} – pojemność związana z odpowiedzią o charakterze krótkotrwałym, R_{TL} – rezystancja związana z odpowiedzią o charakterze długotrwałym, C_{TL} – pojemność związana z odpowiedzią o charakterze długotrwałym.

W trakcie modelowania ogniw litowych należy również uwzględnić zjawiska związane z procesem starzenia się ogniw prowadzącego do stopniowego pogorszenia ich parametrów elektrycznych, przede wszystkim pojemności (C) i wzrostu rezystancji wewnętrznej (R_{int}). Pojemność akumulatora zmniejsza się wraz z liczbą wykonanych cykli pracy, co wynika z degradacji chemicznej elektrod oraz utraty aktywnego materiału. Przyjmuje się, że akumulator nadaje się do użytku do momentu, gdy jego pojemność spadnie do 80% wartości początkowej. Ten poziom określany jest jako SOH (state of health), natomiast osiągnięcie tego stanu oznacza koniec życia akumulatora EOL (End of Life). Zależność pomiędzy utratą pojemności akumulatora w funkcji czasu określana jest za pomocą wzoru (28).

$$C(n) = C_{BOL} - \varepsilon(n)(C_{BOL} - C_{EOL}) \quad (28)$$

Gdzie: C_{BOL} – pojemność nowej baterii, C_{EOL} – pojemność wyeksploatowanej baterii, ε – współczynnik starzenia w zakresie od 0 do 1, gdzie 0 oznacza baterię o pełnej pojemności, natomiast 1 oznacza całkowicie wyeksploatowaną baterię, n – liczba cykli.

Współczynnik starzenia $\varepsilon(n)$ zmienia się w sposób zależny od liczby cykli oraz głębokości rozładowania (DOD *Depth of Discharge*) i można go opisać za pomocą równania (29).

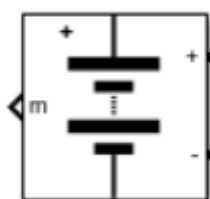
$$\varepsilon(n) = \varepsilon(n-1) + \frac{0,5}{N(n-1)} \cdot \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) \quad (29)$$

Gdzie $N(n)$ oznacza maksymalną liczbę cykli pracy dla danego stopnia rozładowania na podstawie parametrów takich jak temperatura otoczenia (T_a) oraz wartości prądów ładowania i rozładowania (I_{CH} i I_D), co można wyrazić za pomocą zależności (30).

$$N(n) = H \cdot \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^\xi \cdot e^{-\psi \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{na}} \right)} (I_D(n))^{-\gamma_1} \cdot (I_{CH}(n))^{\gamma_2} \quad (30)$$

Gdzie: H - stała zależna od liczby cykli, ξ – współczynnik charakterystyczny dla danego rodzaju akumulatora, Ψ - stała Arrheniusa, T_a – temperatura otoczenia, T_{na} – temperatura nominalna ogniwa, I_{CH} - średnia wartość prądu ładowania, I_D – średnia wartość prądu rozładowania, γ_1 – współczynnik dla prądu rozładowania, γ_2 – współczynnik dla danego prądu ładowania [102].

W środowisku MATLAB/SIMULINK wykorzystującym narzędzie Simscape Electrical baterie ogniw litowych (Li-Ion) reprezentowane są za pomocą bloku „BATTERY” (Rys. 74). Blok składa się z dwóch terminali elektrycznych „+” oraz „-” oraz wektora parametrów wyjściowych „m”. Wektor „m” zawiera następujące parametry: temperaturę baterii, SOC (state of charge) wartość prądu oraz napięcia baterii, żywotność, maksymalną pojemność oraz temperaturę otoczenia.

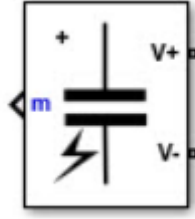


Rys. 74 Blok BATTERY w środowisku MATLAB/Simulink [104]

4.1.4. Superkondensatory

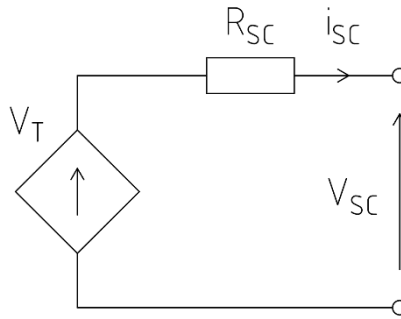
Superkondensatory to urządzenia do magazynowania energii, które łączą cechy kondensatorów i akumulatorów. Charakteryzują się wyjątkowo dużą gęstością mocy, krótkimi czasami ładowania i rozładowania oraz długą żywotnością, która może przekraczać 100 000 cykli.

Blok „Supercapacitor” dostępny w Simscape (Rys. 75) implementuje uniwersalny model superkondensatora, który odwzorowuje zarówno zachowanie dynamiczne, jak i statyczne urządzenia.



Rys. 75 Blok SUPERCAPACITOR w środowisku MATLAB/Simulink [105]

Na Rys. 76 przedstawiono uproszczony schemat zastępczy superkondensatora składającego się z sterowanego źródła napięciowego V_T oraz szeregowej rezystancji wewnętrznej superkondensatora (R_{SC}).



Rys. 76 Schemat zastępczy superkondensatora

$$V_{SC} = V_T - R_{SC} \cdot i_{SC} \quad (31)$$

Model wykorzystuje równanie Sterna (32), które opisuje napięcie wyjściowe superkondensatora jako funkcję ładunku elektrycznego i parametrów materiałowych.

$$V_{SC} = N_s \frac{Q_T d}{N_p N_e \epsilon \epsilon_0 A_i} + 2 N_e N_s \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{Q_T}{2 N_p N_e A_i \sqrt{8 RT \epsilon \epsilon_0 c}} \right) - R_{SC} \cdot i_{SC} \quad (32)$$

Gdzie: A_i - Powierzchnia międzyfazowa między elektrodami a elektrolitem [m^2], C_T – pojemność całkowita [F], c – Stężenie molowe (mol/m^3) wyrażone wzorem (33), F – Stała Faradaya, i_{SC} – prąd obwodu superkondensatora, V_{SC} – napięcie na zaciskach superkondensatora, R_{SC} – Całkowita rezystancja, N_e – Liczba warstw elektrod, N_p - Liczba superkondensatorów połączonych równolegle, N_s - Liczba superkondensatorów połączonych szeregowo, Q_T – Ładunek elektryczny wyrażony wzorem (34), R – Stała gazowa, d – promień cząstkowy, T – temperatura pracy, ϵ – przenikalność materiału, ϵ_0 – przenikalność materiału próżni.

$$c = \frac{1}{8 \cdot N_A \cdot r^3} \quad (33)$$

gdzie: r – promień cząstkowy, N_A - Stała Avogadra,

$$Q_T = \int i_{SC} dt \quad (34)$$

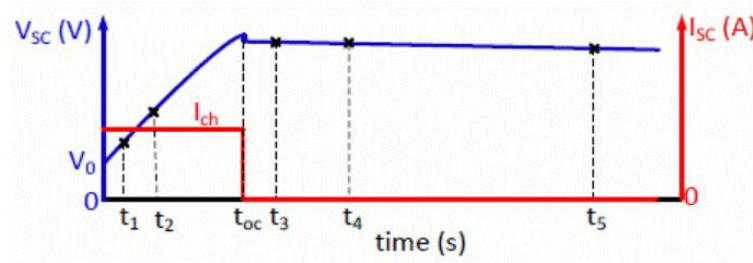
Aby odwzorować zjawisko samorozładowania, wartość ładunku elektrycznego superkondensatora zostaje odpowiednio zmieniona, gdy $i_{SC}=0$:

$$Q_T = \int i_{self-dis} dt \quad (35)$$

Gdzie $i_{self-dis}$ oznacza prąd samorozładowania wyznaczany za pośrednictwem poniższych zależności:

$$i_{self-dis} = \begin{cases} \frac{C_T \alpha_1}{1+sR_{SC}C_T} & \text{jeśli } t - t_{oc} \leq t_3 \\ \frac{C_T \alpha_2}{1+sR_{SC}C_T} & \text{jeśli } t_3 < t - t_{oc} \leq t_4 \\ \frac{C_T \alpha_3}{1+sR_{SC}C_T} & \text{jeśli } t - t_{oc} > t_4 \end{cases} \quad (36)$$

Stałe α_1 , α_2 , α_3 opisują tempo zmian napięcia superkondensatora w odpowiednich przedziałach czasowych: (t_{oc}, t_3) , (t_3, t_4) oraz (t_4, t_5) co zostało przedstawiono na Rys. 77.

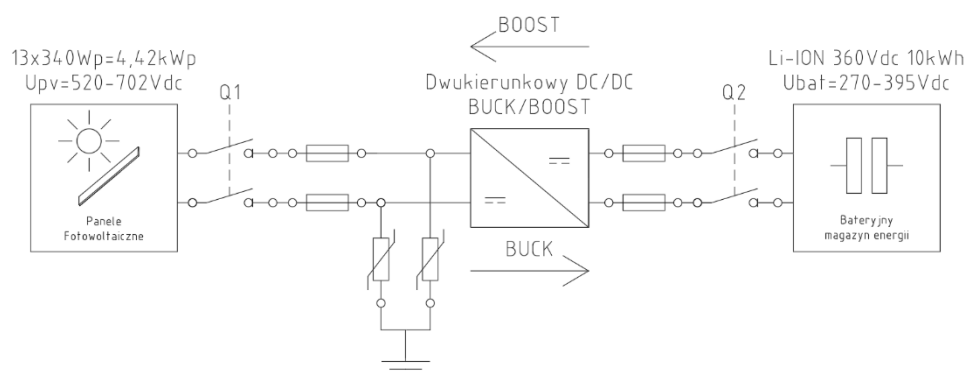


Rys. 77 Wykres zmian napięcia podczas samorozładowania[105]

Podsumowując model może być użyty do symulacji w systemach hybrydowych, takich jak połączenie superkondensatora z akumulatorem za pomocą przekształtników DC-DC (np. topologia buck/boost). Taki system pozwala na efektywne zarządzanie przepływem energii, gdzie superkondensator dostarcza moc w stanach przejściowych. Dzięki parametryzacji model można dopasować do różnych typów superkondensatorów i warunków pracy.

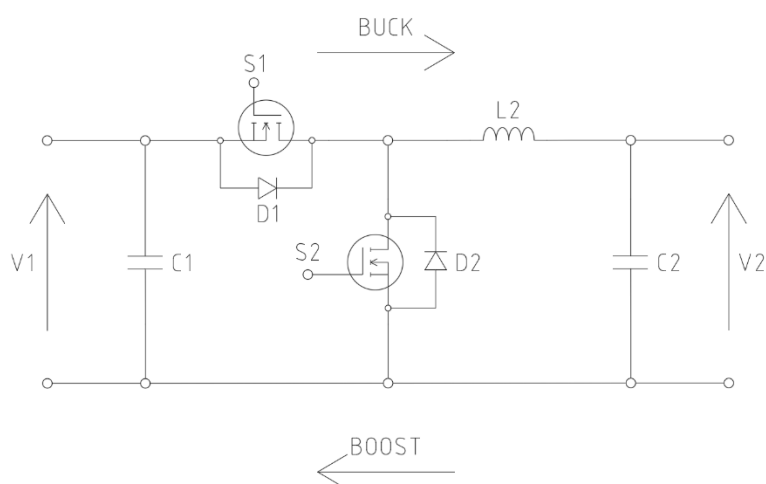
4.2. Integracja poszczególnych elementów w ramach hybrydowego zasobnika energii

W kolejnym etapie przystąpiono do integracji zaimplementowanych w rozdziale 4.1 elementów w ramach układu hybrydowego zasobnika energii. Modelowanie i analizy prowadzono etapowo stopniowo zwiększając ilość elementów i stopień skomplikowania układu. W pierwszym etapie przystąpiono do projektu i analizy na podstawie badań symulacyjnych przekształtnika dwukierunkowego BUCK/BOOST w środowisku MATLAB Simulink z wykorzystaniem narzędzi SIMSCAPE. Na Rys. 73 przedstawiono podstawowy schemat składający się z źródła energii w postaci paneli fotowoltaicznych, baterii litowo-jonowych oraz przetwornika DC-DC buck/boost.



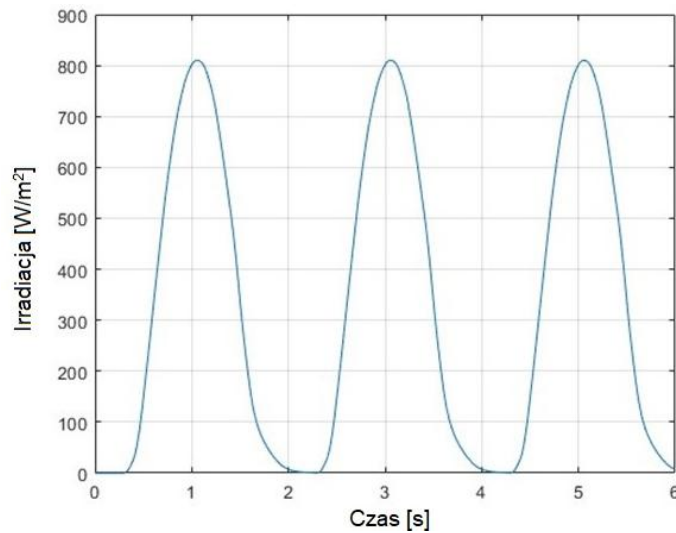
Rys. 78 Układ oparty na dwukierunkowym przekształtniku BUCK/BOOST

Następnie wykorzystując zaimplementowane elementy utworzono model zgodnie z schematem na Rys. 78. Przedstawiony na Rys. 79 schemat opracowany został na podstawie dostępnych w literaturze rozwiązań [106]. Poszczególne elementy takie jak generator PV, litowy magazyn energii, tranzystory, kondensatory i cewki pobrane zostały z biblioteki SIMSCAPE ELECTRICAL.



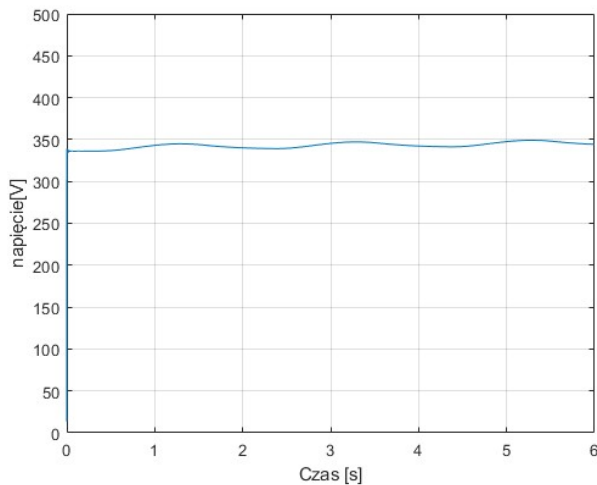
Rys. 79 Schemat dwukierunkowego przetwornika BUCK/BOOST

Wymuszeniem dla generatora fotowoltaiki jest rzeczywisty przebieg irradacji pozyskany w trakcie poprzednich zadań. Wykres natężenia słonecznego przedstawiono na Rys. 80.

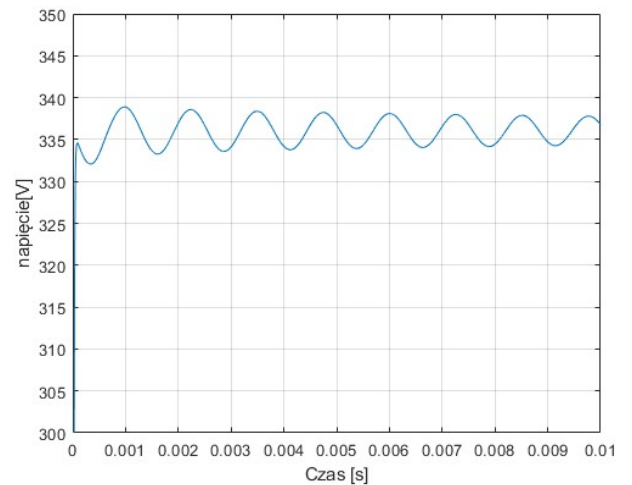


Rys. 80 Wykres zmian natężenia nasłonecznienia

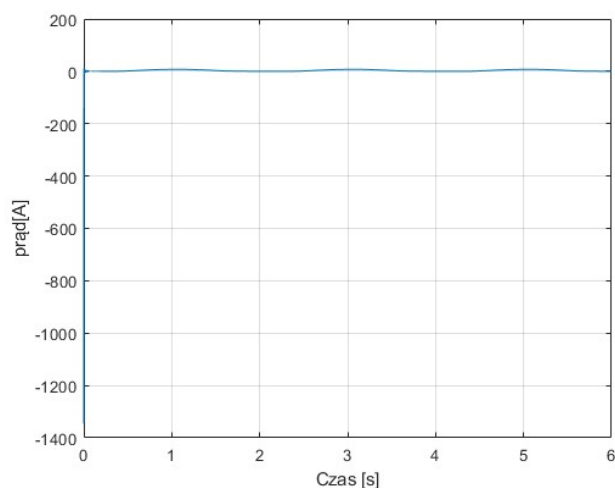
Parametry elementów C1, C2, L2 w początkowym etapie badań symulacyjnych zostały dobrane zgodnie ze wskazaniem dotyczącym projektowania tego typu przekształtników [107]. Po przeprowadzonej symulacji zauważono znaczący pik prądowy osiągający wartość ok. 1400A oraz oscylacje wartości napięcia na poziomie max. 5V. Wyniki symulacji przedstawiono za pomocą wykresów przedstawionych na Rys. 81, Rys. 82, Rys. 83, Rys. 84.



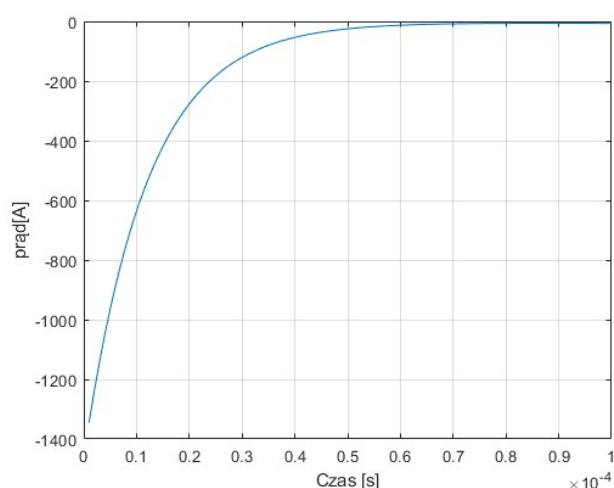
Rys. 81 Wykres zmian napięcia na wyjściu układu w trakcie całej symulacji



Rys. 82 Wykres zmian napięcia na wyjściu układu w przedziale czasowym 0-0,01s

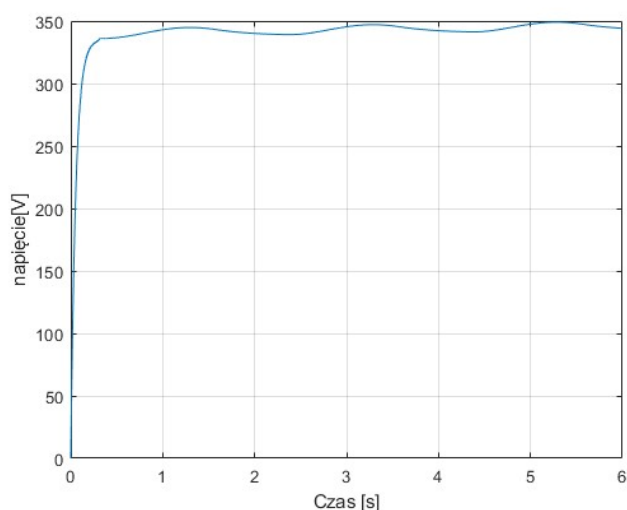


Rys. 83 Wykres zmian prądu na wyjściu układu w trakcie całej symulacji

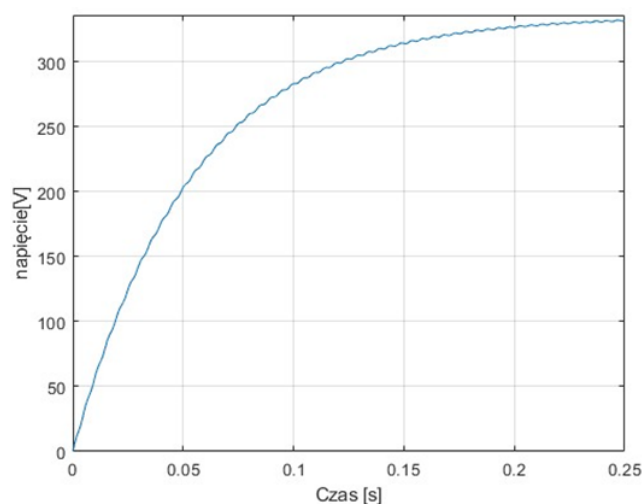


Rys. 84 Wykres zmian napięcia na wyjściu układu w przedziale czasowym $0-1 \cdot 10^{-4}s$

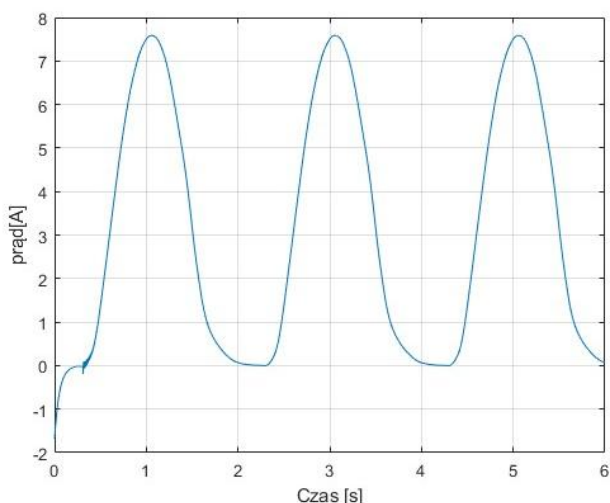
W kolejnym etapie przeprowadzono proces kalibracji elementów przetwornika BUCK/BOOST, kierując się zasadami projektowania układów energoelektronicznych tego typu [108]. Wartość indukcyjności L_2 została stopniowo zwiększona z wartości początkowej $8000 \mu H$ do $15\,000 \mu H$ w celu ograniczenia tętnień prądu. Analogicznie, pojemność kondensatora C_2 zwiększono z $180 \mu F$ do $220 \mu F$, a pojemność kondensatora C_1 – z $38 \mu F$ do $50 \mu F$, w obu przypadkach w celu redukcji tętnień napięcia na wyjściu układu. Dodatkowo dodano rezystor wstępnego ładowania w celu ograniczenia piku prądowego w momencie załączenia układu. Następnie powtórzono symulację otrzymując następujące wyniki przebiegów prądu i napięcia na wyjściu układu przedstawione na Rys. 85, Rys. 86, Rys. 87, Rys. 88. Dzięki zastosowanym mechanizmom możliwa było zredukowanie piku prądowego w trakcie załączenia układu do poziomu ok. 2A oraz zredukowano oscylacje napięcia do poziomu 0.2V.



