

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Rafał Jacukowicz

**Opracowanie algorytmów optymalizujących
wykorzystanie bateryjnych lub
superkondensatorowych zasobników energii wraz z
energoelektronicznymi układami konwersji mocy w
systemie elektromobilnego transportu celem poprawy
parametrów zasilania**

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK

Praca zrealizowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy, umowa DWD/4/25/2020

Kraków 2025

Mojej Żonie i Córce

Spis treści

1. WPROWADZENIE.....	6
1.1. CEL I ZAKRES PRACY	7
1.2. HIPOTEZY BADAWCZE.....	8
1.3. METODYKA BADAŃ	9
1.4. STRUKTURA PRACY	10
2. PRZEGLĄD LITERATURY	11
3. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z MAGAZYNOWANIEM ENERGII W SYSTEMACH TRAKCYJNYCH DC	16
3.1. BATERIE LITOWO-JONOWE.....	16
3.2. SUPERKONDENSATORY.....	18
3.3. KRYTERIA WYBORU	20
4. UKŁADY ENERGOELEKTRONICZNE W SYSTEMACH TRAKCYJNYCH DC	24
4.1. KONWERTERY DC/DC	24
4.1.1. <i>Struktura i tryby pracy</i>	24
4.1.2. <i>Obliczanie współczynników wypełnienia</i>	26
4.1.3. <i>Struktura sterowania</i>	35
4.1.4. <i>Wyniki symulacyjne i eksperymentalne</i>	37
4.1.5. <i>Podsumowanie</i>	50
5. MODELOWANIE SYSTEMU TRAKCJI DC Z MAGAZYNAMI ENERGII	51
5.1. MODEL RUCHU POJAZDÓW	52
5.1.1. <i>Założenia modelu</i>	52
5.1.2. <i>Dane wejściowe i wyjściowe modelu</i>	52
5.1.3. <i>Funkcja przygotowania danych dla solvera</i>	53
5.1.4. <i>Implementacja i walidacja modelu</i>	54
5.2. MODEL WĘZŁOWY SYSTEMU TRAKCYJNEGO	59
5.2.1. <i>Założenia modelu</i>	59
5.2.2. <i>Dane wejściowe i wyjściowe modelu</i>	59
5.2.3. <i>Elementy modelu węzłowego systemu trakcyjnego</i>	61
5.2.4. <i>Metoda rozwiązywania modelu</i>	63
5.2.5. <i>Implementacja i walidacja modelu</i>	65
6. ALGORYTMY OPTIMALIZACJI DLA SYSTEMÓW TRAKCYJNYCH DC	75
6.1. OPTIMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA	76
6.2. UZASADNIENIE WYBORU METODY	78
6.3. SYMULACJE I WYNIKI	79
6.3.1. <i>Wyniki działania algorytmu przeszukania</i>	84
7. ANALIZA KOMERCYJNEJ REALIZACJI SYSTEMU.....	98
8. WNIOSKI.....	105
8.1. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	106
9. BIBLIOGRAFIA	108

Lista skrótów:

AC	– Alternating Current (prąd przemienny)
AFE	– Active Front-End (prostownik aktywny)
BCM	– Boundary Conduction Mode (praca graniczna)
BMS	– Battery Management System
CCM	– Continuous Conduction Mode (ciągły tryb przewodzenia)
CHB	– Cascaded H-Bridge (kaskadowy most H)
DC	– Direct Current (prąd stały)
DC-DC	– konwerter prądu stałego na prąd stały
DCM	– Discontinuous Conduction Mode (nieciągły tryb przewodzenia)
EDLC	– Electric Double Layer Capacitor (superkondensator warstwy podwójnej)
EES	– Electrical Energy Storage (magazyn energii elektrycznej)
EMU	– Electric Multiple Unit (elektryczny zespół trakcyjny)
ESR	– Equivalent Series Resistance (rezystancja szeregową zastępczą)
ESS	– Energy Storage System (system magazynowania energii)
FESS	– Flywheel Energy Storage System (magazyn energii kinetycznej)
FSBB	– Four-Switch Buck-Boost (czteroprzełącznikowy konwerter buck-boost)
GA	– Genetic Algorithm (algorytm genetyczny)
HESS	– Hybrid Energy Storage System (hybrydowy magazyn energii)
ICE	– Intercity Express (pociąg dużych prędkości)
IEC	– International Electrotechnical Commission
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	– Insulated Gate Bipolar Transistor
LFP / LPF	– Lithium Iron Phosphate (litowo-żelazowo-fosforanowy akumulator)

- LHS** – Latin Hypercube Sampling
- LTO** – Lithium Titanate (litowo-tytanianowy akumulator)
- MATLAB** – Matrix Laboratory (środowisko obliczeniowe)
- MILP** – Mixed Integer Linear Programming (programowanie liniowe mieszane całkowitoliczbowe)
- MMC** – Modular Multilevel Converter (modułowy konwerter wielopoziomowy)
- NARX** – Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs (rekurencyjna sieć neuronowa)
- NLP** – Nonlinear Programming (programowanie nieliniowe)
- NMC** – Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (litowo-niklowo-manganowo-kobaltowy akumulator)
- NSGA-II** – Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
- PSO** – Particle Swarm Optimization (optymalizacja rojem cząsteczek)
- PWM** – Pulse-Width Modulation (modulacja szerokości impulsu)

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii w transporcie publicznym [1], [2]. Rosnąca populacja dużych aglomeracji miejskich generuje zapotrzebowanie na szybsze i bardziej wydajne systemy transportowe o większej przepustowości. Przemysł kolejowy reaguje na te wyzwania poprzez wprowadzanie nowoczesnych, wysoce wydajnych i mocniejszych pojazdów trakcyjnych. Wprowadzenie nowego taboru ma jednak bezpośredni wpływ na systemy zasilania trakcji. W wielu przypadkach istniejąca infrastruktura nie jest w stanie zapewnić zwiększonej mocy bez rozbudowy lub budowy nowych podstacji zasilających. Z tego powodu coraz częściej obserwuje się niedopuszczalne spadki napięcia, przeciążenia podstacji, a w konsekwencji nieoczekiwane wyłączenia oraz przestoje w przewozach pasażerskich i towarowych.

Specyfika pracy układów trakcyjnych polega na dużej zmienności chwilowych obciążeń, wynikających z dynamiki ruchu pojazdów. Powoduje to nie tylko lokalne problemy z utrzymaniem parametrów napięciowych w sieci trakcyjnej DC, ale również wpływa na system dystrybucji energii po stronie zasilania AC – m.in. poprzez chwilowe pobory mocy przewyższające wartość mocy zamówionej. Tradycyjne rozwiązania, polegające na rozbudowie podstacji czy dobudowie dodatkowych przewodów zasilających, wiążą się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi i często są trudne do realizacji w gęstej zabudowie miejskiej.

W tym kontekście coraz większe znaczenie zyskują przytorowe zasobniki energii (ang. wayside energy storage systems – ESS). Dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii akumulatorów litowo-jonowych oraz superkondensatorów możliwe stało się ich praktyczne zastosowanie w systemach trakcyjnych. Zasobniki takie pozwalają na kompensację spadków napięcia, ograniczenie wykorzystania hamowania mechanicznego (co redukuje zapylenie np. w tunelach metra), wtórne wykorzystanie energii odzyskiwanej podczas hamowania pojazdów oraz zapewnienie awaryjnego podtrzymania zasilania w sytuacjach krytycznych. Dodatkową zaletą przytorowych ESS jest możliwość lokalizacji zarówno w podstacjach trakcyjnych, jak i wzdłuż linii w formie instalacji kontenerowych, co zapewnia elastyczność wdrożenia bez konieczności ingerencji w sieć średniego napięcia.