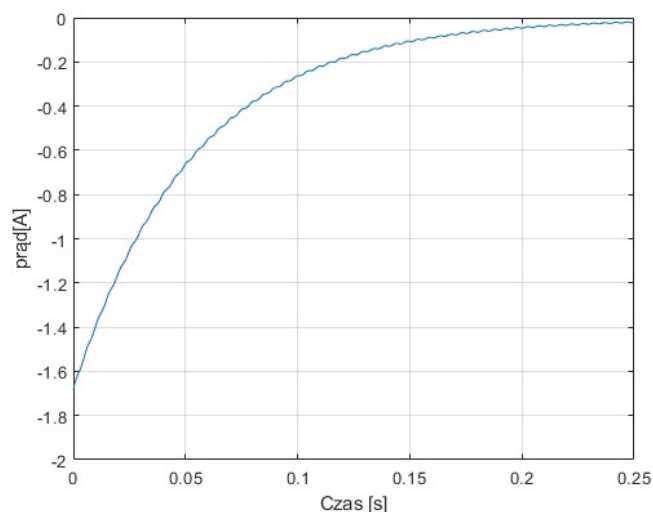
Rys. 85 Wykres zmian na wyjściu układu w trakcie całej symulacji



Rys. 86 Wykres zmian napięcia na wyjściu układu w przedziale czasowym $0-0.25s$



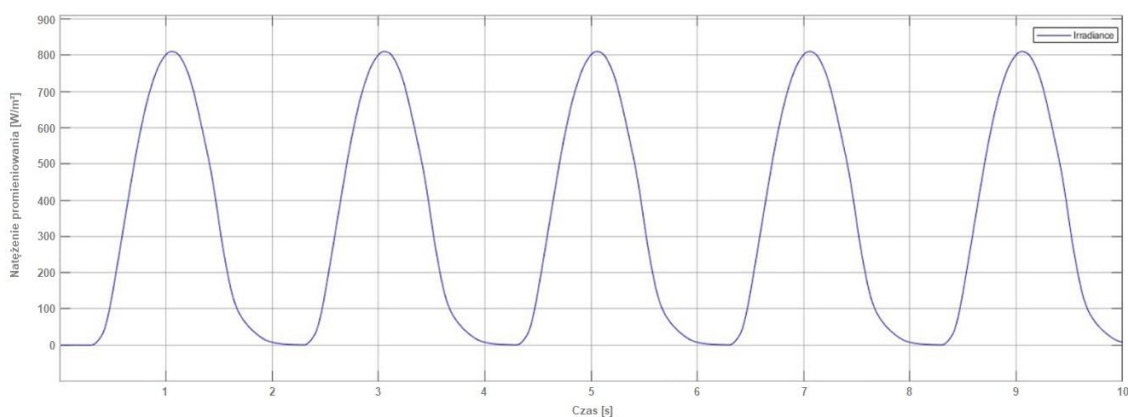
Rys. 87 Wykres zmian prądu na wyjściu układu w trakcie całej symulacji



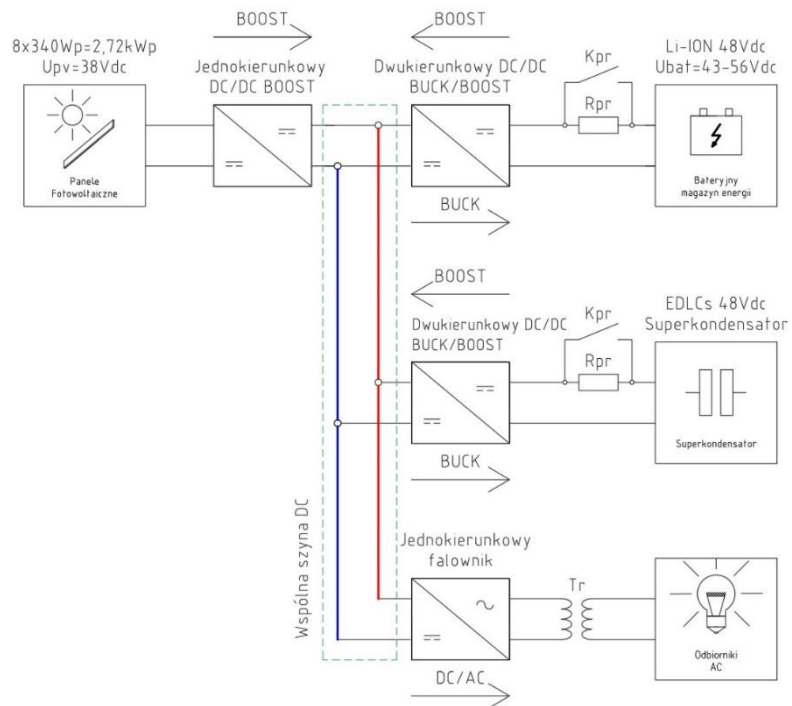
Rys. 88 Wykres zmian prądu na wyjściu układu w przedziale czasowym 0-0.25s

Następnie rozszerzono model o kolejne elementy takie jak pakiet superkondensatorów oraz falownik umożliwiający zasilanie odbiorników prądu zmiennego. Korzystając z doświadczeń zdobytych w poprzednich etapach na wyjściu/wejściu magazynów energii zastosowano układy wstępnego ładowania, natomiast na wyjściu falownika umieszczono transformator umożliwiający dostosowanie napięcia na wyjściu inwertera do poziomu 230V AC. W kolejnych etapach przeprowadzono szereg symulacji umożliwiających dobór najlepszych parametrów. Zaimplementowany w środowisku MATLAB/Simulink model przedstawiono na Rys. 90, natomiast na Rys. 89 przedstawiono dane wejściowe natężenia promieniowania słonecznego wykorzystane w modelu.

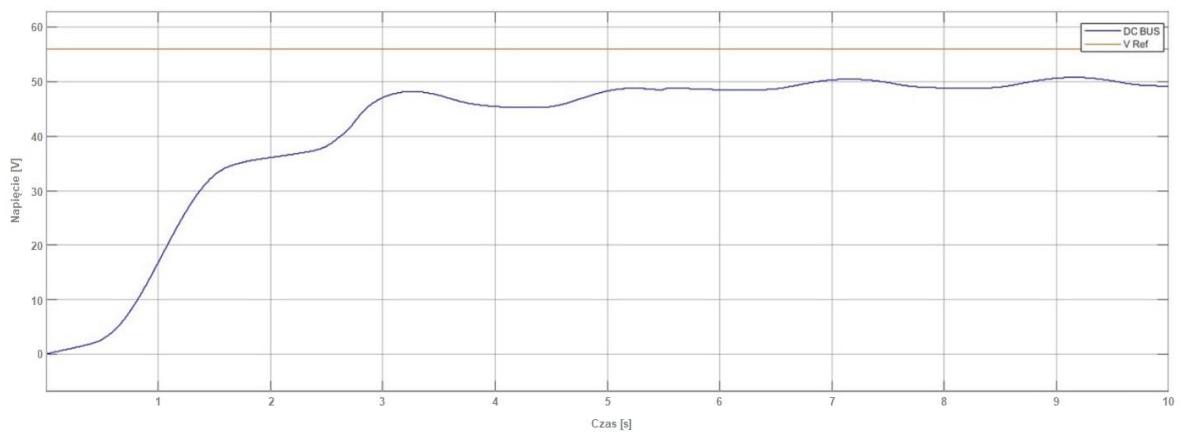
Na Rys. 91, Rys. 93, Rys. 94 przedstawiono wykresy prądów i napięć na baterijnym magazynie energii oraz pakiecie superkondensatorów. W dalszym ciągu widoczne są piki prądowe szczególnie podczas działania pakietu super kondensatorów. Pik prądowy spowodowany przez baterię superkondensatorów spowodował również niestabilność w oddawaniu mocy przez instalację PV. Zmiany parametru SOC zarówno dla superkondensatorów jak również dla baterii litowych przedstawiono na Rys. 92



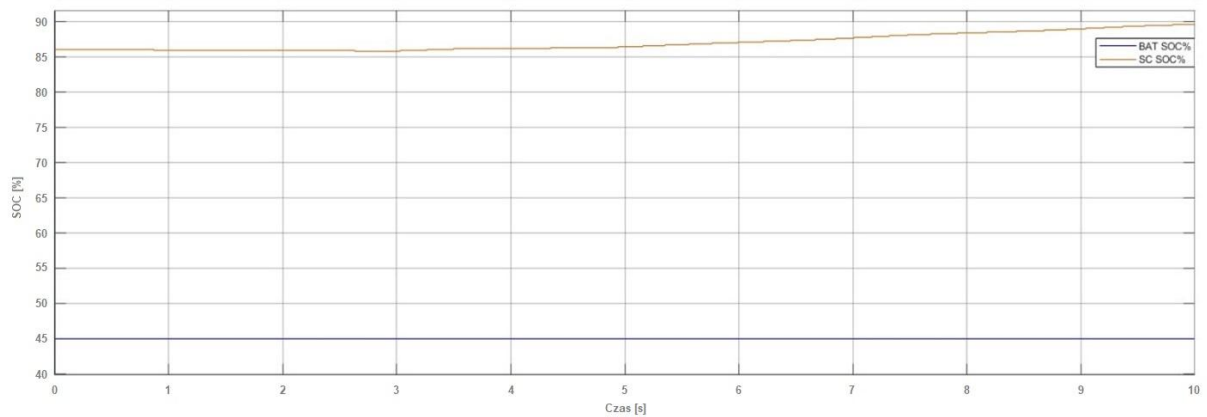
Rys. 89 Wykres natężenia promieniowania słonecznego



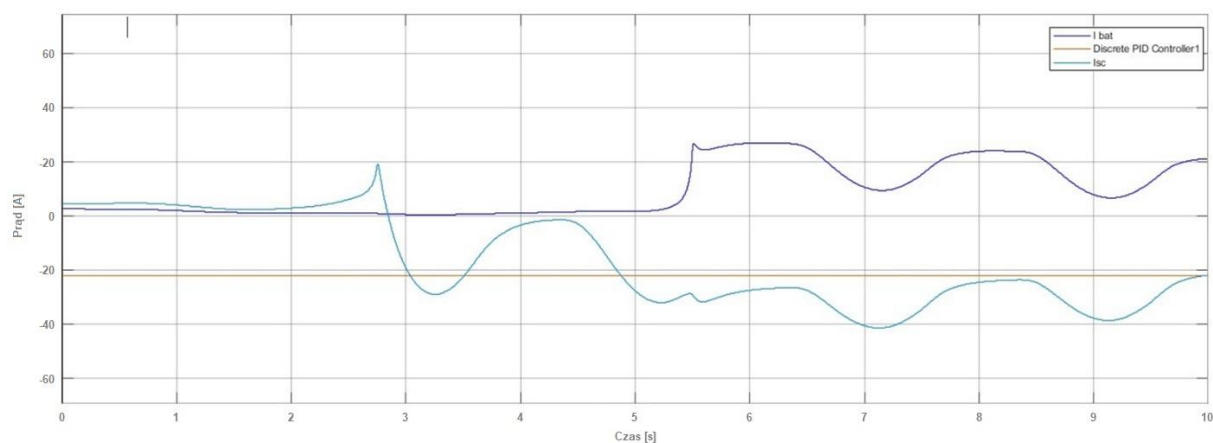
Rys. 90 Model hybrydowego magazynu energii



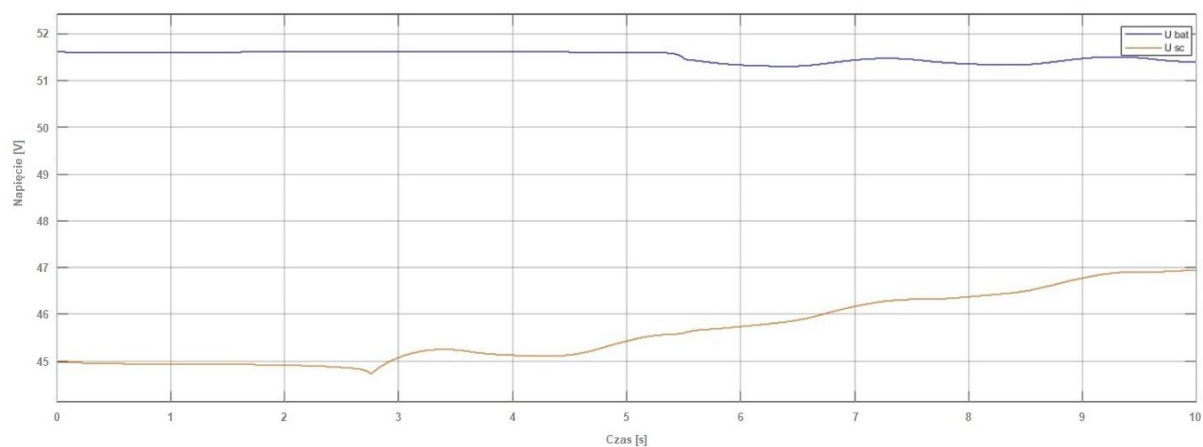
Rys. 91 Wykres napięcia na głównej szynie DC



Rys. 92 Wykres zmian stopnia naładowania (SOC)

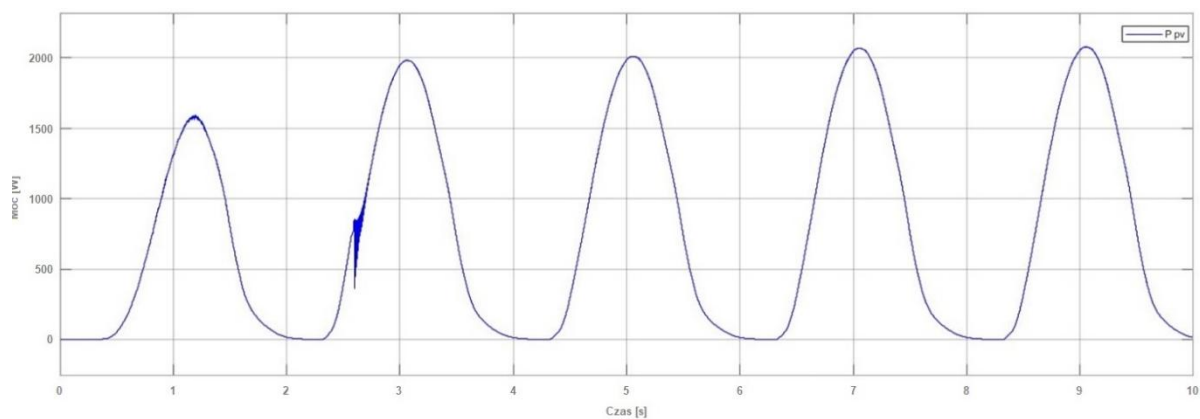


Rys. 93 Wykres przebiegu prądów baterii i pakietu superkondensatorów

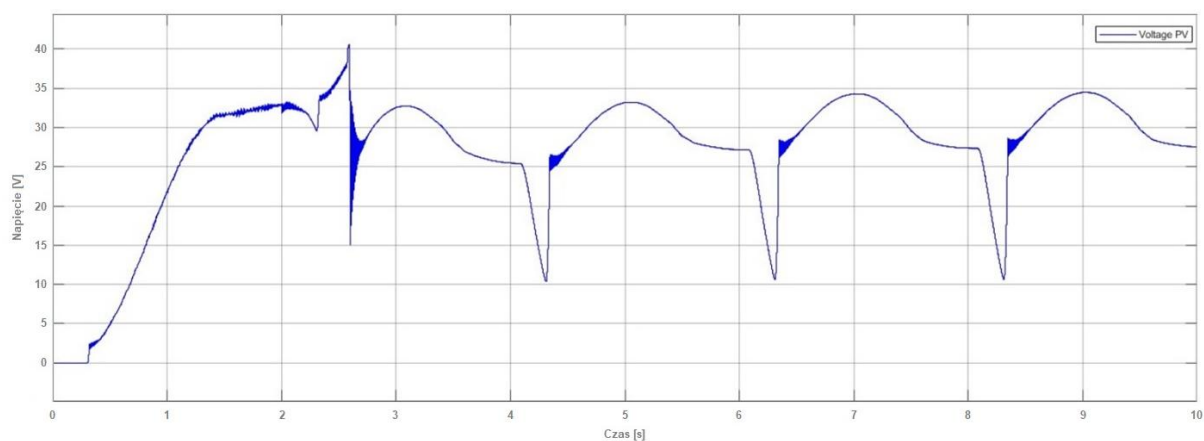


Rys. 94 Wykres zmian napięcia na zasobnikach energii

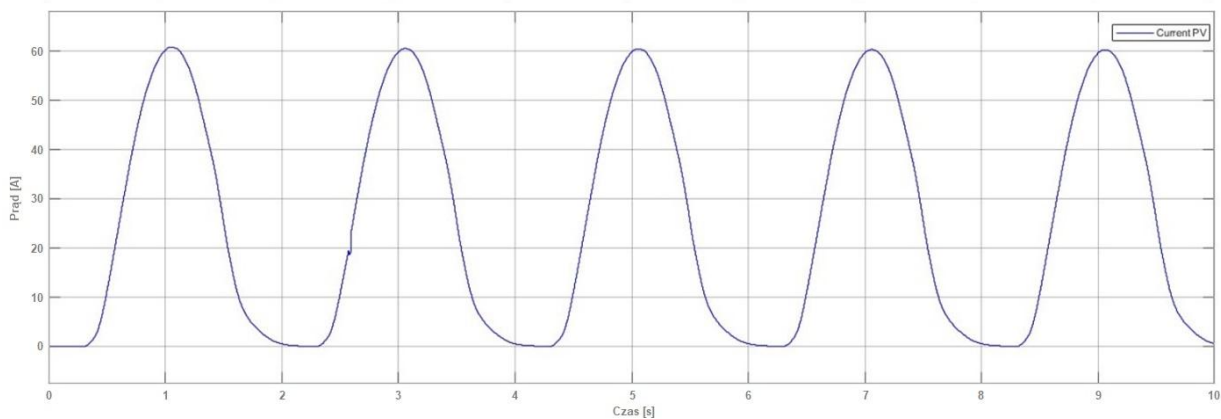
Na Rys. 95 przedstawiono wyniki symulacji po stronie paneli fotowoltaicznych. Nieregularny przebieg napięcia na panelach PV (Rys. 96) wynika z zastosowanego algorytmu MPPT mającego za zadanie śledzenie maksymalnego punktu mocy instalacji. Pick prądowy spowodowany pakietem superkondensatorów silnie oddziaływanie również na napięcie mierzone na panelach PV co widoczne jest na przebiegu. Przebieg prądu na PV (Rys. 97) odpowiada bezpośrednio przebiegowi natężenia nasłonecznienia (Rys. 89).



Rys. 95 Wykres produkcji energii z PV



Rys. 96 Wykres przebiegu napięcia na panelach PV



Rys. 97 Wykres przebiegu prądu produkcji z paneli PV

5. Prototyp rutera energii

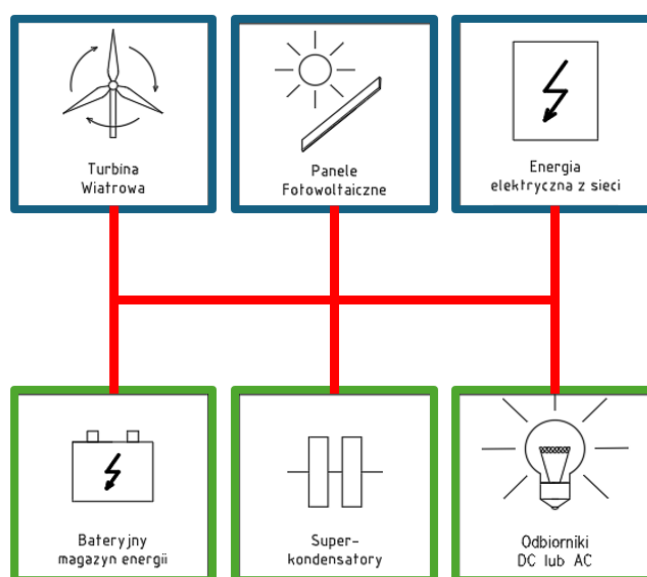
5.1. Koncepcja rutera DC

5.1.1. Dobór konfiguracji rutera energii

W ramach prowadzonych badań przeprowadzono przegląd różnych rodzajów przekształtników energii [17], [76], umożliwiających integrację zróżnicowanych technologicznie urządzeń i maszyn

generujących energię elektryczną w oparciu o odnawialne źródła energii (np. paneli PV lub/i turbin wiatrowych) [72], magazynów energii (np. litowych lub/i superkondensatorów) [82] z odbiorcami energii. Pierwszym etapem była analiza różnych konfiguracji wzajemnego połączenia wyżej wymienionych elementów. W układzie składającym się z 6 podstawowych elementów (Rys. 98) wyszczególniono 3 podstawowe konfiguracje połączeń charakteryzujące się odrębnymi funkcjonalnościami m.in.

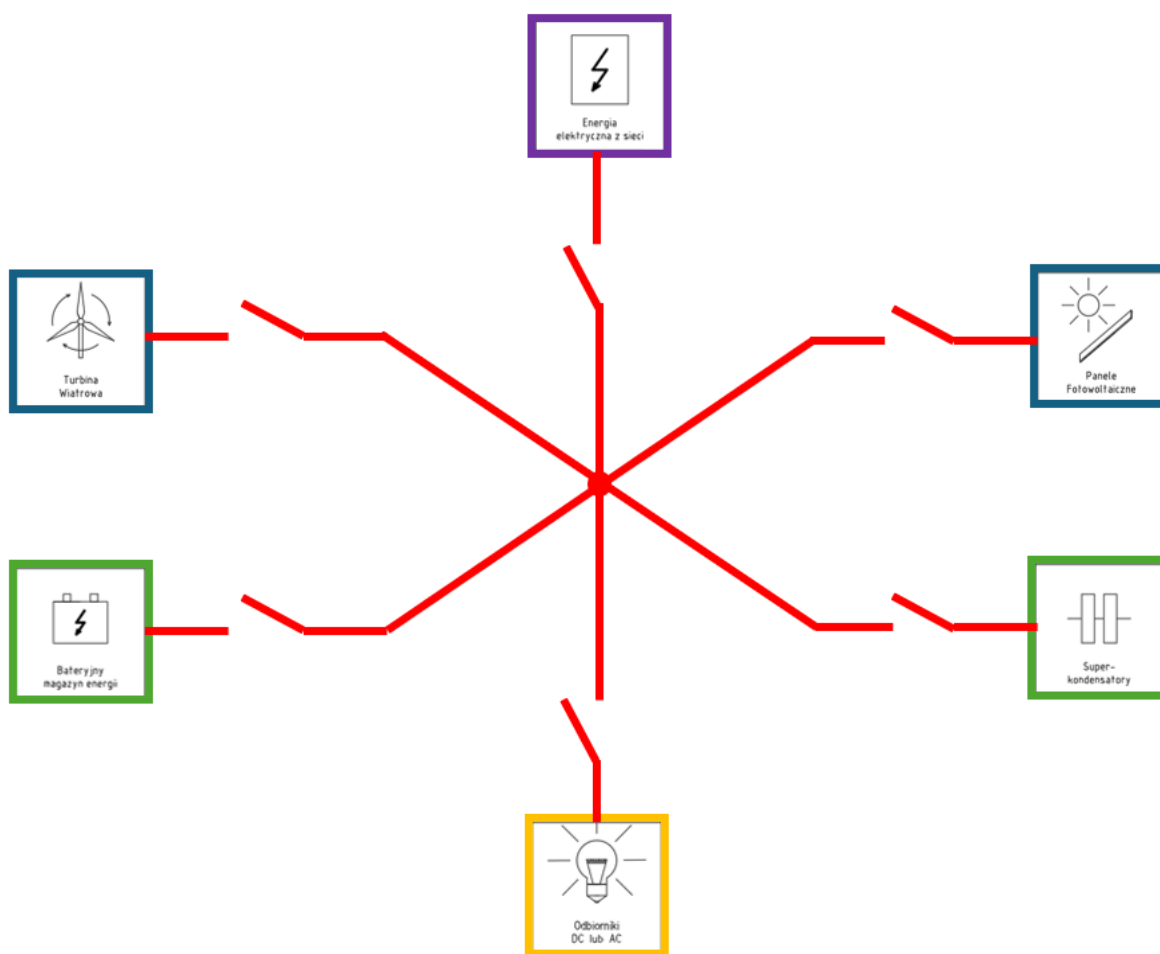
- Konfigurację typu gwiazda,
- Konfigurację hierarchiczną typu drzewo,
- Konfigurację matrycową.



Rys. 98 Przykładowa konfiguracja hybrydowego magazynu energii.

Konfiguracja typu gwiazda (Rys. 99)

W konfiguracji gwiazdowej przedstawionej na Rys. 99 porty wyjścia/wejścia każdego z elementów połączone są w jednym wspólnym punkcie (wspólna szyna DC). Konfiguracja taka charakteryzuje się stosunkowo prostą budową, jednak sprawia to ograniczone możliwości sterowaniem przepływem energii pomiędzy poszczególnymi elementami układu. Precyzyjne zarządzanie przepływem energii odbywa się jedynie poprzez zaawansowaną aparaturę pomiarową (pomiar mocy zapotrzebowania i produkcji energii) tzn. priorytetowo wykorzystywana jest energia pozyskana z OZE do zasilania odbiorników. W razie niedoboru energii pobierana jest energia z magazynów lub w ostateczności z sieci elektroenergetycznej. W przypadku zwiększonej produkcji energii z OZE, jej nadmiar przekazywany jest do ładowania magazynów energii.