1.1. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej rozprawy jest optymalizacja wykorzystania bateryjnych i/lub superkondensatorowych przytorowych zasobników energii wraz z energoelektronicznymi układami konwersji mocy w systemach trakcyjnych prądu stałego, w taki sposób, aby poprawić parametry zasilania przy jednoczesnym uwzględnieniu czynników technicznych.

Zakres badań obejmuje w szczególności:

- analizę topologii obwodu trakcyjnego i parametrów elektrycznych linii (rezystancja, dopuszczalne napięcia pracy, straty w przewodach, spadki napięć na odbieraku pojazdu),
- analizę parametrów pojazdów trakcyjnych, ich rozkładów jazdy, nastaw zadziałania rezystorów hamujących i momentu aktywacji hamulców,
- optymalizację liczby i umiejscowienia zasobników energii w systemie oraz ich charakterystyk i progów zadziałania,
- integrację powyższych czynników w postaci wieloparametrycznej funkcji kosztu, której celem jest znalezienie kompromisowego optimum.

Cele badawcze obejmują:

- analizę systemów trakcyjnych prądu stałego z uwzględnieniem procesów hamowania rekuperacyjnego i ograniczonej receptywności sieci,
- budowę modeli obwodowych oraz algorytmów optymalizacji rozmieszczenia i parametrów przytorowych zasobników energii,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych pozwalających na ocenę wpływu magazynów energii na parametry pracy systemu.

Cele wdrożeniowe obejmują:

- analizę i ocenę rzeczywistej realizacji komercyjnego systemu przytorowego zasobnika energii,
- implementację i testy algorytmów w kontekście wdrożeniowym,
- weryfikację wyników badań symulacyjnych poprzez porównanie z obserwacjami eksploatacyjnymi.

1.2. Hipotezy badawcze

W pracy postawiono następujące hipotezy badawcze:

1. Zastosowanie optymalizacji parametrycznej modeli systemu trakcyjnego z przytorowymi zasobnikami energii pozwala na praktyczne wykorzystanie wyników analiz w procesie projektowania tego typu systemów.
2. Odpowiednie rozmieszczenie oraz właściwy dobór progów zadziałania przytorowych zasobników energii poprawia parametry zasilania linii trakcyjnej poprzez ograniczenie strat, przeciążeń podstacji i stabilizację napięcia.

1.3. Metodyka badań

W pracy zastosowano modelowanie matematyczne i symulacyjne systemu trakcyjnego w środowisku MATLAB z uwzględnieniem podstacji, pojazdów, pojazdowych przekształtników układu hamowania z rezystorem oraz przytorowych magazynów energii. Model oparto na obwodach równoważnych, w których:

- podstacje reprezentowane są jako źródła napięciowe,
- pojazdy modelowane są jako źródła prądowe zależne od przebiegów ruchu,
- przekształtnik hamowania i ESS odwzorowane są jako elementy energoelektroniczne aktywujące się w zależności od parametrów pracy systemu.

Dla tak przygotowanego modelu opracowano solver numeryczny, umożliwiający obliczenia rozptywu napięć i prądów w stanie ustalonym. Został on powiązany z modułem generującym dane wejściowe, który opisuje ruch pojazdów na linii (profile prędkości, czasy postojów, parametry przyspieszeń, wzniesienia).

Kluczowym elementem pracy była implementacja procedury optymalizacji parametrycznej. W ramach tego działania przeprowadzono przeszukiwanie przestrzeni parametrów systemu (metoda MILP z dyskretyzacją zmiennych oraz Monte Carlo), w tym nastaw przekształtników hamowania oraz charakterystyk i progów zadziałania ESS. W każdej iteracji obliczane były wartości funkcji celu:

- minimalizacja strat energii w liniach,
- minimalizacja spadków napięcia w punktach przyłączenia pojazdów,
- określenie wymaganej, użytecznej pojemności zasobników energii.

Dodatkowo optymalizacja objęła również liczbę i lokalizację zasobników na linii, co pozwoliło ocenić wpływ rozmieszczenia ESS na równomierność rozptywu mocy oraz obciążenie podstacji.

Istotnym elementem badań były także pomiary wykonane na istniejącym obiekcie trakcyjnym, wyposażonym w superkondensatorowy ESS. Dane te posłużyły do walidacji modelu i potwierdzenia zgodności trendów symulacyjnych z rzeczywistymi przebiegami.

Metodyka obejmuje następujące etapy:

1. Wyznaczenie trajektorii ruchu pojazdów.
2. Obliczenie zapotrzebowania na moc.
3. Mapowanie źródeł i odbiorników w modelu obwodowym.
4. Rozwiązanie rozptywu mocy z uwzględnieniem ESS.
5. Analiza wyników i optymalizacja parametrów magazynów energii.

1.4. Struktura pracy

Praca została podzielona na osiem rozdziałów.

Rozdział 1 opisuje założenia badawcze oraz metodykę analiz. W rozdziale 2 przedstawiono przegląd literatury dotyczący systemów trakcyjnych, metod modelowania oraz technologii zasobników energii. W rozdziale 3 poruszono tematykę elektrycznych i elektrochemicznych magazynów energii. Rozdział 4 omawia modele konwerterów energoelektronicznych oraz szczegółowe rozwiązanie układów ESS. Rozdział 5 prezentuje implementację solvera rozptywów mocy. W rozdziale 6 zaprezentowano wyniki symulacji oraz bilanse energetyczne. Rozdział 7 przedstawia przykłady zastosowań i analizy wdrożeń. Rozdział 8 zawiera wnioski końcowe oraz perspektywy dalszych badań.

2. Przegląd literatury

W literaturze przedmiotu szeroko opisano zagadnienia związane z zasilaniem i eksploatacją systemów trakcyjnych DC. Klasyczne podręczniki dostarczają podstaw teoretycznych dotyczących modeli ruchu pojazdów, parametrów obwodów trakcyjnych oraz wymagań napięciowo-prądowych [3], [4]. Na ich bazie rozwinięto liczne metody modelowania matematycznego i numerycznego, w tym klasyczne techniki obliczeń rozptywów mocy, takie jak Gauss–Seidel, Newton–Raphson czy metody wstrzyknięcia prądów [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Publikacje [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19] wskazują na złożoność interakcji między wieloma pojazdami, szczególnie przy uwzględnieniu procesów hamowania regeneracyjnego i ograniczonej receptywności sieci.

Równoległe dynamicznie rozwija się obszar magazynowania energii. Artykuły [20] oraz przeglądy [21] opisują szczegółowo technologie baterii litowo-jonowych (Li-Ion), superkondensatorów [22] oraz rozwiązań hybrydowych [23]. Podkreślają one potencjał ESS w zakresie ograniczania spadków napięcia, poprawy efektywności energetycznej oraz zwiększania stabilności pracy sieci trakcyjnej. Wskazują jednak także ograniczenia – degradację ogniw, koszty oraz konieczność doboru odpowiednich progów aktywacji.

W zakresie układów energoelektronicznych w [24], [25], [25], [26], [27] opisano rozwój prostowników (od diodowych, przez tyrystorowe, po aktywne z pełną kontrolą przepływu mocy) oraz konwerterów DC/DC (buck–boost, czteroprzetacznikowe, MMC). Te rozwiązania umożliwiają integrację ESS z siecią, a ich dobór znacząco wpływa na efektywność i niezawodność całego systemu.

Znaczna część badań koncentruje się także na algorytmach optymalizacji. Z jednej strony stosuje się podejścia deterministyczne tj. NLP, MILP [28], z drugiej – metaheurystyki (GA, PSO, NSGA-II) [29], [30] oraz metody probabilistyczne i meta-modelowe (Monte Carlo, RSM, Bayesian optimization) [31], [32]. W wymienionej literaturze podkreśla się ich potencjał, ale także złożoność i koszty obliczeniowe, co ogranicza zastosowania w projektach inżynierskich.