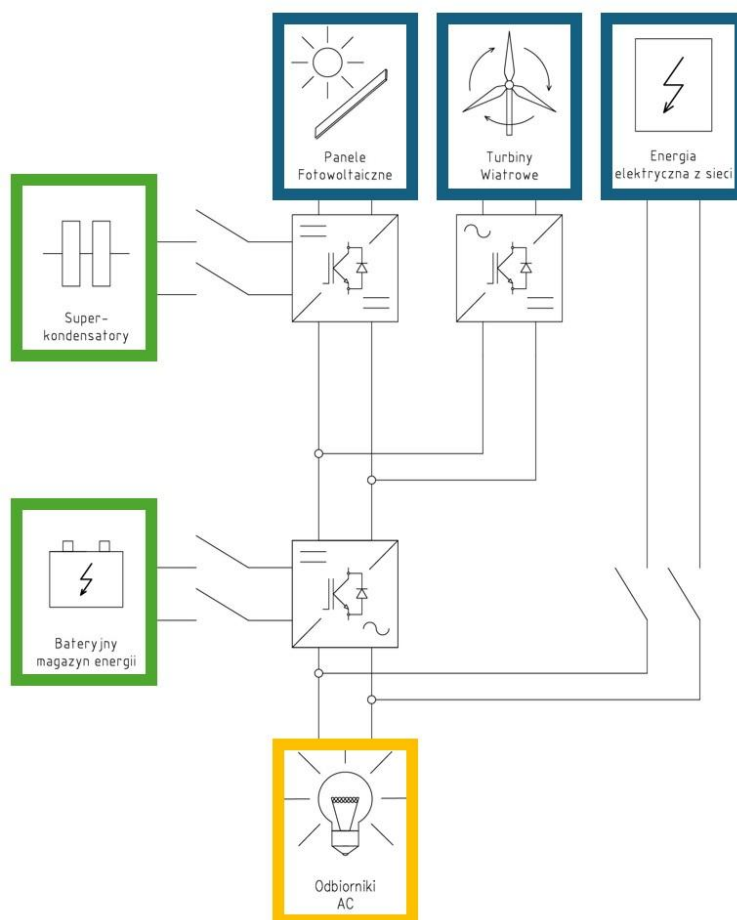
Rys. 99 Konfiguracja typu gwiazda

Konfiguracja typu drzewo (Rys. 100)

Kolejną konfiguracją jest konfiguracja hierarchiczna typu drzewo. Na schemacie (Rys. 100) widoczny jest podział na źródła, magazyny energii będące pośrednimi elementami układu, a końcowymi odbiornikami energii. Konfiguracja układu jest z góry założona i funkcjonalnie dopasowana do działania całości układu. Przykładem może być połączenie PV z superkondensatorami w celu stabilizacji mocy podczas krótkotrwałych zmianach nasłonecznienia. Źródła OZE połączone są z baterijnym magazynem energii umożliwiając tym samym maksymalne wykorzystanie „Zielonej energii”.

Odbiorniki energii zasilane są bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej z możliwością jej odłączenia w momencie zasilania z OZE. Dodatkowo w przypadku magazynów energii zastosowano połączenie typu by-pass umożliwiające bezpośrednie zasilanie energią pozyskaną z OZE. Zaletą rozwiązania jest najmniejsza (w porównaniu do innych rozwiązań liczba elementów przełączających). Ograniczona liczba elementów upraszcza sterowanie przepływem energii. Wadą jest mocno ograniczona możliwość

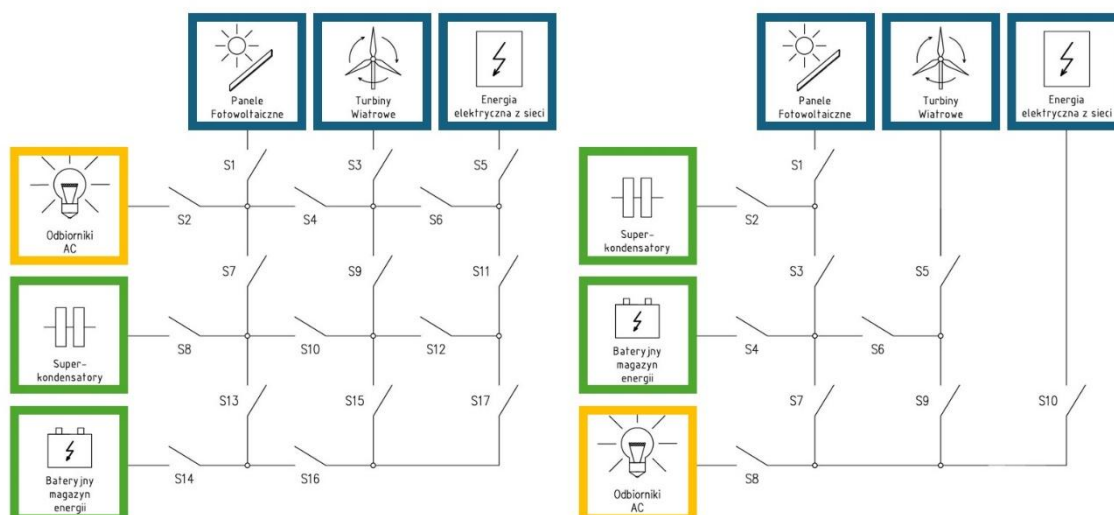
sterowania przepływem energii w układzie, przykładowo nie ma możliwości ładowania superkondensatorów z turbin wiatrowych.



Rys. 100 Konfiguracja typu drzewo

Konfiguracja matrycowa (Rys. 101)

Konfiguracja układu typu matryca ma najbardziej złożoną strukturę, dlatego że składa się aż z 17 łączników (kluczy), co umożliwia ustalenie dowolnego przepływu energii pomiędzy elementami. Matrycę ustawiono w taki sposób, że źródła energii ustawione są w wierszu natomiast odbiorniki oraz magazyny energii w kolumnie. Dzięki przedstawionej na schemacie konfiguracji styków możliwa jest dowolna kombinacja połączeń pomiędzy elementami. Wadą tego rozwiązania jest jego złożoność oraz ilość elementów łączących (kluczy), co wpływa również na stopień zaawansowania sterowania. Niewątpliwą zaletą w porównaniu do poprzednich rozwiązań jest możliwość zarządzania przepływem energii pomiędzy poszczególnymi elementami w dowolny sposób. W ramach dalszych analiz układ został uproszczony w taki sposób by pozostawić jedynie połączenia, które będą brały czynny udział w zarządzaniu energią. Przykładowo zrezygnowano z możliwości ładowania magazynów energii z sieci elektroenergetycznej. Przedstawiony układ połączeń z prawej strony Rys. 101 ma już założony pewien scenariusz zarządzania energią co z jednej strony ogranicza jego funkcjonalność z drugiej upraszcza oraz redukuje liczbę elementów przełączających z 17 do 10.



Rys. 101 Konfiguracja matrycowa

Po przeprowadzonej analizie zdecydowano, że dalsze prace i analizy przeprowadzone są w konfiguracji typu gwiazda (Rys. 99). Konfiguracja gwiazdowa umożliwia zarządzanie przepływem energii pomiędzy poszczególnymi elementami przy średniej ilości elementów przełączających. Jedną z najważniejszych cech tej konfiguracji jest możliwość jej rekonfiguracji np. poprzez dodanie dodatkowego elementu bez konieczności zmiany pozostałej już istniejącej struktury, jedynie z koniecznością dostosowania algorytmu sterowania. Cecha ta jest ważna ze względu na fakt, że obecnie dynamicznie rozwija się sektor OZE oraz magazynów energii. Najważniejsze cechy poszczególnych konfiguracji zestawiono w Tabeli 6

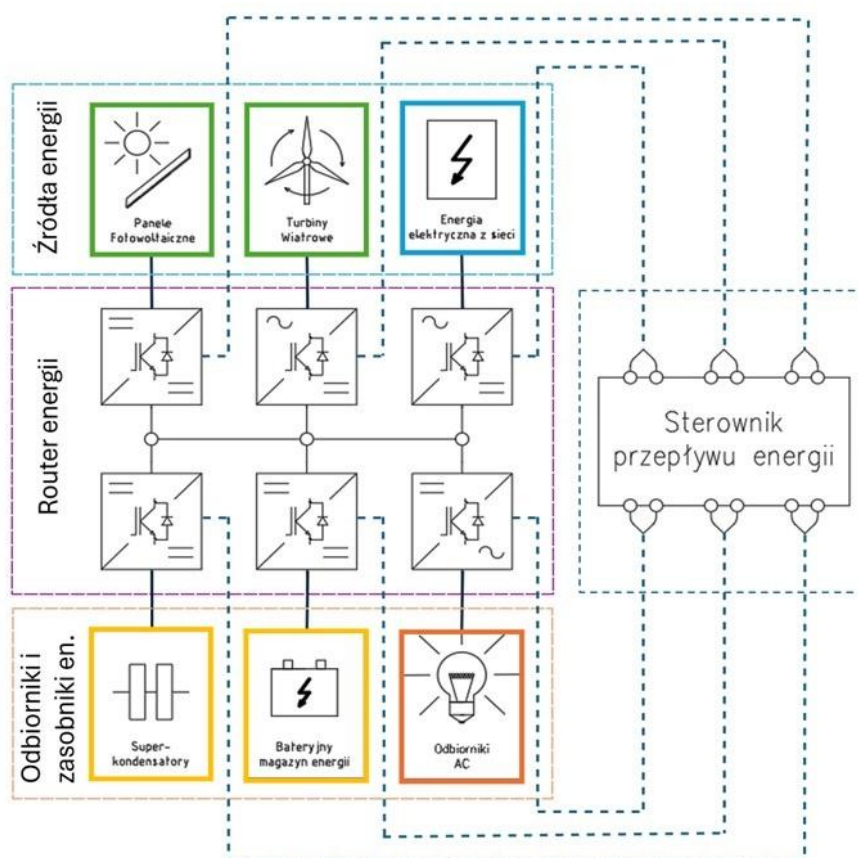
Tabela 6 Porównanie cech różnych konfiguracji

Cecha	Typ konfiguracji		
	GWIAZDA	DRZEWO	MATRYCOWA
Ilość elementów przełączających	Średnia	Mała	Duża
Możliwość przepływu energii pomiędzy dowolnymi elementami	Tak	Nie Ze względu na z góry narzuconą strukturę	Tak
Stopień skomplikowania ukł. sterowania	Średni	Mały	Duży
Możliwość rekonfiguracji (modułowość)	Tak	Nie Z góry narzucona	Nie Ze względu na znaczące

		struktura, ograniczone możliwości rekonfiguracji	zwiększenie ilości el. przełączających
--	--	--	---

5.1.2. Analiza algorytmów zarządzania przepływem energii

Zgodnie z harmonogramem zawartym w indywidualnym planie badawczym prace związane z wykonaniem elementu magazynu energii rozpoczęto od projektu rutera energii. Docelowo układ powinien składać z 6 podstawowych elementów, dzięki czemu umożliwiać pracę w różnych trybach. Układ podzielono na źródła, odbiorniki i magazyny energii oraz sterowanie. Wśród źródeł przewidziano dwa najpopularniejsze pod względem zastosowanie źródła OZE w postaci instalacji fotowoltaicznych oraz turbin wiatrowych. Dodatkowym źródłem energii jest sieć elektroenergetyczna umożliwiając pracę on-grid oraz zalety płynące z takiego połączenia np. arbitraż cenowy. W routerze przewidziano możliwość zasilania odbiorników AC lub DC oraz podłączenie minimalnie dwóch zróżnicowanych technologicznie zasobników energii. Elementem odpowiedzialnym za zapewnienie odpowiedniego przepływu energii jest ruter sterowany poprzez zewnętrzny sterownik. Schemat blokowy rutera energii przedstawiono na Rys. 102.



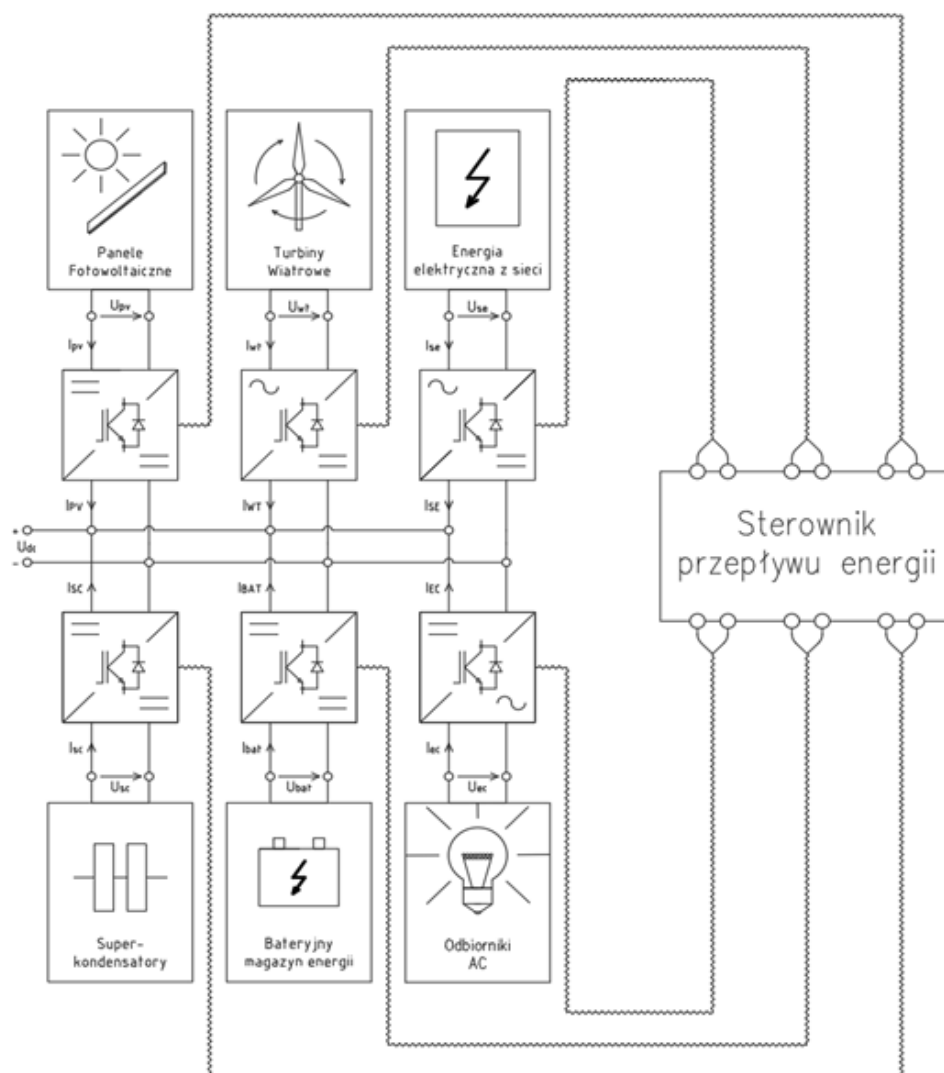
Rys. 102 Schemat blokowy rutera energii

W celu umożliwienia sterowania konieczne jest zebranie konkretnych parametrów, które wyszczególniono w tabeli Tabela 7 i przedstawionych na schemacie blokowym (Rys. 103). Przykładowymi parametrami są: napięcie na zaciskach komponentu, prąd/moc wejściowy oznaczający prąd/moc pobrany przez element, prąd/moc wyjściowa czyli generacja energii przez urządzenie. Dodatkowym parametrem w przypadku magazynów energii jest stopień naładowania czyli SOC. Parametry będą stanowiły dane wejściowe do projektowanego sterownika przepływu energii wykorzystującego sterowanie dwustanowe lub logikę rozmytą.

Tabela 7 Wykaz parametrów mierzonych na ruterze energii

Parametr	Oznaczenie	Jednostka
Napięcie wejściowe fotowoltaiki	U_{pv}	V
Prąd wejściowy fotowoltaiki	I_{pv}	A
Moc wejściowa fotowoltaiki	P_{pv}	kW
Prąd wyjściowy fotowoltaiki	I_{pV}	A
Moc wyjściowa fotowoltaiki	P_{pV}	kW
Napięcie wejściowe turbiny wiatrowe	U_{wt}	V
Prąd wejściowy turbiny wiatrowe	I_{wt}	A
Moc wejściowa turbiny wiatrowe	P_{wt}	kW
Prąd wyjściowy turbiny wiatrowe	I_{WT}	A
Moc wyjściowa turbiny wiatrowe	P_{WT}	kW
Napięcie wejściowe sieć energetyczna	U_{se}	V
Prąd wejściowy sieć energetyczna	I_{se}	A
Moc wejściowa sieć energetyczna	P_{se}	kW
Prąd wyjściowy sieć energetyczna	I_{SE}	A
Moc wyjściowa sieć energetyczna	P_{SE}	kW
Napięcie wejściowe super kondensatory	U_{sc}	V
Prąd wejściowy super kondensatory	I_{sc}	A
Moc wejściowa super kondensatory	P_{sc}	kW

Prąd wyjściowy super kondensatory	I_{SC}	A
Moc wyjściowa super kondensatory	P_{SC}	kW
Stopień naładowania super kondensatory	SOC_{sc}	%
Napięcie wejściowe pakietu baterii	U_{bat}	V
Prąd wejściowy pakietu baterii	I_{bat}	A
Moc wejściowa pakietu baterii	P_{bat}	kW
Prąd wyjściowy pakietu baterii	I_{BAT}	A
Moc wyjściowa pakietu baterii	P_{BAT}	kW
Stopień naładowania pakietu baterii	SOC_{bat}	%
Napięcie wejściowe odbiorników energii	U_{ec}	V
Prąd wejściowy odbiorników energii	I_{ec}	A
Moc wejściowa odbiorników energii	P_{ec}	kW
Prąd wyjściowy odbiorników energii	I_{EC}	A
Moc wyjściowa odbiorników energii	P_{EC}	kW
Napięcie na wspólnej szynie DC	U_{dc}	V



Rys. 103 Schemat blokowy Rutera energii z wyszczególnionymi parametrami pomiarowymi.

W trakcie analiz metod sterowania ruterem energii poza algorytmami logiki rozmytej przeanalizowano również algorytmy oparte na dwóch stanach pracy włącz lub wyłącz podobnie jak to ma miejsce np. w prostych urządzeniach do regulacji temperatury.

Urządzenia takie charakteryzują się prostym sterowaniem polegającym na tym, że w trybie grzania gdy temperaturą jest niższa niż zadana to przekaźnik zostaje załączony, natomiast gdy temperatura jest wyższa lub równa zadanej przekaźnik zostaje otwarty. W przypadku układu składającego z 6 elementów z których każdy określony jest za pomocą dwóch stanów 0 oraz 1, co w przypadku całości układu stanowi teoretycznie 64 różne stany pracy. Do każdego z tych stanów przyporządkowana powinna zostać odpowiedź układu. Ilość stanów pracy można obliczyć z prostej zależności (37). Opis poszczególnych stanów pracy przedstawiono w Tabeli 8.

$$\text{Liczba stanów pracy} = 2^n \quad (37)$$

Gdzie: 2 – oznacza liczbę stanów (0 oraz 1),

n – oznacza liczbę urządzeń

Tabela 8 Opis stanów pracy komponentów hybrydowego magazynu energii

Nazwa modułu	Stan	Opis
Turbina wiatrowa	0	Brak lub jej niedobór produkcji energii elektrycznej
	1	Produkcja energii elektrycznej w stopni wystarczającym lub nadmiarze.
Panele Fotowoltaiczne	0	Brak lub jej niedobór produkcji energii elektrycznej
	1	Produkcja energii elektrycznej w stopni wystarczającym lub nadmiarze.
Energia z sieci	0	Niedobór energii elektrycznej w układzie, konieczność zasilania z sieci
	1	Nadmiar energii elektrycznej w sieci napięcie sieci wynosi powyżej 251 V AC.
Magazyn bateryjny	0	Magazyn rozładowany, stopień naładowania wynosi poniżej 20%.
	1	Magazyn naładowany w zakresie 90-20%.
Bateria Superkondensatorów	0	Bateria rozładowana, stopień naładowania wynosi poniżej 20%.
	1	Bateria naładowana w zakresie 90-20%.
Odbiorniki AC lub DC	0	Brak zapotrzebowania na energię elektryczną.
	1	Zapotrzebowanie na energię elektryczną przez odbiorcę.

Każdy z przedstawionych stanów wymaga osobnej analizy ze względu na konieczność dopasowania przepływów energii do danej sytuacji. Poniżej (

Tabela 9) przedstawiono 5 przykładowych stanów systemu.

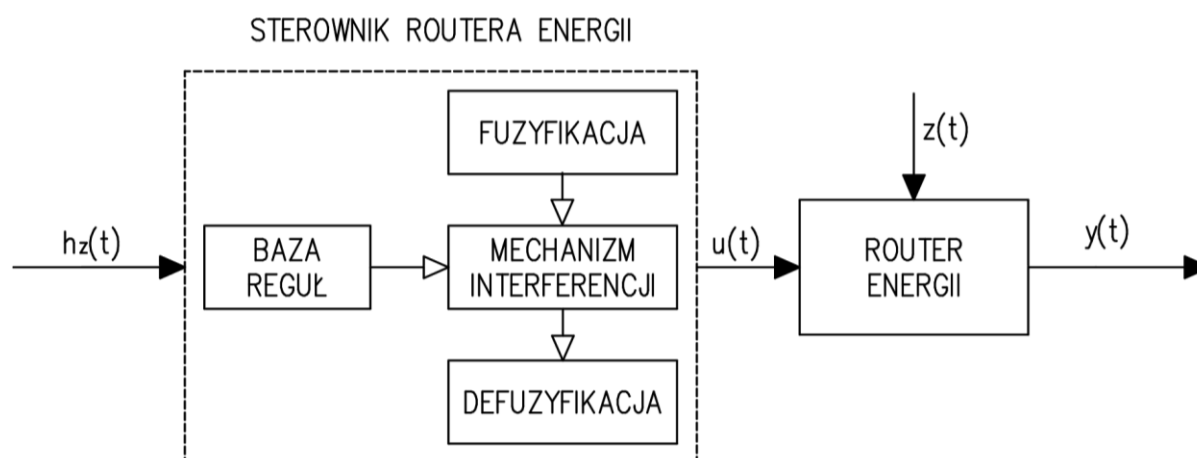
Tabela 9 Przykładowe stany pracy routera energii

Nr	TW	PV	BES	SC	Sieć	Odb.
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	0

Gdzie: TW – turbiny wiatrowe, PV – Panele fotowoltaiczne, BES – Bateria magazyn energii, SC – Bateria superkondensatorów, Sieć – Sieć elektroenergetyczna, Odb. – Odbiorniki energii elektrycznej.

Do każdego stanu wejść przyporządkowano odpowiedź układu i krótki opis określający dany stan np. 3. Brak działania OZE, rozładowane magazyny energii, dostępna energia z sieci, zapotrzebowanie na energię elektryczną. Całość energii pozyskiwana jest z sieci elektroenergetycznej.

Drugą analizowaną metodą sterowania jest zastosowanie regulatora opartego na logice rozmytej, którego schemat blokowy przedstawiona na Rys. 104.



Rys. 104 Schemat regulatora logiki rozmytej

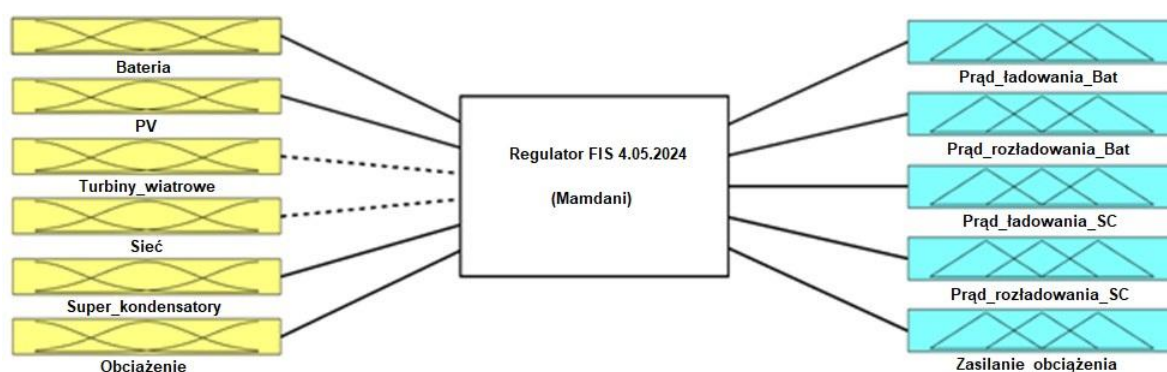
Gdzie: $z(t)$ – zakłócenia pracy routera energii, $hz(t)$ – nastawa początkowa zgodnie z tematem głównym pracy określona jako stopień autokonsumpcji dążący do 100% czyli całkowitego wykorzystania wyprodukowanej energii na bieżące potrzeby, $u(t)$ – sygnał sterujący.