Luka badawcza pojawia się w obszarze kompleksowych opracowań łączących:

- modelowanie obwodowe sieci trakcyjnych,
- modele ruchu pojazdów,
- odwzorowanie ESS poprzez układy energoelektroniczne,

z praktycznymi algorytmami optymalizacji, dostosowanymi do wymogów wdrożeniowych dla przytorowych zasobników energii.

W praktyce inżynierskiej stosuje się szereg programów branżowych umożliwiających symulację ruchu pociągów oraz analizę rozptywów mocy w sieci trakcyjnej. Można wymienić m.in.:

- **OpenTrack** [33] (ETH Zürich, OpenTrack Railway Technology), który pozwala na modelowanie ruchu kolejowego, analizę przepustowości i zużycia energii.

- **Sitras Sidy** [34] (Siemens) stanowi kompleksowe środowisko do projektowania sieci trakcyjnych AC i DC, uwzględniając modelowanie podstacji, linii, pojazdów oraz optymalizację konfiguracji z ESS.
- **RailSys** [35] (RMCon) służący przede wszystkim do optymalizacji rozkładów jazdy i przepustowości, oferując jednocześnie funkcje oceny zużycia energii.

Jednak dotychczasowe prace skupiają się przede wszystkim na jednym z aspektów osobno a oprogramowanie posiadające bardzo rozbudowane funkcjonalności infrastrukturalne, nie zapewnia elastycznego i prostego wsparcia optymalizacyjnego poruszane w niniejszym opracowaniu.

W literaturze szeroko analizowane są zagadnienia magazynowania energii w systemach zasilania, w tym w transporcie szynowym. Klasyczne prace przeglądowe podkreślają, że wybór technologii zależy od kompromisu pomiędzy gęstością energii, gęstością mocy, trwałością cykliczną oraz kosztem [36], [37], [38], [39]. Wskazuje się, że baterie litowo-jonowe dzięki wysokiej gęstości energii dominują w zastosowaniach stacjonarnych i mobilnych, lecz ich ograniczeniem pozostaje degradacja ogniw i ograniczona żywotność [40].

Z kolei super-kondensatory odznaczają się wyjątkowo wysoką gęstością mocy i możliwością pracy w setkach tysięcy cykli [41]. Są one szczególnie przydatne tam, gdzie wymagane są krótkotrwałe, dynamiczne przepływy energii – np. w trakcie hamowania rekuperacyjnego czy kompensacji spadków napięcia w sieciach trakcyjnych. Liczne wdrożenia opisane w literaturze [42], [43] potwierdzają skuteczność tej technologii w stabilizacji napięcia i zwiększaniu receptywności systemów DC.

Coraz częściej proponuje się także rozwiązania hybrydowe (HES), łączące baterie i super-kondensatory. Pozwalają one na równoczesne wykorzystanie zalet obu technologii – baterie zapewniają energię długookresową, a super-kondensatory przejmują obciążenia chwilowe i dynamiczne [44], [45]. Badania wskazują, że takie podejście umożliwia zmniejszenie wymaganej pojemności baterii, wydłużenie jej żywotności oraz poprawę sprawności całego systemu.

Oprócz tradycyjnych rozwiązań chemicznych i elektrochemicznych analizowane są także alternatywne technologie, takie jak magazyny mechaniczne (flywheel energy storage systems, FESS). Choć nie znalazły one jeszcze szerokiego zastosowania w transporcie kolejowym, to przeglądy [46], [47] wskazują na ich potencjał w aplikacjach wymagających wysokiej mocy szczytowej i dużej liczby cykli pracy.

W ostatnich latach obserwuje się również intensywny rozwój badań nad systemami sterowania i optymalizacji pracy ESS [48]. Strategie zarządzania przepływami energii w hybrydowych magazynach są szczególnie istotne w środowiskach dynamicznych, takich jak sieci trakcyjne, gdzie wymagane jest szybkie reagowanie na zmiany obciążenia oraz koordynacja z procesami hamowania rekuperacyjnego.