W przypadku kontrolera opartego na logice rozmytej każdemu z komponentów przyporządkowano 3 funkcje przynależności. W takim przypadku ilość stanów pracy tego układu wzrasta do 729, konieczne więc staje się uproszczenie układu w celu uproszczenia analizy. Ilość stanów pracy w przypadku regulatora opartego o algorytm logiki rozmytej określono na podstawie wzoru (38)

$$\text{liczba stanów pracy} = 3^n \quad (38)$$

Gdzie: 3 – oznacza liczbę funkcji przynależności, n – oznacza liczbę urządzeń

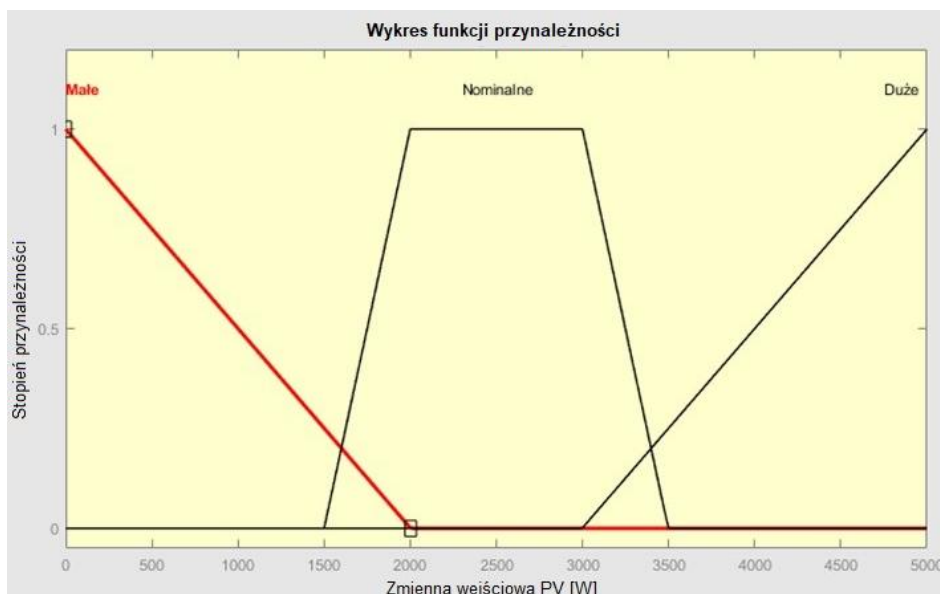
Układ przeznaczony do dalszych prac będzie działać w trybie off-line (praca wyspowa) oraz z pojedynczym źródłem OZE w postaci fotowoltaiki. W tej konfiguracji układ będzie składał się z 4 wejść, co przekłada się na 81 różne stany pracy układu. Widok regulatora logiki rozmytej przedstawiono na Rys. 105. Przedstawiony schemat powstał w dedykowanym logice rozmytej modułowi oprogramowania MATLAB. Układ jak widać składa się z wejść, regulatora w którym zaimplementowano bazę reguł oraz wyjść.



Rys. 105 Widok regulatora logiki rozmytej

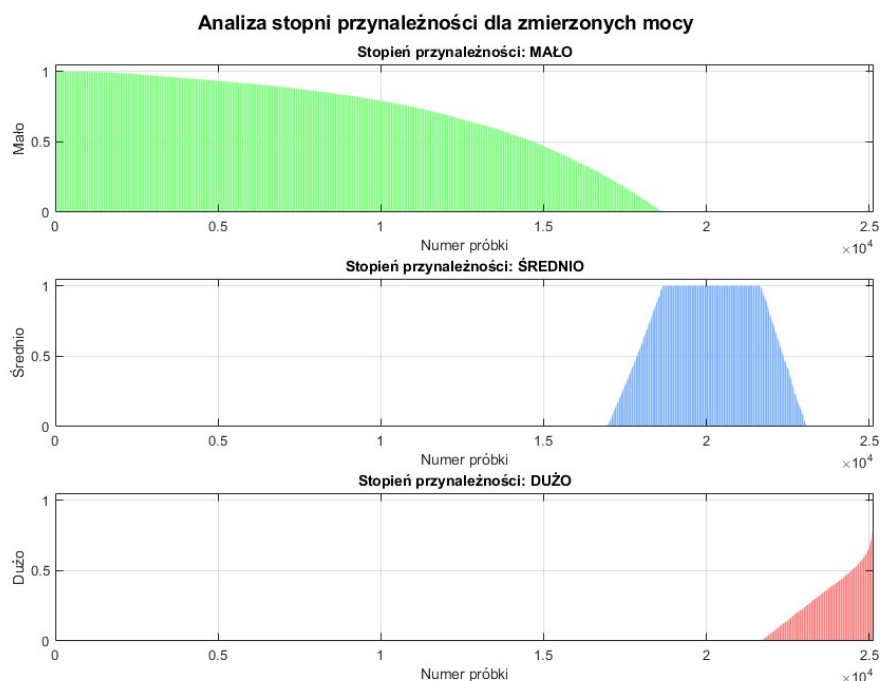
5.2. Opracowanie regulatora logiki rozmytej

W kolejnym etapie określono funkcje przynależności dla poszczególnych wejść i wyjść. Funkcja przynależności w logice rozmytej określa stopień, w jakim dany element należy do zbioru rozmytego, przyjmując wartości z przedziału $[0, 1]$. Każdej funkcji przynależności nadane zostaje słowne określenie, które przypisuje wartości stopnia przynależności, wyrażonego słownie (np. "wysoki", "średni", "niski"), dla poszczególnych elementów zbioru rozmytego na podstawie subiektywnej oceny lub reguł opisujących ten zbiór. Przykładowo produkcję energii w zakresie mocy od 0 do 2000W określono jako mało, gdzie 0W spełnia funkcję przynależności w 100%, natomiast 2000W wcale nie spełnia warunku przynależności. Każdemu z wejść i wyjść przyporządkowano po 3 funkcje przynależności, powodem tego ograniczenia jest konieczność redukcji liczby deklarowanych reguł.



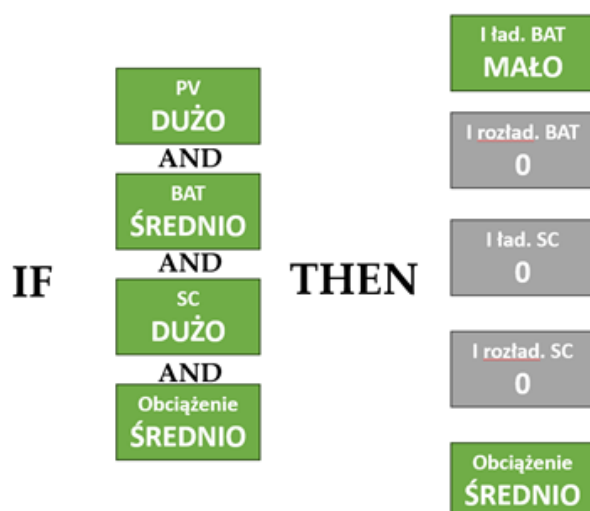
Rys. 106 Funkcja przynależności wygenerowana w środowisku Matlab

Funkcje przynależności określono w sposób subiektywny, bazując w głównej mierze na doświadczeniach i wynikach pomiarów z poprzednich zadań. Dla każdego zbioru rozmytego obliczono stopień przynależności dla każdego z pomiarów, a wyniki przedstawiono w postaci wykresów słupkowych (Rys. 107), co umożliwia intuicyjne porównanie rozkładu przynależności w obrębie całego zestawu danych. W celu poprawy czytelności próbek posortowano je rosnąco względem wartości mocy. Kolorem zielonym oznaczono próbki, określone jako MAŁO, kolorem niebieskim zbiór ŚREDNIO, natomiast kolorem czerwonym zbiór DUŻO. Liczebność próbek przynależnych, czyli takich dla których stopień przynależności jest większa od 0 w przypadku zbioru MAŁO liczba próbek wyniosła 18658 (74,23%), ŚREDNIO 6106 (24,29%), a w przypadku zbioru DUŻO 3478 (13,84%). Całkowita liczba próbek wyniosła 25135. Następnie wyznaczono sumaryczną energię elektryczną dla poszczególnych funkcji przynależności z uwzględnieniem że pomiary odbywają się co 10min. Sumaryczna energia elektryczna zbioru funkcji przynależności mało wyniosła 1745,34kWh co stanowi 34,23% całości wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną energii. Funkcja przynależności określona jako nominalnie lub średnio sumarycznie obejmuje 2499,74kWh czyli 49,02% Najliczniejszy po względem ilości próbek, które można określić jako „Mało” zbiór obejmuje sumaryczną energię na poziomie jedynie 1745,34kWh co w odniesieniu do stanowi 34,23%. Sumaryczna roczna energia wyprodukowana przez mikroinstalację PV o mocy 4,83kWp wyniosła 5099,26kWh. Ze względu na fakt że poszczególne zbiory pokrywają się to suma wskaźników procentowych jest większa niż 100%. Należy jednak wziąć pod uwagę że największy udział w produkcji energii elektrycznej mają zbiory wartości określane jako średnio lub dużo, znacząco mniejszą sumaryczną energią charakteryzuje się zbiór określany jako mało.



Rys. 107 Funkcja przynależności odniesiona do historycznych pomiarów

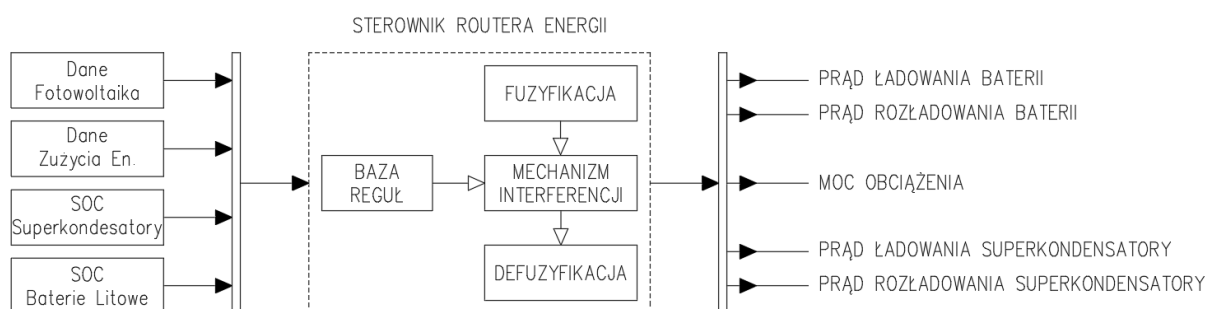
Kolejnym kluczowym etapem projektowania regulatora logiki rozmytej jest opracowanie bazy reguł. Baza reguł opracowana jest na podstawie wzorca JEŻELI Warunek to Wynik. Dla przedstawionego zestawu wejść wyjść konieczne było opracowanie 81 pojedynczych reguł. Opracowanie każdej z reguł wymagało znajomości zachowania układu i pewnego stopnia wiedzy eksperckiej. Na Rys. 108 przedstawiono przykładową regułę, którą należy odczytać w następujący sposób. Jeżeli produkcja energii z fotowoltaiki jest duża, bateria średnio naładowana, bateria superkondensatorów w pełni naładowana, a obciążenie sieci jest średnie to należy ładować baterię małym prądem i zapewnić średni poziom energii dla obciążenia. Pozostałe elementy układu nie biorą udziału.



Rys. 108 Sposób tworzenia przykładowej reguły

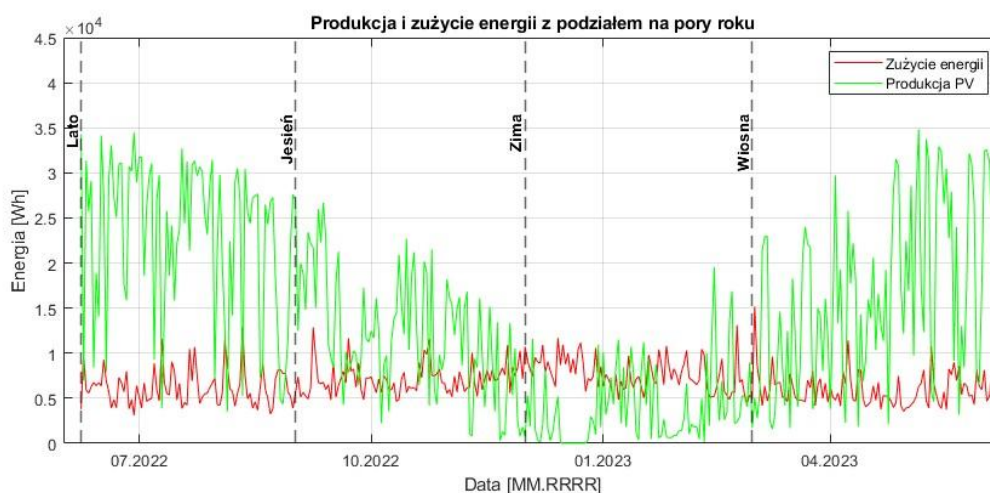
5.3. Uruchomienie prototypu

Prototyp regulatora został zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem narzędzia Fuzzy Logic Designer. Na Rys. 109 przedstawiono schemat blokowy rutera energii testowanego we środowisku symulacyjnym. Centralnym elementem jest regulator wykorzystujący algorytm logiki rozmytej. Sygnałami wejściowymi są m.in. dane pozyskane podczas pomiarów instalacji elektrycznej w zakresie konsumpcji i produkcji energii.

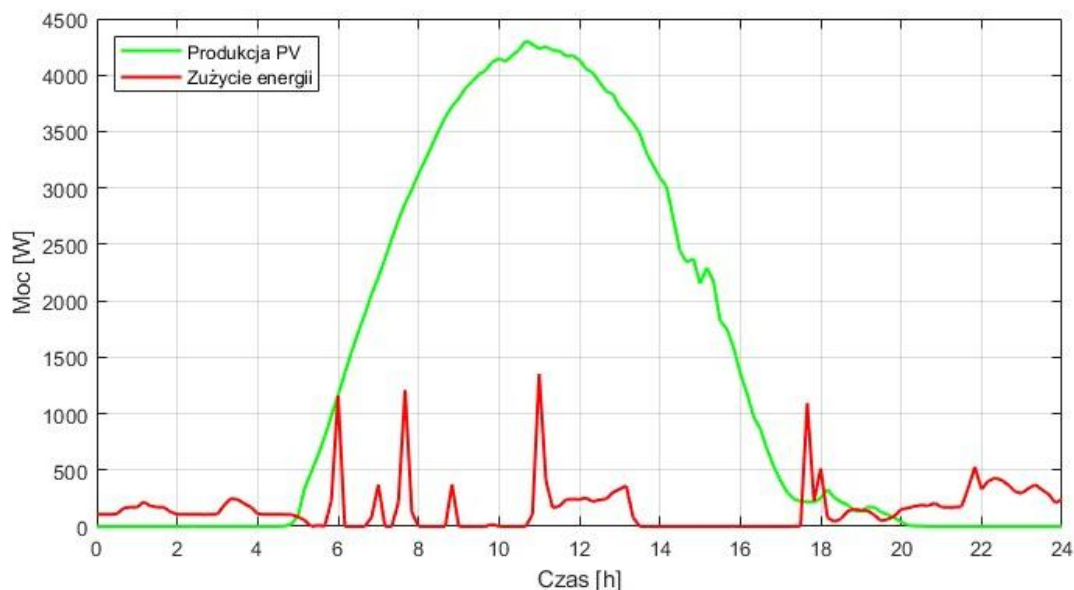


Rys. 109 Schemat blokowy rutera energii badanego we środowisku symulacyjnym

Dane pomiarowe obejmują okres od 6 czerwca 2022 do 6 czerwca 2023 stanowiąc sumarycznie 52579 pojedynczych wartości pomiarowych dla parametru konsumpcji i produkcji energii (Rys. 110). Pojedyncza wartość produkcji energii elektrycznej stanowi średnią wartość sumaryczną mocy czynnej z 3 faz w okresie 10 min. Przykładowy dzienny wykres produkcji i zapotrzebowania energetycznego w dniu 6 czerwca 2022 przedstawiono na Rys. 111. Przedstawione wykresy wykazują znaczące zróżnicowanie w ilości produkcji energii jak również przesunięte względem siebie okresu produkcji i zapotrzebowania na energię elektryczną.



Rys. 110 Produkcja i zużycie energii w okresie pełnego roku



Rys. 111 Dzienny wykres zużycia i produkcji energii w dniu 6 czerwca 2022

Kolejnymi parametrami wejściowymi jest stopień naładowania baterii oraz pakietu superkondensatorów. Parametry te stanowią informację zwrotną z modeli zasobników energii zaimplementowanych w środowisku Simulink. Stopnie naładowania magazynów energii przyjmują wartości 0-100%.

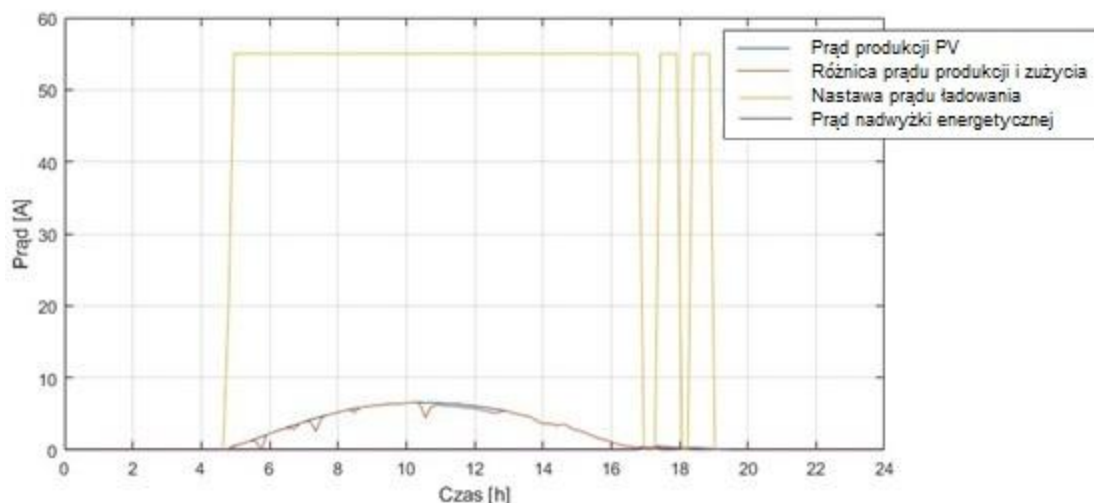
Parametrami wyjściowymi z regulatora logiki rozmytej są prąd ładowania i rozładowania poszczególnych zasobników energii oraz ogranicznik mocy wyjściowej. W przypadku prądów rozładowania i ładowania przyjęto że wartość prądu wpływającego do modelu magazynu energii ma znak dodatni i oznacza proces ładowania, natomiast wartość prądu ze znakiem przeciwnym oznacza rozładowanie magazynu energii. Wartość ogranicznika mocy obciążenia ma zawsze wartość dodatnią.

Uruchomienie regulatora logiki rozmytej rozpoczęto od przeprowadzenia symulacji w ograniczony zakresie czasu obejmującym 24h czyli 144 pojedynczych wartości. Dane służące do uruchomienia modelu pochodziły z dnia 6 czerwca 2022. Przedstawiona zestaw danych został wybrany na podstawie analizy całego zbioru danych obejmujących roczne pomiary ze względu na reprezentatywny przebieg produkcji i zużycia energii.

6. Badania i testy funkcjonalne prototypu

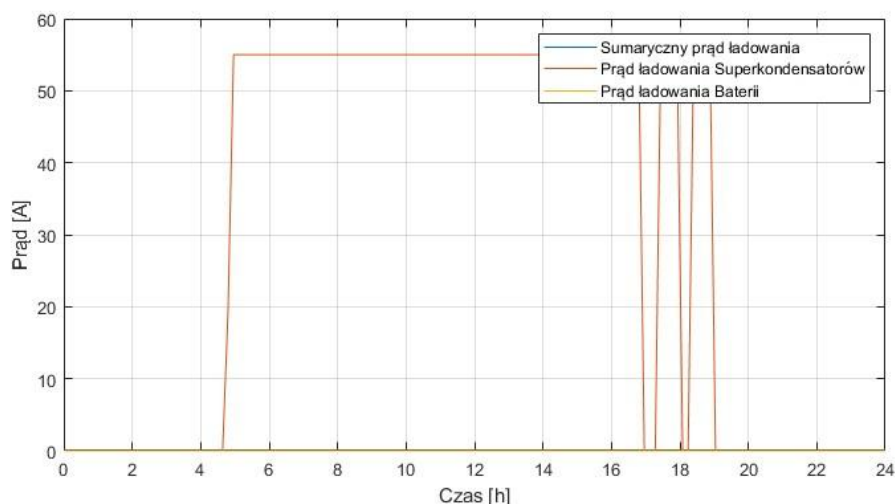
Następnie przystąpiono do uruchomienia regulatora z parametrami narzuconymi w poprzednich etapach pracy. Na Rys. 112 przedstawiono uzyskane wyniki prądów i nastaw w ruterze energetycznym w trakcie jego pierwszego uruchomienia. Uzyskana została autokonsumpcja na poziomie 99.44%, czyli prawie całość wyprodukowanej energii przez PV zostaje wykorzystana na bieżącą konsumpcję oraz ładowanie magazynów energii. Widoczne jednak jest że nastawa prądu ładowania stanowiąca sumę nastaw prądu ładowania superkondensatorów i baterii nie dopasowuje się do bieżącej produkcji energii.

Przy obecnych parametrach regulatora nastawa prądów ładowania ogranicza się jedynie do 2 stanów, natomiast wartości nastawy prądów ładowania są wielokrotnie większe niż możliwości wynikające z parametrów ładowania.



Rys. 112 Wykres prądów ładowania w trakcie pierwszego uruchomienia regulatora

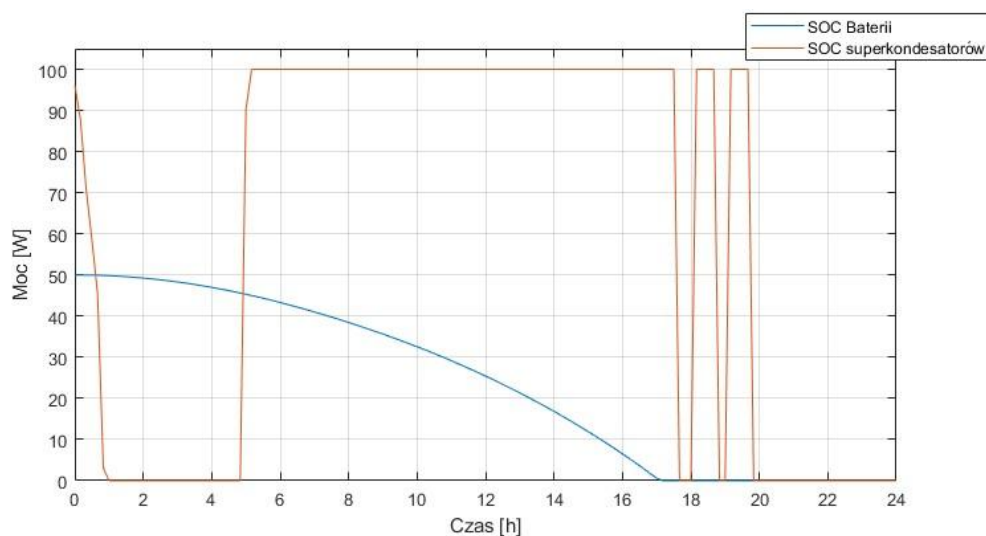
Ze względu na fakt że nastawa prądów ładowania stanowi sumę nastaw prądu ładowania superkondensatorów i baterii podjęto analizę poszczególnych nastaw, którą przedstawiono na Rys. 113. Z przedstawionych danych wynika że całość nastawy prądów ładowania została skierowana do ładowania superkondensatorów, natomiast prąd ładowania baterii pozostaje przez cały okres badania na poziomie zerowym, co w oczywisty sposób wskazuje na nieprawidłowy charakter działania regulatora.



Rys. 113 Nastawy prądów ładowania superkondensatorów i baterii

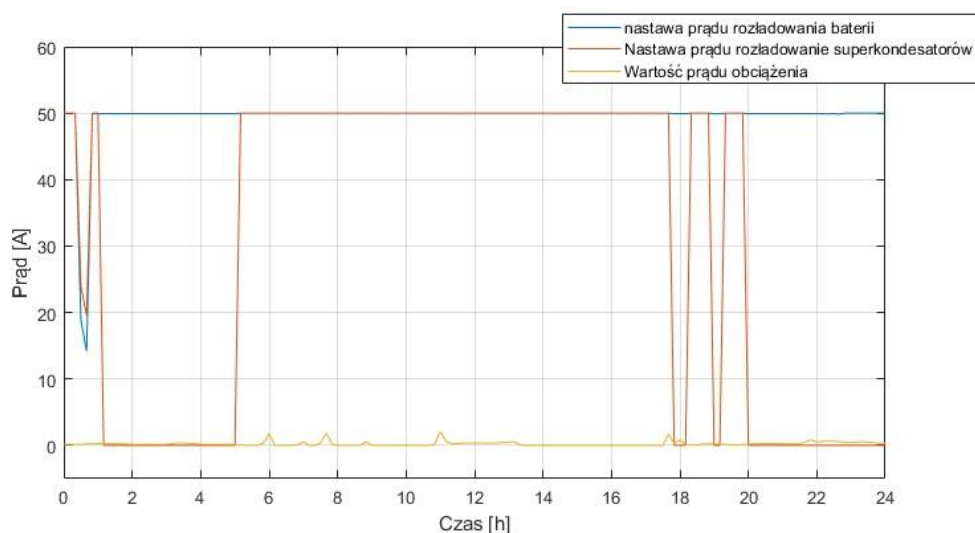
Odpowiedzią na prąd ładowania poszczególnych magazynów energii jest zmiana parametru stopnia naładowania SOC co zostało przedstawione na Rys. 114. Widoczne jest rozładowanie baterijnego

magazynu energii do zera oraz proces ładowania i rozładowania superkondensatora. Widoczny jest brak ładowania baterii oraz działanie superkondensatorów.



Rys. 114 Wykres zmiany SOC dla baterii i superkondensatorów

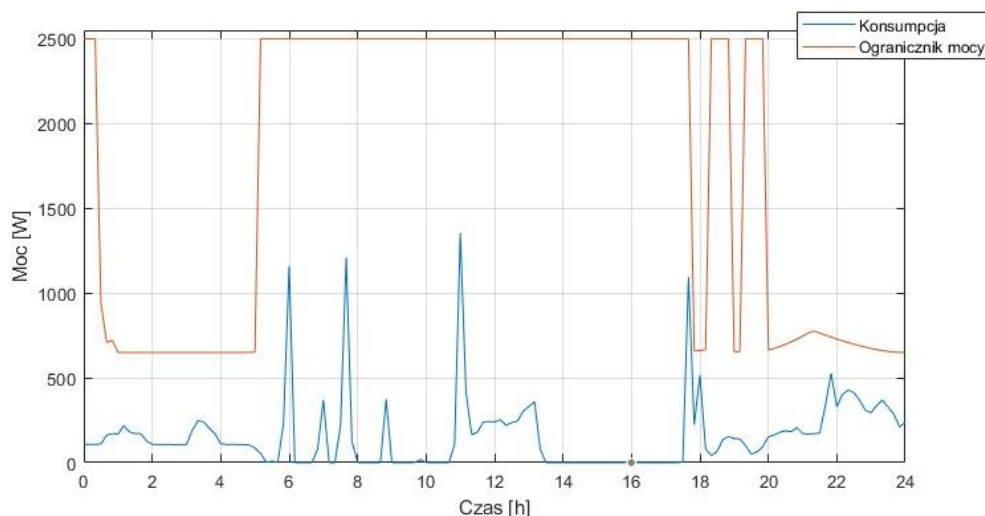
Nieprawidłowości w parametrach regulatora widoczne są również w przypadku wartości nastaw rozładowania poszczególnych magazynów energii. Odpowiedzią jest w głównej mierze dwa stany pracy w przypadku superkondensatorów oraz jednego stanu w przypadku baterii. Przedstawione na Rys. 115 nastawy całkowicie nie pokrywają się z bieżącym przebiegiem zużycia energii.



Rys. 115 Nastawy prądów rozładowania magazynów energii

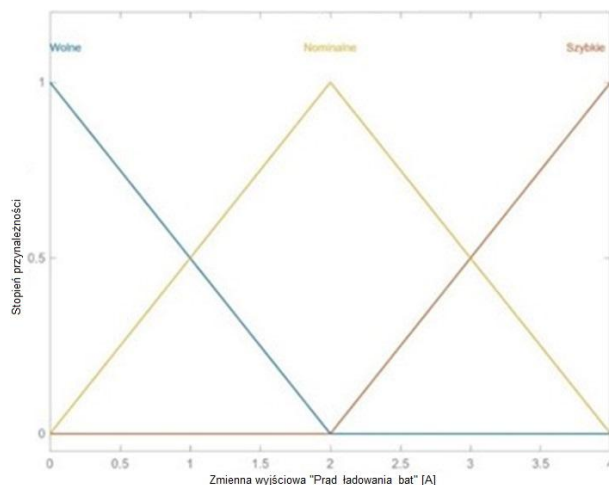
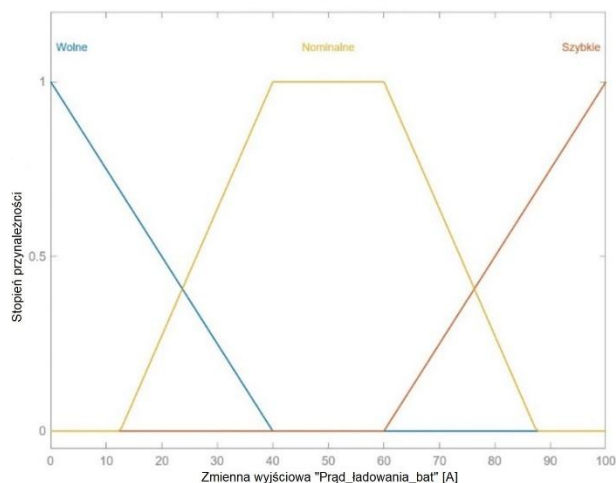
Ostatni parametrem wyjściowym regulatora logiki rozmytej jest wartość mocy ogranicznika mocy wyjściowej. Zadaniem tego elementu jest nadzór nad konsumpcją energii elektrycznej. Przykładowo w przypadku niskiego stopnia naładowania magazynów energii i braku generacji PV konieczne jest

ograniczenie mocy w celu eliminacji zagrożenia uszkodzenia zasobników energii (wynikające z eliminacji zagrożenia głębokiego rozładowania).

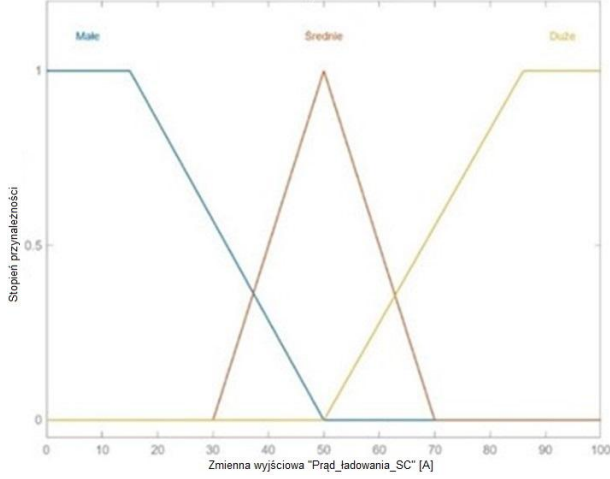


Rys. 116 Nastawa parametru ogranicznika mocy

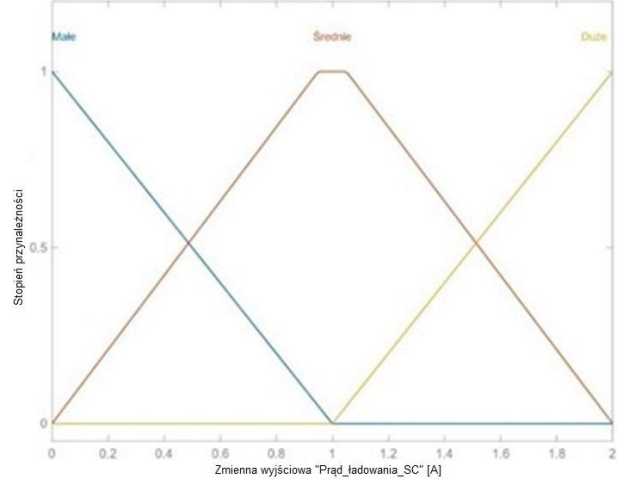
Na Rys. 116 przedstawiono wykres przebiegów uzyskanych z ogranicznika mocy. Element nie ogranicza mocy dlatego, że jego wartość stale jest znacząco większa niż zapotrzebowanie na energię elektryczną. Widoczne również są próby nadążania algorytmu za zmianami obciążenia. Wartość ogranicznika mocy przyjmuje stałą wartość na poziomie 2500W, co szczególnie widoczne jest w momencie działania instalacji PV. W celu poprawy jakości regulacji dokonano analizy możliwych powodów błędnych wskazań nastaw sygnałów wyjściowych. Dokonano weryfikacji zadeklarowanych reguł w wyniku czego dodano 3 brakujące reguły. Następnie dokonano korekcji funkcji przynależności odpowiadających za ładowanie baterijnego magazynu energii oraz super kondensatorów. Na Rys. 117 przedstawiono kształt funkcji przynależności przed korekcją, a wartości odniesiono do możliwości działania magazynu energii opartego na pakiecie baterii LiFePO₄, natomiast wartości po korekcji przedstawione na Rys. 118 dostosowano do możliwości prądowych układu.



Rys. 117 Funkcja przynależności dla prądu ładowania baterii przed korekcją



Rys. 118 Funkcja przynależności dla prądu ładowania baterii po korekcji



Rys. 119 Funkcja przynależności dla prądu ładowania superkondensatorów przed korekcją

Rys. 120 Funkcja przynależności dla prądu ładowania superkondensatorów po korekcji

Podobną zmianę wprowadzono w odniesieniu do parametrów prądu ładowania superkondensatorów, rezygnując z odwołania do jego wydajności prądowej na rzecz charakterystyki całego układu, uwzględniającej parametry ładowania pakietu baterijnego oraz generatora energii w postaci paneli PV. Różnice pomiędzy parametrami funkcji przynależności przed oraz po korekcji przedstawiono na Rys. 118 oraz Rys. 120. Funkcje przynależności określające prąd ładowania baterii przedstawiono na Rys. 118 wyrażono za pomocą wzorów (39), (40), (41).

$$\mu_{Wolne}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ \frac{1,25-x}{1,25}, & 0 < x \leq 1,25 \\ 0, & x \geq 1,25 \end{cases} \quad (39)$$

$$\mu_{Nominalne}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{1,25}, & 0 < x \leq 1,25 \\ \frac{2,5-x}{1,25}, & 1,25 < x < 2,5 \\ 0, & x \geq 2,5 \end{cases} \quad (40)$$

$$\mu_{Szybkie}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1,25 \\ \frac{x-1,25}{1,25}, & 1,25 < x < 2,5 \\ 1, & x \geq 2,5 \end{cases} \quad (41)$$

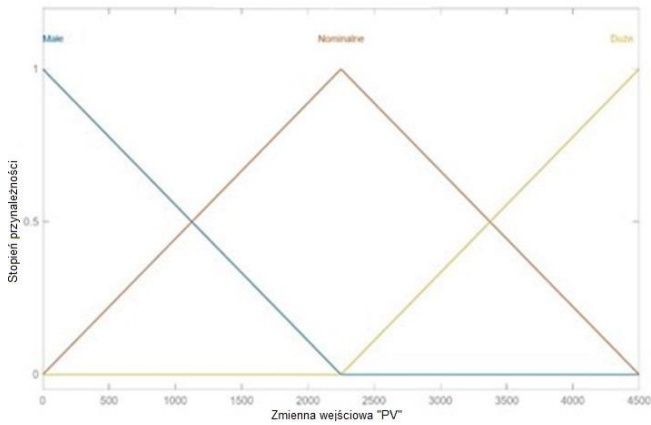
Natomiast funkcje (42), (43), (44) opisują funkcje przynależności prądu ładowania superkondensatorów, co zastało przedstawione w formie wykresu na Rys. 120.

$$\mu_{Małe}(x) = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 1 - x, & 0 < x < 1 \\ 0, & x \geq 1 \end{cases} \quad (42)$$

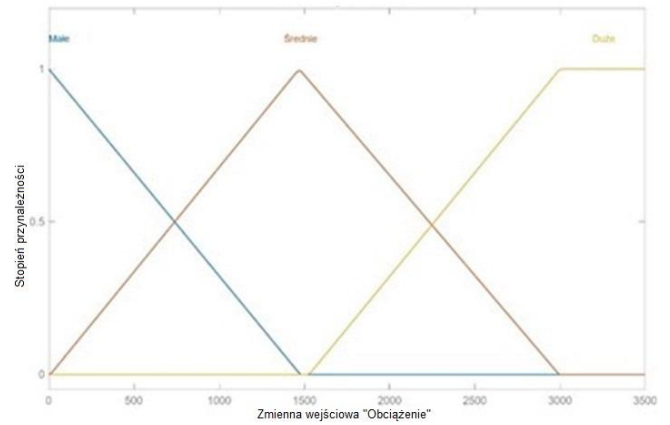
$$\mu_{Średnie}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ x, & 0 < x \leq 1 \\ 2 - x, & 1 < x < 2 \\ 0, & x \geq 2 \end{cases} \quad (43)$$

$$\mu_{Duże}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 \\ x - 1, & 1 < x < 2 \\ 1, & x \geq 2 \end{cases} \quad (44)$$

Korekcji poddano również parametry funkcji przynależności dla parametrów wejściowych czyli rzeczywistych danych pomiarowych z produkcji energii elektrycznej mikroinstalacji PV oraz danych dotyczących zużycia energii elektrycznej w obiekcie.



Rys. 121 Wykres funkcji przynależności dla produkcji energii z mikroinstalacji PV



Rys. 122 Wykres funkcji przynależności dla zużycia energii elektrycznej w obiekcie

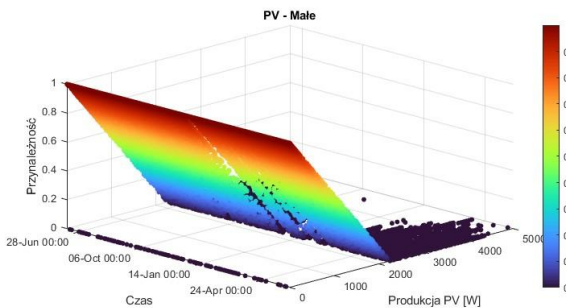
Przedstawione funkcje przynależności produkcji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej przedstawionej na Rys. 121 wyrażono również za pomocą wzorów (45), (46), (47).

$$\mu_{Małe}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ 1 - \frac{x}{2250}, & 0 < x < 2250 \\ 0, & x \geq 2250 \end{cases} \quad (45)$$

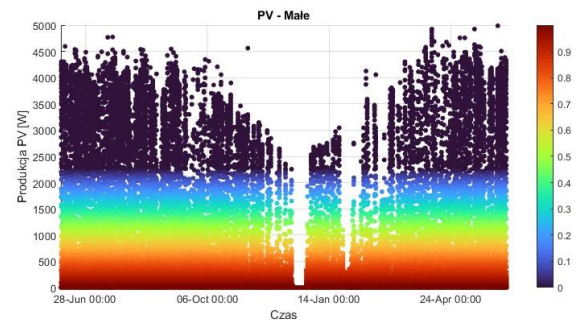
$$\mu_{Nominalne}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ \frac{x}{2250}, & 0 < x < 2250 \\ 1 - \frac{x-2250}{2250}, & 2250 < x < 4500 \\ 0, & x \geq 4500 \end{cases} \quad (46)$$

$$\mu_{Duże}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2250 \\ \frac{x-2250}{2250}, & 2250 < x < 4500 \\ 1, & x \geq 4500 \end{cases} \quad (47)$$

Na podstawie powyższych wzorów wyznaczono wartości stopni przynależności dla poszczególnych wartości mocy produkcji energii elektrycznej w okresie od 8.06.2022 do 8.06.2023. Funkcje przynależności odniesiono do rzeczywistych wyników pomiarowych oraz przedstawiono na wykresach. Na wykresach Rys. 123 oraz Rys. 124 przedstawiono stopnie funkcji przynależności „MAŁE” odniesione do mocy produkcji energii elektrycznej. Wykres funkcji przynależności (Rys. 123) odwzorowuje kształt funkcji przynależności „MAŁE” (Rys. 121), natomiast na Rys. 124 przedstawiono rozkład mocy produkcji energii z uwzględnieniem stopnia przynależności do funkcji „MAŁE”. Jest to drugi co do wielkości zbiór obejmujący aż 46676 elementów, które w przypadku funkcji przynależności „MAŁE” przyjmują stopień przynależności większy od 0. Zbiór elementów funkcji „MAŁE” stanowi, więc 88,77% wszystkich pomiarów.

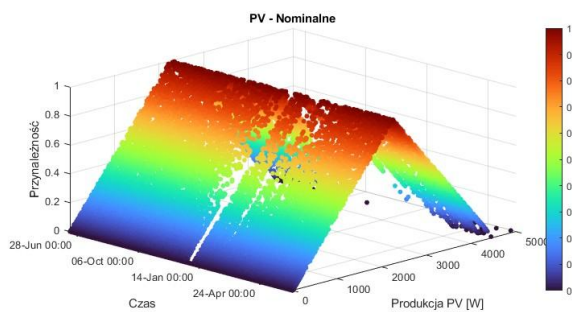


Rys. 123 Wykres funkcji przynależności "MAŁO" dla produkcji PV

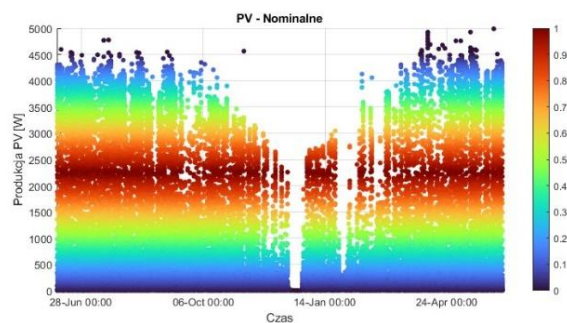


Rys. 124 Rozkład produkcji energii PV z uwzględnieniem stopnia przynależności "MAŁO"

W kolejnym etapie obliczono stopnie przynależności dla funkcji „NOMINALNE”, a wyniki przedstawione zostały za pomocą poniższych wykresów Rys. 125 oraz Rys. 126. Podobnie jak w poprzednim przypadku wykres Rys. 125 odwzorowuje kształt zadeklarowanej funkcji przynależności „NOMINALNE”. Prawie wszystkie elementy można uznać jako nominalną produkcję energii elektrycznej co widocznej jest na Rys. 126. Zbiór pomiarów przyjmujących stopień przynależności większy od 0 obejmuje aż 52348 pojedynczych elementów co stanowi 99,55% całości.

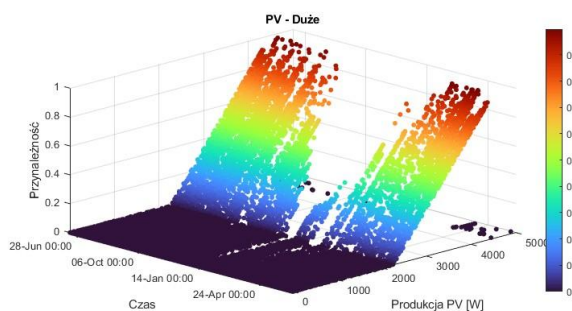


Rys. 125 Wykres funkcji przynależności "NOMINALNE" dla produkcji PV

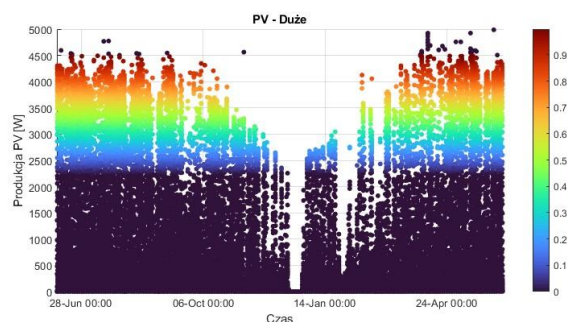


Rys. 126 Rozkład produkcji energii PV z uwzględnieniem stopnia przynależności "NOMINALNE"

Ostatnim zbiorem, zarazem najmniej licznym zbiorem jest produkcja energii elektrycznej z PV, którą można uznać za „DUŻE”. Wykresy przedstawiające kształt funkcji oraz rozkład wyników przedstawiono na Rys. 127 oraz Rys. 128. Zbiór elementów przyjmujących stopień przynależności „DUŻO” obejmuje 5671 pojedynczych wartości co stanowi jedynie 10.78% wszystkich pomiarów. Zarejestrowano 49 pomiarów przekraczających moc generacji energii elektrycznej przez falownik, dlatego uznano te wyniki za błędne pomiary stanowiące 0,09% wszystkich wyników.



Rys. 127 Wykres funkcji przynależności "DUŻE" dla produkcji PV



Rys. 128 Rozkład produkcji energii PV z uwzględnieniem stopnia przynależności "DUŻE"

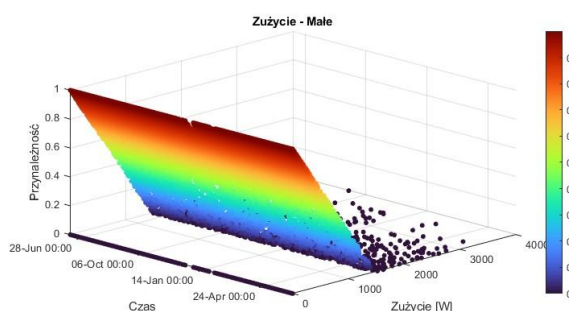
Na podstawie wykresów funkcji przynależności (Rys. 122) wyznaczono wzory matematyczne poszczególnych funkcji „MAŁE”, „NOMINALNE” oraz „DUŻE” w odniesieniu do zużycia energii elektrycznej przez obiekt mieszkalny.

$$\mu_{Małe}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0 \\ 1 - \frac{x}{1500}, & 0 < x < 1500 \\ 0, & x \geq 1500 \end{cases} \quad (48)$$

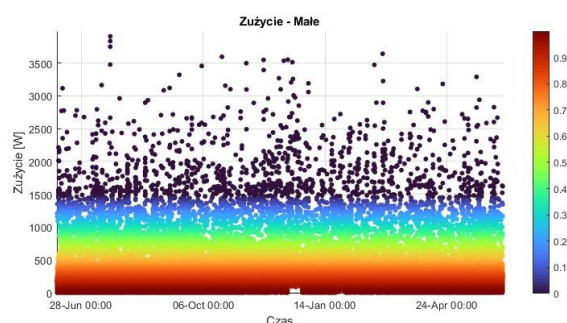
$$\mu_{Średnie}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 8,5 \\ \frac{x-8,5}{1500}, & 8,5 < x < 1500 \\ \frac{3000-x}{1500}, & 1500 < x < 3000 \\ 0, & x \geq 3000 \end{cases} \quad (49)$$

$$\mu_{Du\acute{z}e}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1500 \\ \frac{x-1500}{1500}, & 1500 < x < 3000 \\ 1, & 3000 < x < 3500 \\ 0, & x \geq 3000 \end{cases} \quad (50)$$

Podobnie jak w przypadku produkcji energii z paneli PV dla poszczególnych wskazań odciażenia wyznaczono stopnie przynależności zgodnie ze wzorami (48), (49), (50).

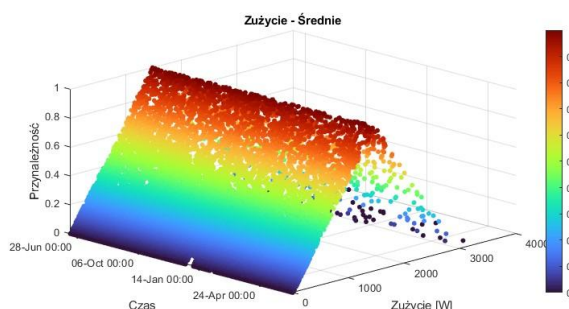


Rys. 129 Wykres funkcji przynależności "MAŁE" dla zużycia energii

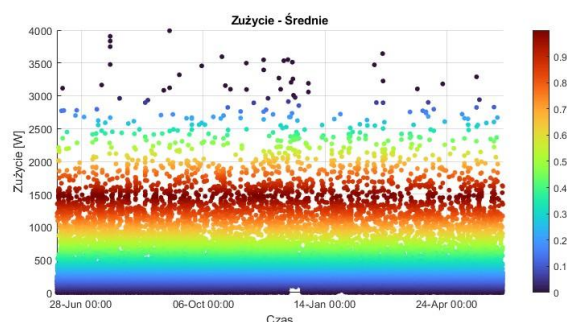


Rys. 130 Rozkład zużycia energii z uwzględnieniem stopnia przynależności "MAŁE"

Na Rys. 129 oraz Rys. 130 przedstawiono wykres stopnia funkcji przynależności „MAŁE” w odniesieniu do zmierzonych wartości zużycia energii elektrycznej stanowiącej obciążenie instalacji. Zbiór funkcji przynależności „MAŁE” obejmuje 44074 pojedynczych elementów co stanowi 83,82% wszystkich dostępnych pomiarów. Zbiór określany jako „MAŁE” jest najliczniejszym zbiorem ze wszystkich zbiorów dla zużycia energii elektrycznej.