Podsumowując, literatura wskazuje, że w sieciach trakcyjnych najbardziej obiecującymi technologiami są:

- Super-kondensatory (stabilizacja napięcia, absorpcja energii hamowania),

- baterie litowo-jonowe (pokrycie zapotrzebowania długookresowego),
- rozwiązania hybrydowe (optymalizacja kosztów i żywotności).

Niniejsza rozprawa wpisuje się w ten nurt badań, rozwijając modele obwodowe i ruchowe o integrację stacjonarnych ESS, a także proponując podejście optymalizacyjne doboru ich parametrów i rozmieszczenia.

Rozwój układów energoelektronicznych miał kluczowe znaczenie dla ewolucji systemów trakcyjnych. Klasyczne rozwiązania oparte na prostownikach diodowych i tyrystorowych zapewniały prostą i niezawodną konwersję energii, lecz ograniczały możliwości sterowania przepływem mocy oraz wpływały na jakość energii w sieci [27]. Wraz z postępującą technologią półprzewodników dużej mocy zaczęto wprowadzać prostowniki sterowane i aktywne, umożliwiające regulację napięcia wyjściowego, redukcję zawartości harmonicznych oraz poprawę współczynnika mocy [24], [25], [26].

W literaturze uwagę poświęca się także konwerterom DC/DC jako podstawowemu elementowi integracji przytorowych i pokładowych magazynów energii. Opracowania przeglądowe i porównawcze [49], [50] wskazują na bogactwo topologii – od klasycznych obniżających i podwyższających napięcie po rozwiązania izolowane, dwukierunkowe i wielopoziomowe. Szczególnie istotne dla zastosowań trakcyjnych są konwertery dwukierunkowe, które umożliwiają zarówno ładowanie magazynu energii w czasie hamowania, jak i jego rozładowanie podczas przeciążenia sieci.

Znaczną część badań poświęcono również topologiom wielopoziomowym (MMC, CHB), które charakteryzują się wysoką sprawnością i skalowalnością w zakresie mocy, co czyni je atrakcyjnymi dla systemów średniego napięcia, w tym trakcji miejskiej. Badania eksperymentalne i wdrożeniowe [17], [51] pokazują, że tego typu rozwiązania z powodzeniem znajdują zastosowanie w nowoczesnych instalacjach kolejowych, gdzie oprócz wysokiej sprawności oczekuje się również możliwości aktywnej regulacji napięcia sieci.

W pracach [27], [52], [53] podkreśla się również rolę filtrów oraz metod kompensacji mocy biernej w zapewnieniu odpowiedniej jakości energii w układach zasilających. To szczególnie istotne w sieciach trakcyjnych DC, gdzie krótkotrwałe przeciążenia i zakłócenia mogą prowadzić do nadmiernych spadków napięcia i pogorszenia stabilności pracy całego systemu, również po stronie dystrybucji prądu przemiennego.

Analiza literatury wskazuje jednoznacznie, że nowoczesne układy energoelektroniczne są niezbędnym elementem integracji ESS w sieciach trakcyjnych. Ich rozwój umożliwia nie tylko poprawę jakości energii i ograniczenie strat, ale także realizację zaawansowanych strategii sterowania przepływem mocy. Jednak nadal brakuje kompleksowych opracowań łączących modele obwodowe, charakterystyki ESS oraz specyfikę konwerterów w jednym spójnym narzędziu (procesie) inżynierskim.

W literaturze poświęconej optymalizacji systemów zasilania trakcyjnego oraz integracji ESS przedstawiono szerokie spektrum metod. Tradycyjnie stosowane są metody deterministyczne, w tym programowanie liniowe i nieliniowe [28]. Pozwalają one na dokładne rozwiązanie problemów w warunkach dobrze zdefiniowanych ograniczeń i funkcji celu, jednak ich zastosowanie w praktyce jest ograniczane przez dużą złożoność

obliczeniową i problemy ze zbieżnością w przypadku modeli nieliniowych oraz nieliniowych charakterystyk ESS.