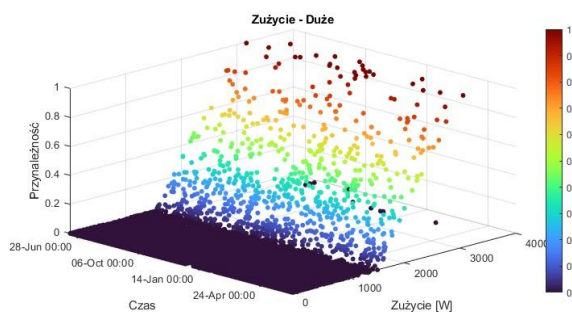
Rys. 131 Wykres funkcji przynależności "ŚREDNIE" dla zużycia energii



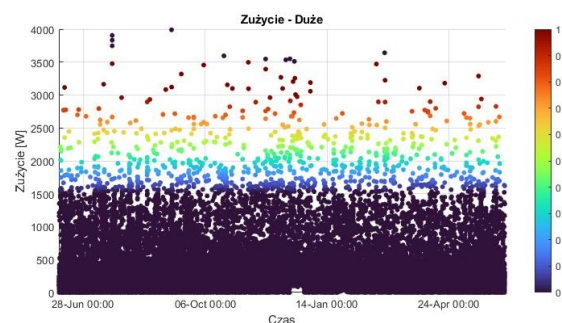
Rys. 132 Rozkład zużycia energii z uwzględnieniem stopnia przynależności "ŚREDNIE"

Drugim co do wielkości zbiorem elementów jest zbiór stopni przynależności dla funkcji „ŚREDNIE” obejmujących 43500 pojedynczych pomiarów co stanowi 82,73% wszystkich elementów. W przypadku elementów zbioru funkcji przynależności „ŚREDNIE” widoczne jest że większość pomiarów ma wartość poniżej 1500W (42510 elementów zbioru), natomiast jedynie 990 elementów zbioru

„ŚREDNIE” przekracza wartość obciążenia 1500W co stanowi jedynie 2,27% wszystkich elementów tego zbioru.



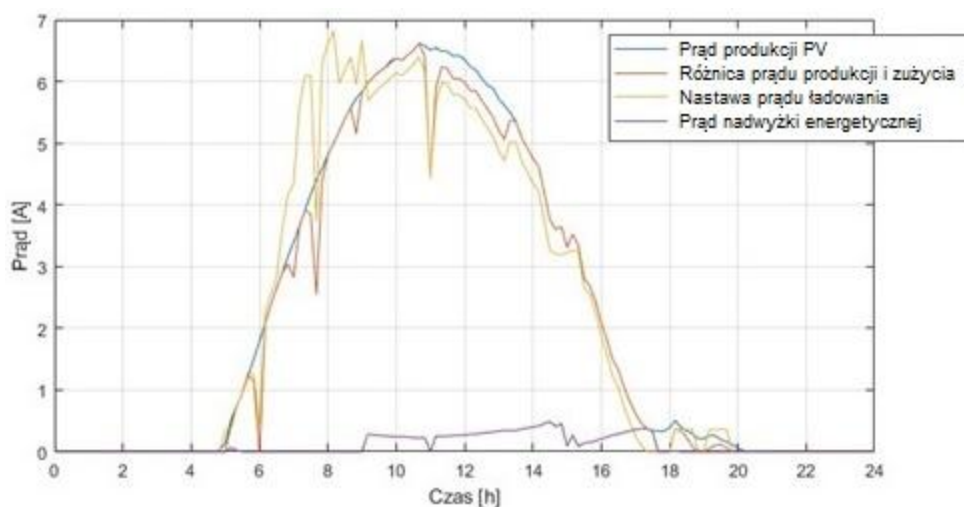
Rys. 133 Wykres funkcji przynależności "DUŻE" dla zużycia energii



Rys. 134 Rozkład zużycia energii z uwzględnieniem stopnia przynależności "DUŻE"

Najmniej liczny zbiór jest zbiór z elementami funkcji przynależności określanymi jako DUŻE i obejmującymi jedynie 954 wartości pomiarów co stanowi jedynie 1,814% wszystkich elementów.

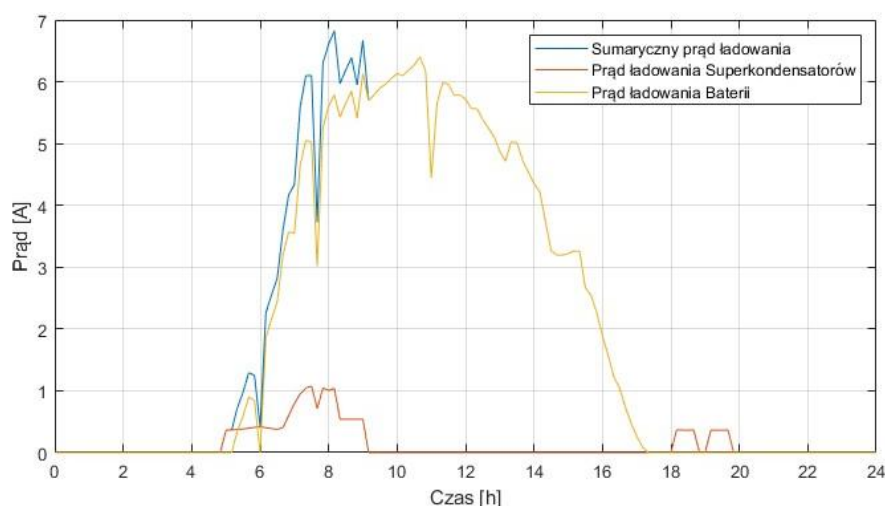
Następnie przeprowadzono symulację układu ze skorygowanymi parametrami funkcji przynależności, a wyniki tych symulacji przedstawiono na Rys. 135.



Rys. 135 Wykres prądów ładowania po korekcji parametrów regulatora

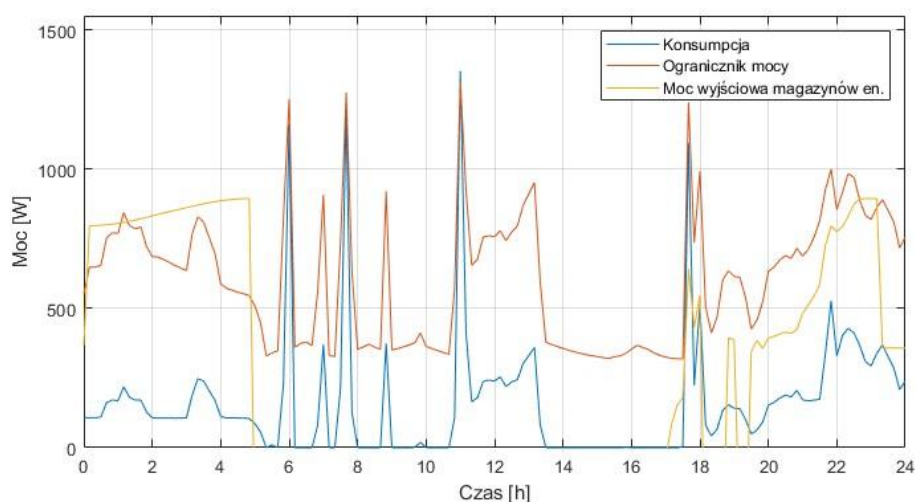
W trakcie przeprowadzonych symulacji uzyskano autokonsumpcję na poziomie 95,67%. Wykres nastaw sumarycznych prądów ładowania odwzorowuje kształt produkcji energii pomniejszonej o zużycie energii. Kolorem fioletowym na wykresie zaznaczono nadwyżki energii które w trakcie 24h wyniosły 1,37kWh przy dziennej produkcji energii z instalacji PV na poziomie 31,64kWh. W przypadku instalacji bez magazynów energii stopień autokonsumpcji wynosił by jedynie ok. 5%, a nadwyżka w postaci 29,99kWh energii elektrycznej oddana została by do sieci. Na Rys. 136 przedstawiono wykres nastaw prądów ładowania superkondensatorów i baterii. Ładowanie pakietu superkondensatorów ma charakter okresowo stały natomiast w przypadku baterii litowych jest ściśle związany z produkcją

i obciążeniem. Widocznej jest również, że ładowanie superkondensatorów odbywa się w pierwszej kolejności. Zjawisko to jest celowe ze względu na właściwości poszczególnych zasobników energii, w rozpatrywanym przypadku pakiet superkondensatorów odpowiedzialny jest za stany dynamiczne (nagłe piki mocy) co ma chronić litowy magazyn energii. Połączenie szybkiego krótkoterminowego magazynu z średnioterminowym wolniejszym magazynem energii opisano w [75].



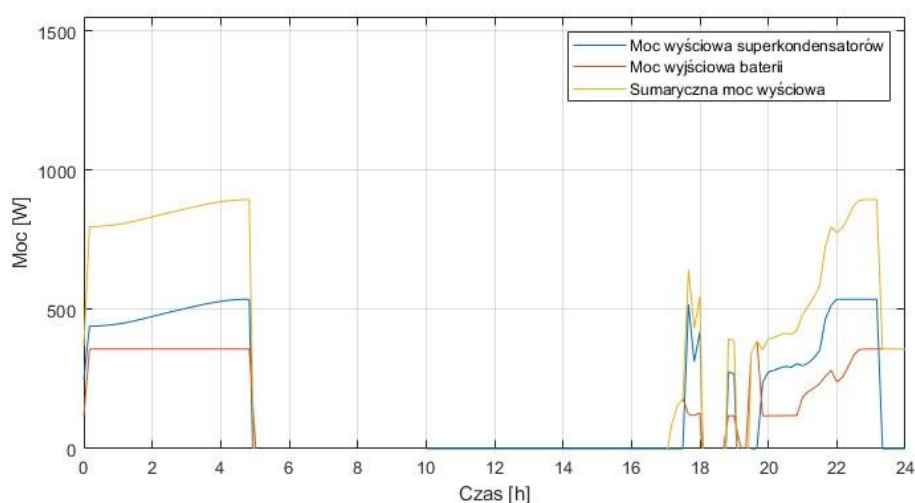
Rys. 136 Nastawy prądów ładowania i rozładowania dla superkondensatorów i baterii

W kolejnym kroku przystąpiono do analizy mocy wyjściowej układu rutera energii. Na Rys. 137 przedstawiono wykresy: rzeczywistego przebiegu zużycia energii, nastawę ogranicznika mocy oraz sumarycznej mocy wyjściowej magazynów energii. Nastawa ogranicznika mocy przyjmuje celowo wartości większe od rzeczywistych wartości zużycia ze względu na konieczność zapewnienia krótkotrwałych pików mocy niezarejestrowanych przez użyty układ pomiarowy. Brak rejestracji krótkotrwałych pików wynika z faktu, że wyniki rejestrowane są w odstępach 10-minutowych.

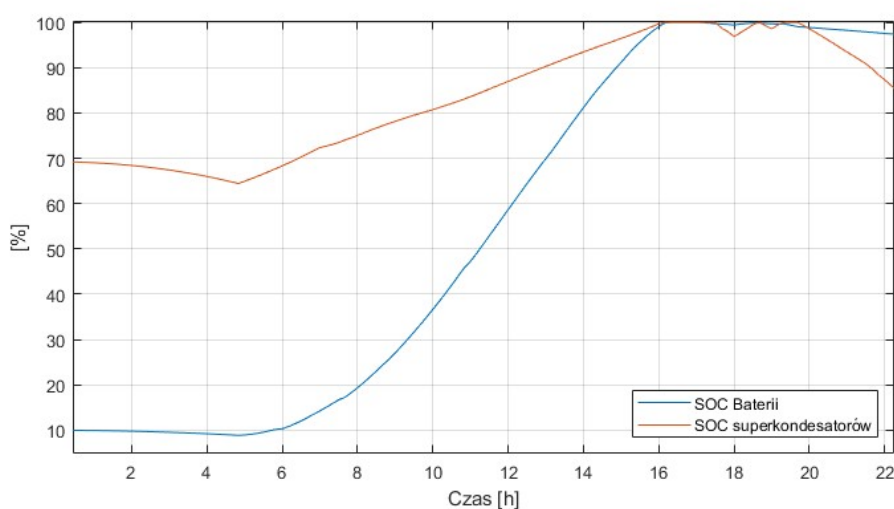


Rys. 137 Wykres mocy wyjściowych układu zarządzania energią

Kolejnym elementem wykresu jest przebieg sumarycznej mocy wyjściowej magazynów energii, którego charakterystyczną cechą jest zerowa wartość w okresie produkcji energii z paneli PV. W tym przedziale czasowym całość wyprodukowanej przez instalację energii zostaje w pierwszej kolejności zapotrzebowana przez konsumpcję, natomiast następnie do ładowania poszczególnych magazynów energii. Podział na moce wyjściowe poszczególnych magazynów energii przedstawiono na Rys. 138. W pierwszej kolejności pobierana jest energia z superkondensatorów, następnie dopiero z baterii litowych. Jest to celowe ze względu na fakt większej odporności superkondensatorów na dynamiczne zmiany obciążenia. W godzinach od ok. 5:00 do 17:00 magazyny pozostają w trybie ładowania.



Rys. 138 Wykres mocy rozładowania magazynów energii



Rys. 139 Wykres zmian stopnia naładowania poszczególnych magazynów energii

Jednym z parametrów najlepiej obrazujących zachowanie się magazynów energii jest stopień naładowania (SOC), który został przedstawiony dla poszczególnych zasobników energii na Rys. 139. Z przedstawionego wykresu widać, że w trakcie dnia magazyn energii oparty na technologii ogniw

litowych o pojemności ok. 20kWh zostaje załadowany do 100%, podobnie jak magazyn superkondensatorów o dużo mniejszej pojemności 650Wh. Można zauważyć, że instalacja PV nie jest dopasowana do zapotrzebowania na energię elektryczną obiektu.

W trakcie opracowywania projektu regulatora zastosowano metodę fuzyfikacji środka ciężkości (ang. *centroid*) ze względu na jej zdolność do odwzorowania średniego momentu rozkładu przynależności wyjściowej funkcji rozmytej. W kontekście regulatora rutera energii, gdzie decyzje sterujące muszą uwzględniać wielowymiarowe zależności (np. między poziomem SOC, produkcją i zapotrzebowaniem energii). Centroid zapewnia wynik oparty na całkowitym rozkładzie danych rozmytych, a nie tylko lokalnych ekstremach. Pozwala to uzyskać bardziej zrównoważoną i fizycznie uzasadnioną wartość sterującą, co ma znaczenie zwłaszcza w dynamicznych układach z wieloma wejściami i ciągłym charakterem sterowania. Mimo, że wymaga większej mocy obliczeniowej niż prostsze metody, jej zalety sprawiają, że jest powszechnie wykorzystywana w zastosowaniach praktycznych, takich jak automatyka przemysłowa, zarządzanie energią czy systemy inteligentnego sterowania.

$$x_{COG} = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (51)$$

Gdzie:

$\mu(x)$ – wynikowa (złożona) funkcja przynależności na wyjściu po agregacji,

W trakcie dalszych analiz przeprowadzono badania symulacyjne wykorzystujące inne metody defuzyfikacji:

- Bisector (metoda bisekcji pola powierzchni) polega na wyznaczeniu punktu na osi wyjściowej, który dzieli pole pod funkcją przynależności na dwie równe części, ignorując momenty rozkładu. Bisector to metoda prostsza, ale mniej dokładna niż metoda środka ciężkości.

$$\int_a^{x_{bisector}} \mu(x) dx = \frac{1}{2} \int_a^b \mu(x) dx \quad (52)$$

Gdzie:

$[a, b]$ – zakres zmiennej wyjściowej

- LOM (największa z maksymalnych wartości) w tej metodzie wybierana jest największa wartość spośród punktów, gdzie funkcja przynależności osiąga maksimum. Preferuje ona rozwiązania prawostronne, co może być przydatne w aplikacjach wymagających konserwatywnego podejścia.

$$x_{LOM} = \max\{x \mid \mu(x) = \mu_{max}\} \quad (53)$$

- MOM (średnia z maksymalnych wartości) polega na obliczaniu wartości średniej punktów, w których funkcja osiąga maksimum. Zapewnia bardziej neutralne podejście w przypadku wieloznaczności wyników.

$$x_{MOM} = \frac{1}{n} \sum_{x_i \in X_{max}} x_i \quad (54)$$

Gdzie:

$$X_{max} = \{x \mid \mu(x) = \mu_{max}\}$$

$$\mu_{max} = \max_x \mu(x)$$

n to liczba punktów spełniających $\mu(x) = \mu_{max}$

- SOM (najmniejsza z maksymalnych wartości) metoda, w której następuje wybranie najmniejszej wartości, w których funkcja osiąga maksimum. Metoda wykorzystywana w systemach, które preferują minimalizację wartości wyjściowej w przypadku rozmytych wyników.

$$x_{SOM} = \min\{x \mid \mu(x) = \mu_{max}\} \quad (55)$$

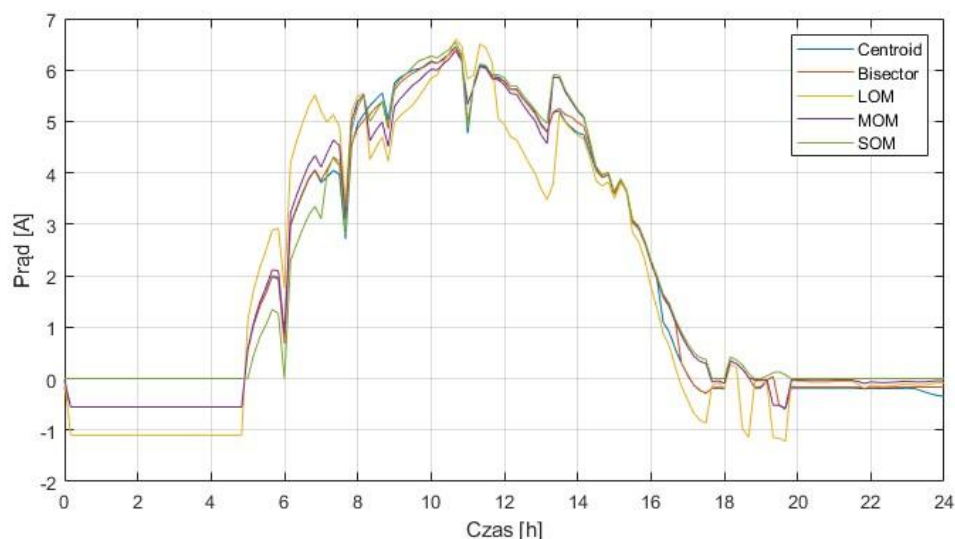
Dokonano serię symulacji obejmujących badanie regulatora rutera logiki rozmytej wykorzystującego różne metody fuzyfikacji. Badania przeprowadzono dla zbioru obejmującego 24h oraz zbioru obejmującego 365dni, uzyskane wyniki stopni autokonsumpcji przedstawiono w Tabela 10.

Tabela 10 Stopień autokonsumpcji dla różnych metod defuzyfikacji

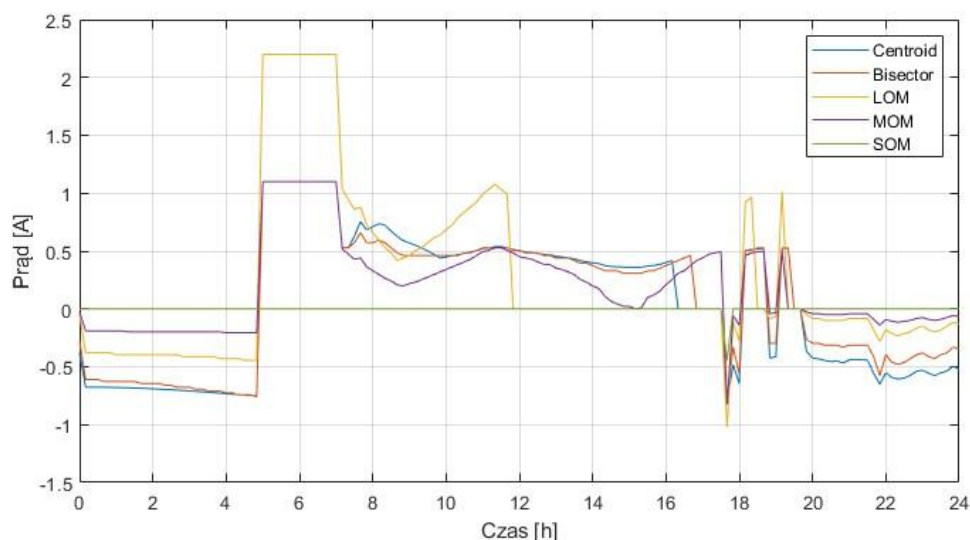
Metoda defuzyfikacji	Stopień Autokonsumpcji	
	w skali dnia	w skali roku
Centroid	98,82%	90,55%
Bisector	99,23%	91,19%
LOM	92,69%	86,19%
MOM	98,95%	93,53%
SOM	98,74%	99,94%

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono za pomocą wykresów prądów ładowania oraz rozładowania zasobników energii w postaci baterii litowych oraz pakietu superkondensatorów. Dodatnia wartość prądu na wykresach Rys. 140 oraz Rys. 141 oznacza prąd ładowania natomiast ujemna

konsumpcję energii. Pośród zastosowanych metod fuzyfikacji najbardziej wyróżniające są LOM oraz SOM. Metoda LOM charakteryzuje się najniższymi parametrami autokonsumpcji zarówno w skali dnia jak również roku. Przebiegi prądów w metodzie LOM znacznie różnią się od pozostałych i większości przypadków charakteryzuje się większymi wartościami zmian parametrów w odpowiedzi na dynamiczne stany obciążenia i produkcji energii.

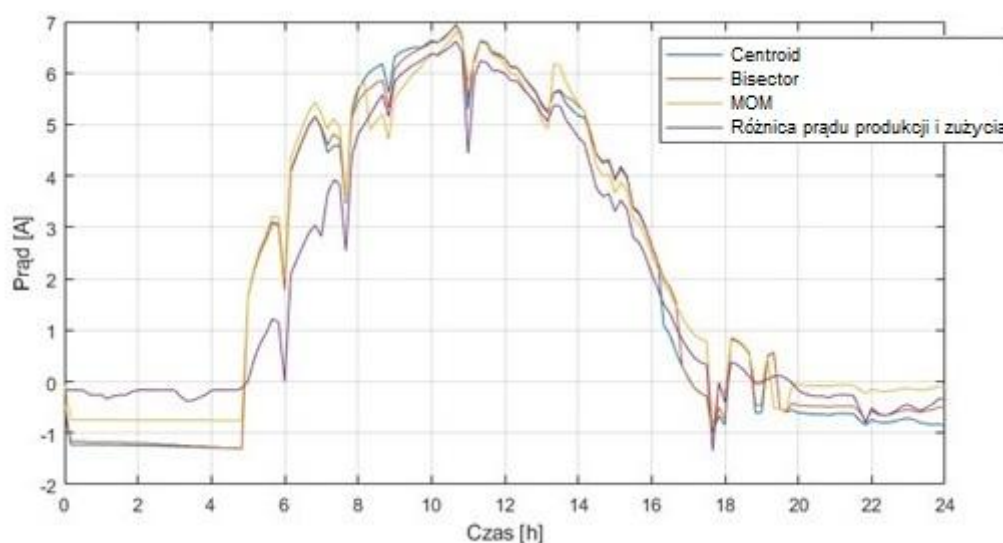


Rys. 140 Przebiegi prądu ładowania/rozładowania baterii ogniwo litowych



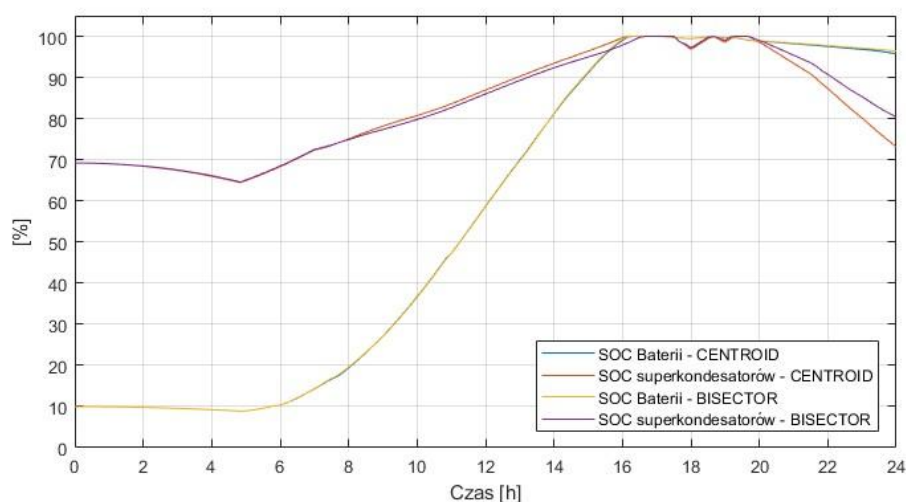
Rys. 141 Przebiegi prądu ładowania/rozładowania pakietu superkondensatorów

W drugim przypadku, czyli metody SOM, zauważono że prąd rozładowania utrzymywał się na poziomie zerowym przez większość czasu, uniemożliwiając tym samym zasilanie poprzez magazyny energii. Podobne zjawisko zauważono również w przypadku ładowania superkondensatorów, gdzie wartość prądu była przez większość czasu równa zero.