Alternatywą są metaheurystyki – algorytmy genetyczne [30], optymalizacja rojem cząsteczek [29] czy symulowane wyżarzanie [54]. Ich zaletą jest zdolność do eksploracji dużych i skomplikowanych przestrzeni poszukiwań, co czyni je przydatnymi w problemach wielokryterialnych, jak np. jednoczesna optymalizacja kosztów, sprawności energetycznej i stabilności napięciowej w sieci trakcyjnej. W szczególności NSGA-II [30] znalazł szerokie zastosowanie w inżynierii dzięki dobrej równowadze pomiędzy szybkością działania a jakością wyników.

W literaturze pojawia się również wiele zastosowań metod próbkowania i metamodelowania. Metoda Monte Carlo [31] oraz Latin Hypercube Sampling umożliwiają ocenę wpływu niepewności na parametry systemu. Z kolei metody RSM [55] czy modelowanie za pomocą procesów Gaussa [56] pozwalają na budowę metamodeli, które znacząco redukują koszt obliczeniowy w badaniach eksperymentalnych i optymalizacyjnych.

Najnowsze publikacje wskazują także na rosnącą rolę uczenia maszynowego w procesach optymalizacji. Optymalizacja bayesowska [32] umożliwia adaptacyjne poszukiwanie minimum w przestrzeniach o wysokiej wymiarowości, co znajduje zastosowanie w doborze parametrów sterowania ESS i rozmieszczenia zasobników w sieci trakcyjnej.

Podsumowując, literatura oferuje szeroki wachlarz metod, jednak w praktycznych zastosowaniach inżynierskich szczególnie istotny jest kompromis między dokładnością a prostotą implementacji. Z tego względu w niniejszej pracy wybrano podejście oparte na systematycznym próbkowaniu i przeszukiwaniu przestrzeni parametrów, które – mimo ograniczeń – gwarantuje przejrzystość, powtarzalność i użyteczność narzędzia w realnych wdrożeniach przemysłowych.

Obok prac koncentrujących się na aspektach teoretycznych i technologicznych, w literaturze dostępne są liczne opracowania opisujące praktyczne wdrożenia ESS w systemach trakcyjnych. Wiele z nich dotyczy implementacji superkondensatorów jako magazynów energii przytorowych. Klasyczne prace [13], [51], [57], [58] pokazują, że zastosowanie ESS pozwala ograniczyć wahania napięcia w sieci DC, zwiększyć efektywność odzysku energii hamowania oraz poprawić stabilność systemu zasilania. Wyniki testów eksperymentalnych [22], [59] potwierdzają możliwość znacznych oszczędności energii oraz poprawy komfortu pracy sieci trakcyjnej dzięki ESS.

W kolejnych latach prowadzone były również badania nad strategiami sterowania magazynami energii, obejmujące zarówno algorytmy deterministyczne, jak i zaawansowane metody optymalizacji. Prace [38], [54], [55] prezentują modele sterowania ESS w sieciach miejskich i metropolitalnych, kładąc nacisk na efektywne zarządzanie przepływem energii oraz minimalizację strat. Wyniki badań wskazują, że odpowiednia strategia sterowania ma istotny wpływ na stopień wykorzystania magazynu oraz jego trwałość.

Znaczącym trendem są również prace dotyczące doboru lokalizacji i pojemności ESS w sieciach trakcyjnych. W badaniach [17] analizowano optymalne rozmieszczenie zasobników energii na liniach zasilających, z uwzględnieniem ograniczeń napięciowych, kosztowych oraz dynamicznych warunków ruchu pojazdów. Wyniki tych badań potwierdzają, że dobrze zaprojektowany system ESS pozwala nie tylko na poprawę jakości zasilania, ale również na redukcję nakładów inwestycyjnych związanych z budową dodatkowych podstacji trakcyjnych.