Rys. 142 Przebiegi sumy prądów ładowania i rozładowania magazynów energii

W kolejnym etapie przeprowadzono badania w których porównano sumę nastaw prądów zasobników energii uzyskanych dla różnych metod fuzyfikacji z prądami na przyłączy instalacji. Wartości ujemne prądów podobnie jak w poprzednim przypadku oznaczają zużycie energii natomiast wartości dodatnie produkcję energii z OZE. Wszystkie nastawy charakteryzują się zbliżonym przebiegiem, szczególnie widoczne jest to w przypadku Centroid oraz Bisector. Fuzyfikacja metodą MOM w odniesieniu do zużycia energii nie zapewnia wymaganego poziomu dostępu do mocy, co szczególnie widoczne jest w godzinach wieczornych (od godz. 19:00).

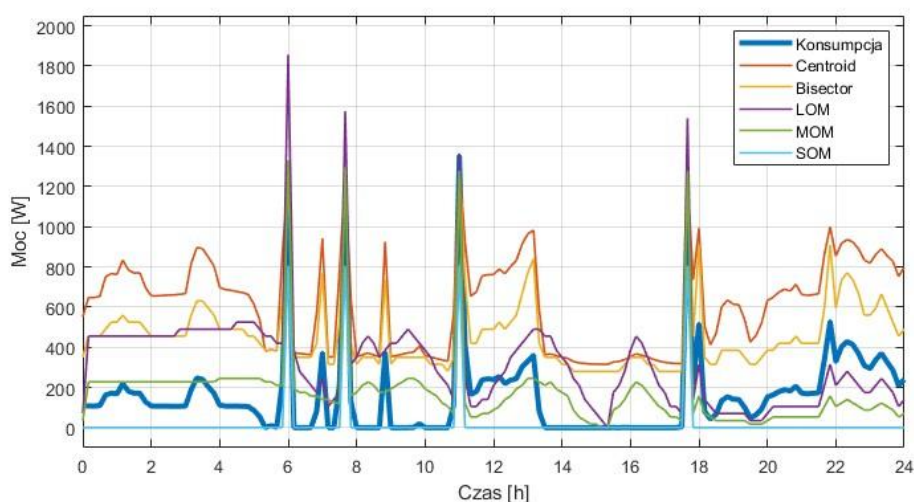


Rys. 143 Stopienie SOC dla baterii i superkondensatorów

Oddziaływanie na układ prądów ładowania i rozładowania widoczny jest szczególnie w przypadku parametru stopnie naładowania SOC. Na Rys. 143 przedstawiono różnicę pomiędzy stopniami SOC dla regulatora wykorzystującego fuzyfikację Centroid oraz Bisector. Na przedstawionym wykresie można zauważyć, że w przypadku przebiegu SOC baterii oba przebiegi praktycznie pokrywają się. Natomiast

w przypadku SOC superkondensatorów zauważalne są większe różnice, szczególnie w porze wieczornej, po godzinie 19:00. Średnia procentowa różnica pomiędzy przebiegami SOC dla superkondensatorów i baterii wyniosła 0,0825%, natomiast średnioprocentowa różnica SOC baterii dla wybranych metod fuzyfikacji wyniosła 0,3693%.

Zastosowanie różnych metod defuzyfikacji ma znaczący wpływ również na działanie parametrów ogranicznika mocy, co zostało przedstawione na Rys. 144. Pogrubioną linią przedstawiono konsumpcję energii jako odniesienie do pozostałych wskazań. Wartość ogranicznika mocy powinna odwzorowywać przebieg konsumpcji energii i posiadać wartość większą niż aktualna moc, nie ograniczając mocy. Wyjątkiem, który został zadeklarowany w bazie reguł jest sytuacja braku dostępu do energii z paneli PV oraz ograniczony dostęp do mocy z magazynów energii. W przedstawionym przypadku taka sytuacja nie występuje, więc też moc wyjściowa nie powinna być ograniczona.

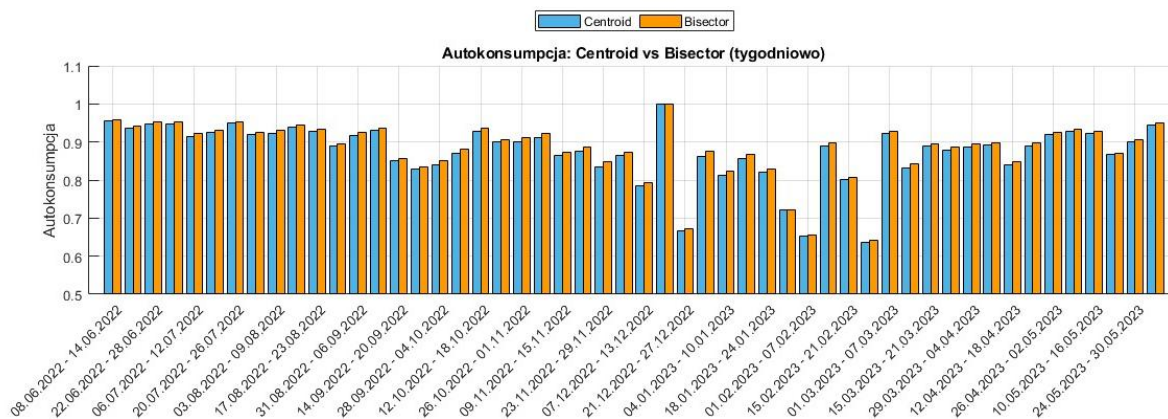


Rys. 144 Wykres przebiegu ogranicznika odniesionego do konsumpcji energii

Najgorzej rzeczywisty przebieg zużycia energii odwzorowuje ogranicznik mocy oparty na metodzie SOM, dlatego że przyjmuje wartość zerową przy umiarkowanym zużyciu energii. Pozostałe metody czyli MOM oraz LOM w prawidłowy sposób odwzorowuje konsumpcję energii, ale wprowadza w trakcie działania ograniczenia mocy wyjściowej, co jest działaniem niepożądanym z perspektywy działania całego układu. Prawidłowe odwzorowanie, połączone z bezpiecznym marginesem błędu, występuje w przypadku metod Centroid oraz Bisector.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania symulacyjne, których celem jest wyznaczenie stopnia autokonsumpcji w każdym tygodniu badanego roku. Symulacje ograniczono do dwóch metod defuzyfikacji czyli Centroid i Bisector, a wyniki przedstawiono za pomocą wykresu Rys. 145. Najwyższy stopień autokonsumpcji uzyskano w okresie 14.12.2022 – 20.12.2022 i dla obu metod wyniósł równie 1. Powodem jest ograniczona produkcja energii z PV wynikająca z okresu zimowego i jednego z najkrótszych okresów promieniowania słonecznego w ciągu dnia. Najniższy wynik (0,6351)

uzyskano w okresie 22.02.2023 – 28.02.2025 dla metody Centroid, tym samym okresie metoda Bisektor również uzyskała najniższy wynik (0,6419). Najniższy stopień autokonsumpcji może być spowodowany wieloma czynnikami m.in. zapotrzebowaniem na energię elektryczną w danym tygodniu. Stopień autokonsumpcji powyżej 0,9 odnotowano 23 razy w przypadku metody Centroid oraz 24 razy w przypadku Bisector. Stopień autokonsumpcji w przedziale 0,8-0,9 zarejestrowano 24 razy dla metody Centroid oraz 23 razy dla Bisector. Wartości autokonsumpcji poniżej 0,8 uzyskano jedynie w 5 przypadkach zarówno dla Centroid jak również Bisector.



Rys. 145 Wykres stopni autokonsumpcji z podziałem na poszczególne tygodnie

Biorąc pod uwagę wszystkie uzyskane wyniki jak również wskazania stopnia autokonsumpcji najlepszą metodą fuzyfikacji jest Bisector.

7. Analiza możliwości zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej

Analizie poddano możliwości zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w całkowitej produkcji energii na przykładzie pojedynczego obiektu oraz ocenę stopnia wykorzystania wyprodukowanej energii na potrzeby własne. Kluczowym czynnikiem w zwiększaniu udziału OZE — szczególnie najpopularniejszych obecnie w Polsce instalacji fotowoltaicznych (PV), których łączna moc zainstalowana przekroczyła 19 165 MW — jest autokonsumpcja. Ze względu na przesunięcie w czasie pomiędzy okresem produkcji energii a zapotrzebowaniem na nią, a także z uwagi na niestabilny charakter pracy OZE, w dużej mierze uzależniony od warunków atmosferycznych, możliwości sterowania generacją energii — na przykład przez instalacje PV — są znacznie ograniczone, a w wielu przypadkach wręcz niemożliwe. Jedyna możliwość sterowania polega na ograniczaniu produkcji mocy, a bez dodatkowego zasobnika energii nie ma możliwości wykorzystania energii poza okresem jej produkcji. Zastosowanie w instalacji elektrycznej magazynu energii w połączeniu z instalacją PV umożliwia przy prawidłowym doborze komponentów wykorzystanie blisko 100%

wyprodukowanej energii na bieżące potrzeby co zostało przedstawione na Rys. 59 - Rys. 60. Oznacza to, że całość pozyskanej energii wykorzystywana jest na bieżące potrzeby. Obecne regulacje w rozliczeniu skupu nadwyżek energii z produkcji OZE, są niekorzystne dla właścicieli mikroinstalacji PV dlatego, że cena skupu energii w okresach zwiększonej produkcji jest nieproporcjonalnie niska. Regulacje takie mają za zadanie zachęcić właścicieli instalacji elektrycznych do wykorzystywania pozyskanej energii na bieżące potrzeby (zwiększenie autokonsumpcji) lub modernizację instalacji o dodatkowy magazyn energii. Ograniczenia związane ze stosowaniem instalacji PV bez magazynu energii opisane zostały w rozdziale 2.2. Coraz częściej w połączeniu z instalacją PV stosuje się magazyn energii obsługiwany poprzez falownik hybrydowy, łączący funkcjonalność falownika fotowoltaicznego z ładowarką magazynu energii. Zastosowanie takiego połączenia umożliwia zdecydowanie lepsze wykorzystanie energii z fotowoltaiki co widoczne jest na Rys. 57. W obecnie najczęściej stosowanych instalacjach stosuje się magazyn energii w jednej technologii, najczęściej są to baterie litowe. Z przedstawionych danych na Rys. 58 można zauważyć, że zastosowanie baterii litowych do celu magazynowania energii w okresie całego roku jest nieopłacalne gdyż jego pojemność powinna wynosić ok. 1/3 rocznego zapotrzebowania energetycznego obiektu, biorąc pod uwagę, że obiekty mieszkalne opisane w pkt. 3.1 zapotrzebowują od 2 500 kWh do 3 500 kWh to odpowiedni dla nich magazyn energii powinien być zdolny do zgromadzenia 800 kWh do 1200 kWh. Zastosowanie takich magazynów energii w obiektach mieszkalnych nie ma uzasadnienia ekonomicznego, dlatego, że cena 1 MWh magazynu energii w technologii ogniw litowych kosztuje obecnie od 1 500 000 zł wzwyż. Alternatywą może być hybrydyzacja magazynu energii poprzez podział na dobowy oraz sezonowy co zostało opisane w rozdziale 3. Dzięki temu pojemność litowego magazynu energii ograniczona byłaby jedynie do dobowego zapotrzebowania na energię, natomiast technologia sezonowego magazynu energii dobrana powinna zostać w taki sposób by umożliwiać jej skalowalność w stosunkowo niskich kosztach. Przykładem takich technologii są ogniwa wanadowe oraz ogniwa wodorowe. Poza faktem wysokich kosztów pozyskania takich magazynów energii należy wziąć pod uwagę, wymiary takich jednostek przyjmujących najczęściej postać kontenerową np. Rys. 11 co zdecydowanie utrudnia adaptację na działce domu jednorodzinnego. W dalszej części rozprawy przyjęto więc układ przedstawiony na Rys. 98, w który hybrydyzacja odbywa się poprzez zastosowanie dobowego magazynu energii połączonego wraz z pakietem superkondensatorów. Pakiet superkondensatorów pełni funkcję zabezpieczenia baterijnego magazynu energii oraz zwiększenia jego żywotności. Wykorzystanie krótkoterminowego magazynu energii w połączeniu z średnioterminowym opisane zostało w pkt. 3.2.3 Taka konfiguracja umożliwia zdecydowanie lepsze wykorzystanie pozyskanej energii w skali roku uzyskując autokonsumpcję na poziomie max. 91,19%. Wyznaczono również stopień niezależności energetycznej obiektu wynoszący 93,91%, określający stopień bieżącego wykorzystania energii w odniesieniu do całości zapotrzebowania energetycznego obiektu. Wysoki stopień niezależności i autokonsumpcji wynika również z założeń i uproszczeń opisanych w pkt. 5.1.2, gdzie przyjęto, że obiekt nie ma dostępu do sieci elektroenergetycznej i działa w trybie offgrid.

Zastosowanie hybrydowych magazynów energii umożliwia zwiększenie udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod zarządzania jej przepływem np. z wykorzystaniem algorytmów logiki rozmytej, umożliwiających zwiększenie autokonsumpcji oraz znaczącym ograniczeniu zapotrzebowania na energię z sieci zewnętrznej. Biorąc pod uwagę popularność instalacji fotowoltaicznych w Polsce w postaci mikroinstalacji wynoszących w 2024 aż 57,7% (11,95GW) całości mocy zainstalowanej (20,68GW) zastosowanie dodatkowego hybrydowego magazynu energii może znacząco zwiększyć opłacalność instalacji PV dla właścicieli, natomiast z perspektywy krajowego systemu energetycznego oznacza to redukcję zapotrzebowania na energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej[111].

8. Podsumowania i wnioski

8.1. Podsumowanie

W pracy przedstawiono innowacyjny układ do zarządzania przepływem energii elektrycznej w instalacjach obiektów mieszkalnych (domy jednorodzinne lub akademiki) oparty na algorytmach logiki rozmytej. Coraz większa dbałość społeczeństwa o środowisko, popularyzacja elektromobilności, pomp ciepła i klimatyzatorów oraz ogólna elektryfikacja urządzeń życia codziennego spowodowały duże zapotrzebowanie na energię elektryczną w korzystnych ekonomicznie cenach przy równoczesnej transformacji energetycznej czyli odejściu od konwencjonalnych elektrowni na korzyść instalacji opartych na odnawialnych źródłach energii. Dynamiczna popularyzacja odnawialnych źródeł energii szczególnie widoczna w Polsce coraz częściej napotyka na ograniczenia, które zostały opisane w rozdziale 2.2. Zauważono że rozwiązaniem większości problemów może być zwiększenie autokonsumpcji czyli stosowania wyprodukowanej z OZE energii na bieżące potrzeby w ramach jak najmniejszej instalacji najlepiej w ramach jednego obiektu. Jednym ze sposobów może być zastosowanie magazynów energii, których najpopularniejsze technologie obecnie stosowane przedstawiono w rozdziale 2.3. Podczas przeglądu różnych technologii magazynowania energii zauważono że każda z nich ma swoje ograniczenia. Korzystnym działaniem jest więc hybrydyzacja poszczególnych technologii w ramach jednego układu czego przykłady rozwiązań przedstawiono w rozdziale 2.3.2. Zwrócono uwagę na ograniczenia dotychczas stosowanych układów względem zapotrzebowania rynku na nowoczesne systemy zarządzania przepływem energii wykorzystujące zróżnicowane technologicznie magazyny energii oraz zróżnicowane technologicznie źródła OZE.

W celu pozyskania danych pomiarowych przeprowadzono bilans energetyczny 3 rzeczywistych obiektów mieszkalnych (2 domów jednorodzinnych oraz akademika), który został opisany w rozdziale 3. Na podstawie wyników bilansu energetycznego dokonano analizy obejmującej dobór parametrów dodatkowej instalacji PV (rozdział 3.2.2) z wyznaczeniem parametrów autokonsumpcji oraz niezależności energetyczne dla obiektu bez dodatkowych magazynów energii. W dalszej części dokonano analizy doboru parametrów dobowego magazynu energii opartego na najpopularniejszych

obecnie ogniwach litowych (rozdział 3.2.3). Analizę uzupełniono o dobór sezonowego magazynu energii umożliwiającego magazynowanie energii w skali roku w ramach hybrydowego magazynu wraz z dobowym zasobnikiem energii. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy porównawczej obiektu wyposażonego jedynie w instalację PV, w instalację PV oraz dobowy magazyn energii, instalację PV wraz z hybrydowym magazynem energii co zostało przedstawione w rozdziale 3.2.4.

W kolejnej części pracy przystąpiono do opracowania modelu rutera energii (rozdział 4), który opracowany został dwuetapowo. W pierwszym etapie dokonano implementacji poszczególnych elementów składowych rutera energii w postaci źródeł (PV oraz turbiny wiatrowe), magazyny energii (baterie litowe, superkondensatory), w środowisku MATLAB Simulink. Natomiast w kolejnym etapie przystąpiono do integracji wcześniej zaimplementowanych komponentów w ramach rutera energii z rzeczywistymi danymi zużycia energii. Jako element integrujący poszczególne elementy na wspólnej szynie DC dobrano dwukierunkowy przekształtnik BUCK/BOOST którego testy symulacyjne przedstawiono w rozdziale 4.2. Testy rozpoczęto od układu źródło-przekształtnik-bateria stopniowo rozbudowując do postaci układu zasilanego z paneli fotowoltaicznych integrujących w swojej budowie dwa zróżnicowane technologicznie magazyny energii oraz odbiorniki zasilane poprzez falownik. Dynamiczny rozwój branży związanej z odnawialnymi źródłami energii, magazynami energii oraz systemami do zarządzania przepływem energii (EMS) jak również kierunki rozwoju przedsiębiorcy biorącego udział w niniejszym doktoracie jako partner przemysłowy konieczna była zmiana koncepcji rutera energii z postaci sprzętowego urządzenia umożliwiającego integrację poszczególnych komponentów oraz zarządzania przepływem energii pomiędzy nimi do postaci algorytmu umożliwiającego integrację zróżnicowanych technologicznie źródeł OZE z zróżnicowanymi technologicznie magazynami energii w celu osiągnięcia wysokiego stopnia autokonsumpcji i niezależności energetycznej. Algorytm następnie będzie kluczową częścią większego projektu o nazwie PZE czyli platforma zarządzania energią, mająca postać serwerową.

Prace związane z prototypem rutera energii rozpoczęto od opracowania koncepcji obejmującej dobór ogólnej konfiguracji (rozdział 5.1.1) oraz analizę algorytmów sterowania przepływem energii (rozdział 5.1.2). Biorąc pod uwagę ilość dostępnych parametrów jak również możliwości stosowania w układach do zarządzania energią z OZE zdecydowano o wykorzystaniu algorytmów logiki rozmytej. W dalszej części przedstawiono proces opracowania regulatora opartego na algorytmach logiki rozmytej (rozdział 5.2). W ramach tego etapu zadeklarowane zostały funkcje przynależności dla poszczególnych parametrów wejściowych i parametrów wyjściowych. Następnie na podstawie doświadczeń w działaniu instalacji z odnawialnymi źródłami energii, magazynami energii oraz odbiornikami energii sformułowano 81 pojedynczych reguł stanowiących odpowiedź na wszystkie możliwe stany mogące powstać w układzie z 4 modułami wejściowymi (PV, baterijny magazyn energii, superkondensatory,

odbiorcy energii). Następnie regulator logiki rozmytej opracowany w środowisku MATLAB zintegrowano w ramach całego modelu symulacyjnego w środowisku Simulink.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki działania regulatora przepływu energii bezpośrednio po zakończeniu prac związanych z integracją wszystkich komponentów. Pierwsze wyniki jednoznacznie wskazują na nieprawidłowe działanie układu regulacji, objawiające się złym dopasowaniem parametrów wyjściowych do parametrów wejściowych. W celu poprawy działania regulatora dokonano przeglądu bazy reguł uzupełniając brakujące i weryfikując istniejące. W kolejnym etapie dokonano weryfikacji oraz korekt funkcji przynależności odnosząc zadeklarowane wartości do zakresów parametrów wejściowych i wyjściowych. Dodatkowo skorygowane funkcje wyrażono matematycznie za pomocą wzorów. Po powtórnej próbie uzyskano zadowalające wyniki uzyskując auto konsumpcję oraz niezależność energetyczną powyżej 90% w skali roku. W celu dalszej poprawy regulacji przystąpiono do analizy możliwości zastosowania innych metod defuzyfikacji poza zastosowaną metodą środka ciężkości (centroid). Symulacje obejmujące zakres 24h oraz 365dni powtórzono z różnymi metodami defuzyfikacji (centroid, bisector, SOM, MOM, LOM), następnie wyniki stopnia autokonsumpcji zestawione zostały w Tabeli 10. Po przeanalizowaniu działania układu uznano że poprawne działanie możliwe jest jedynie w przypadku metody bisector oraz centroid. Biorąc jednak pod uwagę całość otrzymanych wyników oraz poprawności odwzorowanie regulowanych parametrów za najlepszą metodę defuzyfikacji uznano bisector.

Całość pozyskanych informacji jak również uzyskanych wyników umożliwiło przeprowadzenie analizy możliwości zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii elektrycznej poprzez zastosowanie hybrydowych magazynów energii. Obecnie większość energii elektrycznej nadal pochodzi z konwencjonalnych elektrowni opalanych paliwami kopalnymi takimi jak węgiel, gaz lub ropa naftowa. Konwencjonalne elektrownie szczególnie opalane węglem są mało elastyczne pod względem zmian mocy wyjściowej, co niestety jest szczególnie wymagane w kontekście integracji z najpopularniejszymi OZE w postaci fotowoltaiki i turbin wiatrowych. Odnawialne źródła energii oparte na wykorzystaniu energii słonecznej lub wiatrowej są silnie uzależnione od warunków atmosferycznych co czyni je źródłami silnie niestabilnymi, a okresy intensywnej produkcji energii z tych źródeł często nie pokrywają się z okresami zużycia. W celu jak najlepszego wykorzystania energii z OZE zaproponowano algorytm umożliwiający maksymalne zwiększenie autokonsumpcji oraz uniezależnienie się w dużym stopniu od sieci w okresie całego roku. Maksymalne wykorzystanie energii elektrycznej z OZE na bieżące potrzeby umożliwiło zwiększenie opłacalności instalacji OZE oraz zmniejszenie kosztów pozyskiwania energii z zewnątrz. Popularne wdrożenie takich mechanizmów może przyczynić się do zmniejszenia zapotrzebowania energii z konwencjonalnych elektrowni na korzyść tej z OZE.

8.2. Wnioski

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost liczby instalacji fotowoltaicznych w Polsce. Choć często podkreśla się aspekt ekologiczny tego zjawiska, w praktyce kluczową rolę odgrywają przede wszystkim czynniki ekonomiczne. Wysokie ceny energii elektrycznej, wynikające m.in. z regulacji unijnych oraz obciążeń nakładanych na wytwarzanie energii ze źródeł konwencjonalnych, skłaniają zarówno gospodarstwa domowe, jak i przedsiębiorstwa do poszukiwania alternatywnych sposobów redukcji kosztów. Instalacje fotowoltaiczne, często uzupełniane magazynami energii, stanowią narzędzie ograniczania wydatków na energię oraz zwiększania niezależności energetycznej użytkowników. Należy jednocześnie zaznaczyć, że rozwój sektora PV generuje także wyzwania związane z recyklingiem i utylizacją zużytych modułów, które w przyszłości mogą mieć istotne znaczenie dla bilansu środowiskowego tej technologii.

Zastosowanie paneli PV w formie mikroinstalacji zamontowanej na budynkach mieszkalnych ze względu na nieprzewidywalny i okresowy charakter pracy bez dodatkowych elementów magazynujących energię lub zwiększających autokonsumpcję jest mało efektywne. Spowodowane jest to przesunięciem w czasie okresów produkcji energii z PV a zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Celowe więc staje się zastosowanie magazynów energii umożliwiającego zwiększenie autokonsumpcji w okresie produkcji energii z OZE oraz możliwość rozładowania w okresach zapotrzebowania na energię.

Istniejące regulacje dotyczące rozliczeń energii również promują zastosowanie magazynów energii ze względu na niekorzystny dla właścicieli mikroinstalacji fotowoltaicznych stosunek pomiędzy ceną skupu nadwyżek energii, a jej sprzedaży. Zastosowanie magazynów energii staje się więc coraz bardziej popularne, a co za tym idzie konieczne stało się opracowanie metod i algorytmów umożliwiających zarządzanie przepływem energii w taki sposób by umożliwić jak najkorzystniejsze wykorzystanie pozyskanej energii z OZE. W niniejszej pracy wykorzystano do tego celu algorytmy logiki rozmytej uzyskując obiecujące wyniki.

Dodatkowo zaproponowano zastosowanie zróżnicowanych technologii magazynowania energii ze względu na docelową funkcjonalność układu np. pełna niezależność energetyczna obiektu w skali roku lub zastosowanie krótkoterminowego zasobnika energii w celu zwiększenia żywotności średnioterminowego magazynu energii np. baterie litowe.

Zastosowanie algorytmów logiki rozmytej w ruterze energii przeznaczonym do zarządzania przepływem energii pomiędzy obiektową instalacją elektryczną, źródłem OZE w postaci fotowoltaiki oraz dwoma zróżnicowanymi technologicznie magazynami energii umożliwiło uzyskanie stopnia autokonsumpcji na poziomie 91,19% w skali roku oraz niezależności energetycznej na poziomie ok. 93% w skali roku. Skutkuje to zmniejszeniem zapotrzebowania na energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej o 93%.

Zwiększenie niezależności od zewnętrznej sieci elektroenergetycznej, w skali kraju może prowadzić do znacznego ograniczenia zapotrzebowania na energię elektryczną z sieci i realnego zwiększenia udziału OZE w sumarycznej produkcji energii.

8.3. Cele dalszych prac

Docelowo wyniki niniejszych badań w postaci regulatora przepływu energii wdrożone zostaną w ramach Platformy Zarządzania Energią (PZE). Platforma Zarządzania Energią ma postać serwerową gdzie wymiana informacji pomiędzy poszczególnymi elementami odbywa się drogą sieciową. Do podstawowych elementów zintegrowanych w ramach PZE są:

- Licznik główny energii elektrycznej znajdujący się bezpośrednio na przyłączy z zewnętrzną siecią elektroenergetyczną.
- Falowniki fotowoltaiki zintegrowane z systemem dzięki czemu możliwy jest bieżący odczyt parametrów instalacji PV.
- Przekształtniki częstotliwości turbin wiatrowych podobnie jak w przypadku falowników umożliwiają odczyt parametrów w czasie rzeczywistym.
- Sterowników magazynów energii przeznaczonych do sterowania i komunikacji w ramach zasobnika jak również z systemami zewnętrznymi.
- Elementy sterownicze mające na celu zwiększenie autokonsumpcji np. ogrzewanie termicznego magazynu energii.
- Podliczniki rozproszone po całej instalacji przeznaczone do określenia zapotrzebowania na energię elektryczną konkretnych odbiorów lub pomieszczeń.

Pozyskane dane w ramach systemu przekazane zostaną do komputera przemysłowego z zaimplementowanym algorytmem logiki rozmytej do zarządzania energią, następnie wyniki przekazywane zostają za pomocą protokołu komunikacyjnego np. MQTT do poszczególnych urządzeń w ramach systemu. Demonstrator Platformy Zarządzania Energią powstanie w siedzibie Instytutu Techniki Górniczej KOMAG.

Docelowo PZE będzie stanowić platformę nie tylko do zarządzania energią ale również do monitoringu, rejestracji i analizy danych stanowić tym samym zaawansowaną platformę IIoT. Warstwa sprzętowa, oprogramowanie, aparatura sieciowa oraz regulator przepływu energii stanowić będą produkt końcowy dopasowywany indywidualnie do konkretnych potrzeb.

Dalsze prace polegać będą na wykorzystaniu wiedzy pozyskanej w ramach doktoratu wdrożeniowego w przyszłych pracach aplikacyjnych oraz dopasowaniu parametrów do konkretnych zastosowań. Opracowany regulator będzie modyfikowany na potrzeby poszczególnych projektów poprzez modyfikację elementów wejściowych w postaci innych odnawialnych źródeł energii takich jak turbiny

wiatrowe, biogazowanie, biometanownie, elektrownie wodne. Planowana jest również rozbudowa funkcjonalności oparta na arbitrażu cenowym. Przykładowo możliwe jest utworzenie parametru wejściowego „CENA ENERGII” i określenie funkcji przynależności dla zakresów kiedy cena jest niska, średnia i wysoka. Następnie uwzględniając ten parametr w bazie reguł. Duża elastyczność algorytmu umożliwi zastosowanie w różnych obszarach gdzie wymagane jest zarządzanie przepływem energii.

9. Bibliografia

- [1] <https://worldostats.com/global-energy-production-by-source-2025/> (dostęp 01.2025)
- [2] Wegrzyn, A.; Spirydowicz, A.; Grebski, W. Dilemmas of the energy transformation in Poland 2021/2022. *Min. Mach.* 2022, 40, 32–42.
- [3] <https://www.are.waw.pl/> (dostęp 01.2025)
- [4] Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Agencja Rynku Energii S.A. (2024). Informacja statystyczna o energii elektrycznej: Biuletyn miesięczny. Warszawa: Agencja Rynku Energii S.A. Dostępne na stronie: gov.pl/web/klimat.
- [5] <https://wysokienapiecie.pl/100567-zmarnowalismy-lata-zamiast-zajac-sie-starymi-elektrowniami/> (dostęp 01.2025)
- [6] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478). Dostępna w Internetowym Systemie Aktów Prawnych: isap.sejm.gov.pl.
- [7] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2022). Ustawa z dnia 17 listopada 2022 roku o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw. *Dz. U.* 2022 poz. 2653.
- [8] Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej we Wrocławiu. (2006). Krajowy plan działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych. https://wfosigw.wroclaw.pl/files/download_pl/769_krajowy-plan-dzialania-w-zakresie-energii-ze-zrodel-odnawialnych.pdf
- [9] <https://cieplowniaprzyszlosci.pl/demonstrator-technologie/> (dostęp 01,2025)
- [10] https://www.doradcasamorządu.pl/6450-lokalne-bilansowanie-energii-drog%C4%85-do-samowystarczalno%C5%9Bci-energetycznej-jst-i-bezpiecze%C5%84stwa-dostaw-energii-dla-mieszka%C5%84c%C3%B3w-gmin.html?utm_source=chatgpt.com (dostęp 01.2025)
- [11] Rafał K., Grabowski P., Magazynowanie energii, *ACADEMIA - magazyn Polskiej Akademii Nauk*, Nr 1 (65) Energetyka, 2021
- [12] <https://www.aral.de/de/global/retail/presse/pressemeldungen/mobility-hub.html> (dostęp 08.2022)
- [13] G. Cui, L. Jia, Z. Su, SMES-Battery Hybrid Energy Storage System Integrated Railway Power Conditioner for Peak Load Shifting and Power Quality Improvement in High-Speed Electrical Railway, 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct 31-Nov 3, 2021

- [14] Komisja Europejska raport pt.: Energy Storage - Underpinning a decarbonised and secure EU energy system, 14.03.2023.
- [15] Rafał K., Grabowski P., Magazynowanie energii, ACADEMIA - magazyn Polskiej Akademii Nauk, Nr 1 (65) Energetyka, 2021
- [16] <https://www.aral.de/de/global/retail/presse/pressemeldungen/mobility-hub.html> (dostęp 08.2024)
- [17] G. Cui, L. Jia, Z. Su, SMES-Battery Hybrid Energy Storage System Integrated Railway Power Conditioner for Peak Load Shifting and Power Quality Improvement in High-Speed Electrical Railway, 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct 31-Nov 3, 2021
- [18] Jung, Daniel (June 2017). Another write-off at the Engeweiher pumped storage facility. Archived from the original on 20 April 2021
- [19] Institution of Civil Engineers. Institution of Civil Engineers (Great Britain). April 1990. p. 1
- [20] Ag, A. (n.d.). Pumped storage for the future. Pumped storage power plant - Hydro News 32. Retrieved October 12, 2021
- [21] Haoyu H., Quingang L., Zhixiu Z., Analysis and Predictions of Pumped Storage Hydroelectricity, 2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST), DOI: 10.1109/IAECST54258.2021.9695509
- [22] Dariusz Ciepiela: Niemcy budują elektrownie szczytowo-pompowe. U nas temat ucichł. wnp.pl, 2020-07-28
- [23] "China's State Grid powers up 3.6-GW pumped-storage hydro complex". Renewablesnow.com. Dostęp 07.2022
- [24] <https://web.archive.org/web/20120103080341/http://www.dom.com/about/stations/hydro/bath-county-pumped-storage-station.jsp> Dostęp 07.2022
- [25] <https://archive.ph/20121208175304/http://www.industcards.com/ps-china.htm> Dostęp 08.2022
- [26] <https://web.archive.org/web/20110707050319/http://www.psp.org.cn:8080/upload/news/n2008101309124620.pdf> Dostęp 08.2022
- [27] <https://www.nsenergybusiness.com/projects/meizhou-pumped-storage-power-station/> Dostęp 08.2022
- [28] <https://www.nsenergybusiness.com/projects/changlongshan-pumped-storage-power-station/> Dostęp 08.2022

- [29] <https://www.power-technology.com/marketdata/okutataragi-japan/> dostęp 07.2022
- [30] <https://eu.detroitnews.com/story/news/local/michigan/2022/04/19/ludington-plant-features-one-worlds-largest-batteries/7371646001/> Dostęp 07.2022
- [31] <https://www.power-technology.com/projects/tianhuangping/> Dostęp 07.2022
- [32] <https://www.power-technology.com/marketdata/tumut-3-australia/> Dostęp 08.2022
- [33] Tokarz J., Hryckiewicz L. Elektrownia Wodna Żarnowiec - historia i dzień dzisiejszy, Energetyka i Ekologia 2003
- [34] <https://wysokienapiecie.pl/72345-elektrownie-szczytowo-pompowe-coraz-pilniej-potrzebne/> Dostęp 08.2022
- [35] David J.C. MacKay: Zrównoważona energia – bez bicia piany (ang. • pol.). UIT Cambridge (2008), Fundacja EkoRozwoju (2011), 2011. s. 201. [dostęp 2022-03-10]. ISBN 978-83-923848-1-6.
- [36] <https://www.wnp.pl/energetyka/energa-zakonczyla-modernizacje-elektrowni-zydowo,209710.html> Dostęp 08.2022
- [37] Genta, G. Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems; Butterworth Heinemann Ltd.: London, UK, 1985.
- [38] Shelke, P.R.S.; Dighole, D.G. A Review paper on Dual Mass Flywheel system. Int. J. Sci. Eng. Technol. Res. 2016, 5, 326–331
- [39] Amiryar ME, Pullen KR. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. Applied Sciences. 2017; 7(3):286. <https://doi.org/10.3390/app7030286>
- [40] Babuska, V.; Beatty, S.; DeBlonk, B.; Fausz, J. A review of technology developments in flywheel attitude control and energy transmission systems. In Proceedings of the 2004 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 6–13 March 2004; Volume 4, pp. 2784–2800.
- [41] Bitterly, J.G. Flywheel technology past, present, and 21st century projections. In Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC-97), Honolulu, HI, USA, 27 July–1 August 1997; Volume 4, pp. 2312–2315.
- [42] Bednarek K., Kasprzyk L., ZASOBNIKI ENERGII W SYSTEMACH ELEKTRYCZNYCH. CZĘŚĆ I - CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU, POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS, No69, 2012

- [43] Vafakhah, B.; Masiala, M.; Salmon, J.; Knight, A. Emulation of flywheel energy storage systems with a PMDC machine. In Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Electric Machines, Vilamoura, Algarve, Portugal, 6–9 September 2008; pp. 1–6.
- [44] Jiancheng, Z.; Lipei, H.; Zhiye, C.; Su, W. Research on flywheel energy storage system for power quality. In Proceedings of the International Conference on Power Systems Technology, Kunming, China, 13–17 October 2002; Volume 1, pp. 496–499.
- [45] Hawkins, D. Flywheels Keep the Grid in Tune. IEEE Spectrum, 27 July 2011.
- [46] Al-Diab, A.; Sourkounis, C. Unbalanced Voltage Drops Compensations Using Flywheel Energy Storage System. In Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Power Quality Utilisation, Lisbon, Portugal, 17–19 October 2011; pp. 1–6.
- [47] DOE/EE. Flywheel Energy Storage. An Alternative to Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems; U.S Department of Energy (DOE), Energy Efficiency and Renewable Energy: Washington, DC, USA, 2003.
- [48] Faias, S.; Santos, P.; Sousa, J.; Castro, R. An Overview on Short and Long-Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications. Renew. Energy Power Qual. 2008, 1, 442–447
- [49] Liu, H.; Jiang, J. Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability. Energy Build. 2007, 39, 599–604.
- [50] Hebner, R.; Beno, J.; Walls, A. Flywheel batteries come around again. IEEE Spectr. 2002, 39, 46–51.
- [51] Bolund, B.; Bernhoff, H.; Leijon, M. Flywheel energy and power storage systems. Renew. Sustain. Energy Rev. 2007, 11, 235–258.
- [52] Kurpiel W., Miedziński B., Właściwości eksploatacyjne ogniw litowych, elektro.info 10/2018
- [53] <https://www.gramwzielone.pl/magazynowanie-energii/32936/polskie-firmy-postawia-w-niemczech-duzy-magazyn-energii> (dostęp 01.2025)
- [54] Deja P., Hylla P., Polnik B., Skóra M., Niedworok A., Nowe rozwiązanie akumulatorowego układu zasilającego dla samojezdnych wozów strzelniczych, materiały pokonferencyjne KOMTECH 2021, <https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.9>
- [55] Brudermüller Martin; Sobotka, Benedikt; Dominic, Waughray (September 2019). Insight Report — A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 : Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation. World Economic Forum & Global Battery Alliance. pp. 11, 29. Retrieved 2 June 2021.

- [56] Hylla P., Figiel A., Deja P., Skóra M., Hybrydowe obiektowe magazyny energii, Materiały konferencyjne KOMEKO 2021, DOI: 10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.5
- [57] Bei Li, Build 100% renewable Energy based power station and microgrid clusters through hydrogen-centric storage system, materiały konferencyjne 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC), 2020
- [58] <https://ecoprius.pl/pl/bezpieczne-magazyny-wodoru.html> dostęp 07.2022
- [59] Materiały i prospekty firmy HomePowerSolutions
- [60] Materiały i prospekty firmy GKN HYDROGEN https://www.gknhydrogen.com/wp-content/uploads/2024/12/GKN_P2P_10ft_ProductSheet-A4.pdf.pdf
- [61] J. Rabkowski, and T. Płatek, "Comparison of the power losses in 1700V Si IGBT and SiC MOSFET modules including reverse conduction," 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), Geneva, 2015, pp. 1-10.
- [62] <http://www.portalnaukowy.edu.pl/allegro/superkondensator.pdf> dostęp 07.2022
- [63] T.Zimmermann, P.Keil, M.Hofmann, M. F.Horsche, S.Pichlmaier, A.Jossen, Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems, Journal of Energy Storage, Volume 8, November 2016, Pages 78-90
- [64] J. P. Zheng, T. R. Jow and M. S. Ding, "Hybrid power sources for pulsed current applications," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 37, no. 1, pp. 288-292, Jan 2001, doi: 10.1109/7.913688.
- [65] Tie, S. F., & Tan, C. W. (2012). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 82–102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>
- [66] Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Hou, J., Han, X., & Ouyang, M. (2014). Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system. Applied Energy, 134, 321–331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.035>
- [67] A. Kuperman, I. Aharon, Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2) (2011) 981–992, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
- [68] A. Ostadi, M. Kazerani, S.-K. Chen, Hybrid Energy Storage System (HESS) in vehicular applications: a review on interfacing battery and ultra-capacitor units, in: 2013 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo., IEEE, 2013, 1–7, <http://dx.doi.org/>
- [69] 10.1109/ITEC.2013.6573471.

- [70] Materiały i prospekty firmy EATON
- [71] <https://kezo.pl/hystore> dostęp 08.2022
- [72] K. Rafał, K. Mik, H. Biedka, Magazyny energii jako sposób na odblokowanie mocy przyłączeniowych, *Magazyn Fotowoltaika* 2/2022
- [73] K.Rafał, W.Radziszewska, J.Hun, P.Grabowski, Flow battery operating in hybrid energy storage system, materiały pokonferencyjne, International Flow Battery Forum, 19.01.2021
- [74] S. Suzuki, J. Baba, K. Shutoh, and E. Masada, "Effective application of superconducting magnetic energy storage (SMES) to load leveling for high speed transportation system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 713–716, Jun. 2004.
- [75] G. Cui, L. Jia, Z. Su, SMES-Battery Hybrid Energy Storage System Integrated Railway Power Conditioner for Peak Load Shifting and Power Quality Improvement in High-Speed Electrical Railway, 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct 31-Nov 3, 2021
- [76] W.Kobos, R.Sobieski, INTELIGENTNY HYBRYDOWY MAGAZYN ENERGII Z PRZEKSZTAŁTNIKAMI ENERGOELEKTRONICZNYMI WYKORZYSTUJĄCYMI WYSOKONAPIĘCIOWE, NISKOINDUKCYJNE MODUŁY MOCY SIC MOSFET, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 2/2021 (126)
- [77] karta katalogowa MSM800FS33AL.
- [78] Markel Dokumentacja MPME-920-3000.
- [79] Khan F., Tang Y., Gong Sicheng G.: "A Bidirectional Resonant DC-DC Converter for Electrical Vehicle Charging/Discharging Systems". *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 177 – No.5, November 2017 20.
- [80] Benysek G., Kazimierkowski M. P., Popczyk J., Strzelecki R.: "Power Electronic System as Crucial Part of a Smart Grid Infrastructure- A Survey". *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences*, Vol. 59, No. 4, 2011 DOI: 10.2478/v10175-011-0058-2
- [81] Kaniewski J.: "Hybrydowe układy transformowania napięć przemiennych w systemach elektroenergetycznych". Konferencja PTETiS, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 20.0
- [82] Glinka, T., Gawron, S., & Bernatt, J. (2019). Stacja szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych (Patent nr PL 232259 B1). Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.

- [83] W. Deng, W. Pei, L. Ding, Y. Yi, X. Zhang, Y. Zhuang, Efficient Integration and Comprehensive Utilization of Renewable Energy / Hydrogen Energy Based on DC Energy Routing, 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), DOI: 10.1109/iSPEC50848.2020.9351073
- [84] Van Dyk, Eugene & Scott, B.J. & Meyer, Edson & Leitch, A.. (2000). Temperature dependence of performance of crystalline silicon photovoltaic modules. South African Journal of Science. 96. 198-200.
- [85] Appelbaum, J., & Maor, T. (2020). Dependence of PV module temperature on incident Time-Dependent solar spectrum. Applied Sciences, 10(3), 914. <https://doi.org/10.3390/app10030914>
- [86] Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., & Kirpichnikova, I. (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>
- [87] <https://respondent-project.eu/> (dostęp 10.2024)
- [88] Temich, S., Pollak, A., Kucharczyk, J., Ptasinski, W., Mężyk, A., & Gąsiorek, D. (2021). Prediction of energy consumption in the industry 4.0 platform- solutions overview. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 455–468. doi:10.15632/jtam-pl/140203
- [89] Strzelecki R., Supronowicz H.: Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy, OWPW, Warszawa 2000, ISBN 83-7207-106-3.
- [90] Żelazna, A., & Szcześniak, E. (2017). Determinants of the society for the use of renewable energy sources in the light of empirical research. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego We Wrocławiu, (478), 472–480. doi:10.15611/pn.2017.478.44
- [91] Hylla, P., Mężyk, A., Trawiński, T., Polnik, B., Parameter estimation of PV system towards self-consumption of electric energy for dormitory. 11. Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 18-20 May 2023, Riga – Latvia
- [92] Venkatesan, K.; Govindarajan, U. Optimal power flow control of hybrid renewable energy system with energy storage: A Woann strategy. J. Renew. Sustain. Energy 2018, 11, 015501.
- [93] Kucuker, A.; Kamal, T.; Zulqadar, H.S.; Li, G.; Mufti, G.M.; Wassen, M.H. Design and Control of Photovoltaic/Wind/Battery based microgrid system. In Proceedings of the 2017 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Lahore, Pakistan, 2–4 March 2017; pp. 1–6.
- [94] Karta katalogowa ogniwa CHSM60M-HC BF 340Wp dostępna na stronie: <https://www.rexel.de/Kategorien/Photovoltaik/Photovoltaik-Modul/CHSM60M-HC-BF-340-Wp%2C-Monocrystalline-PV-Module-CHSM60M-HC-BF-340wp/p/9011639>

- [95] Wang, T., i in. Solar cell efficiency, diode factor and interface recombination: insights from photoluminescence. arXiv, 2022. DOI.org (Datacite), <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2204.06483>
- [96] Rahmoun, A.; Biechl, H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012, 88, 152–156.
- [97] <https://www.are.waw.pl/>(dostęp 12.2024)
- [98] <https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/sps/powersys/ref/windturbine.html> (dostęp 12.2024)
- [99] Talarek, K., Knitter-Piątkowska, A. and Garbowski, T. (2022) ‘Wind Parks in Poland—new challenges and perspectives’, *Energies*, 15(19), p. 7004. doi:10.3390/en15197004.
- [100] Heier, S. (1998). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Chichester: John Wiley & Sons.
- [101] Kasprzyk L. Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 19(2017), 229-236
- [102] Stefano Barsali, Massimo Ceraolo, Dynamical of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17 (2002), 16-23
- [103] KASPRZYK, L. (2018) ‘Modelowanie Pracy I Trwałości Akumulatorów Litowo-jonowych W Pojazdach Elektrycznych’, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, 1(12), pp. 160–163. doi:10.15199/48.2018.12.34.
- [104] <https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/sps/powersys/ref/battery.html> (dostęp 12.2024)
- [105] <https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/sps/powersys/ref/supercapacitor.html>(dostęp 12.2024)
- [106] V. Siddhartha and Y. V. Hote, "Non-inverting buck-boost derived hybrid converter," 2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES), Sultanpur, India, 2016, pp. 234-240, doi: 10.1109/ICETEESES.2016.7581366.
- [107] Abdel-Rahim, O. et al. (2022) ‘An efficient non-inverting Buck-boost converter with improved step up/down ability’, *Energies*, 15(13), p. 4550. doi:10.3390/en15134550
- [108] A. Chandwani, A. Mallik, A. Akturk, N. Goldsman and U. Khalid, "Design of a SiC-based Non-Inverting Buck-Boost (NIBB) Converter for High-Temperature Environments," 2020 IEEE

International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379426.

- [109] Hylla, Piotr, i in. „Overview of Hybrid Energy Storage Systems Combined with RES in Poland”. *Energies*, t. 16, nr 15, sierpień 2023, s. 5792. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/en16155792>.
- [110] Karta katalogowa układu scalonego OPA549 dostępna na stronie <https://www.ti.com>
- [111] <https://www.chip.pl/2025/04/kosmiczna-eksplozja-laboratorium-chiny> (dostęp 05.2025).