Na szczególną uwagę zasługują także przykłady komercyjnych wdrożeń. Raporty techniczne ABB i RFI [60] dokumentują instalację przytorowego magazynu energii we włoskim Forli, która stanowi przykład efektywnego połączenia badań naukowych z praktyką inżynierską.

Podsumowując, literatura dowodzi, że zastosowanie ESS w systemach trakcyjnych jest nie tylko rozwiązaniem koncepcyjnym, ale także praktycznie wdrażanym i sprawdzonym w eksploatacji. Wskazuje to jednoznacznie na zasadność badań prowadzonych w niniejszej rozprawie, które koncentrują się na opracowaniu modeli oraz algorytmów pozwalających na integrację i optymalizację pracy ESS w sieciach DC.

3. Zagadnienia związane z magazynowaniem energii w systemach trakcyjnych DC

3.1. Baterie litowo-jonowe

Baterie cechują się wysoką gęstością energii i elastycznością konfiguracyjną. Mogą skutecznie wspierać sieć trakcyjną, jednak ograniczeniem pozostaje ich żywotność oraz podatność na degradację przy dużej liczbie cykli ładowania i rozładowania [20]. Powszechnie stosowanymi ogniwami w dużych magazynach energii są baterie litowo-jonowe, przede wszystkim [61] :

- LFP (LiFePO_4)
- NMC (LiNiMnCoO_2)
- LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Porównawcze zestawienie parametrów z szacowanym kosztem przedstawia tabela 3-1.

Tabela 3-1 Porównanie typowych parametrów eksploatacyjnych baterii Li-Ion (koszt szacowany)

Typ	Szacowany koszt $\frac{USD}{kWh}$	Gęstość energii $\frac{Wh}{kg}$	C-rate ład. / rozł.	Szacowana liczba cykli życia	Napięcie ogniwa [V]
LFP	580	90 - 120	1 / 1 (25 < 2s)	2000	3,2 (2,5 - 3,35)
NMC	420	150 - 220	0,7 - 1 / 1 - 2	1000 - 2000	3,6 (3,0 - 4,2)
LTO	1005	50 - 80	1 (5 < 5s) / 10 (30 < 5s)	3000 - 7000	2,4 (1,8 - 2,85)

Ze względu na znaczącą gęstość energii baterie Li-Ion stosowane są w gałęziach przemysłu tj. zasilanie rezerwowe, magazyny energii dla odnawialnych źródeł energii oraz przemysł *automotive* umożliwiając skalowanie zasobników w granicach setek do tysięcy kWh. Ze względu na niskie napięcie pojedynczego ogniwa baterijne magazyny energii skaluje się poprzez szeregowo-równoległe łączenie ogniw zapewniając żądany zakres pracy. Niesie to ze sobą ryzyko niezrównoważenia napięciowego pomiędzy ogniwami. W wyniku procesów elektrochemicznych zachodzących na elektrodach baterii może dojść do przeciążenia pojedynczego lub kilku ogniw wywołując tzw. efekt *thermal runaway*, czyli niekontrolowaną reakcję egzotermiczną która może doprowadzić nie tylko do zniszczenia ogniwa ale również bardzo niebezpiecznego w skutkach rozprzestrzenienia się pożaru [62]. W związku z tym istnieje wiele regulacji narzucających na producentów ogniw oraz integratorów magazynów określających szereg wymagań bezpieczeństwa potwierdzonych testami typu m.in. [21], [63], [64], [65], [66], [67], [68].

Ze względu na konieczność ciągłego monitorowania parametrów pracy ogniw oraz ich balansowania, moduły baterijne wyposażone są w specjalizowane układy BMS (Battery Management System), które poza balansowaniem napięć poszczególnych ogniw oraz monitorowaniem temperatury komunikują się z elementami wykonawczymi tj. konwertery DC/DC przesyłając informacje o aktualnym stanie systemu baterijnego i ograniczeniach obciążenia [69]. Pod względem bezpieczeństwa przodują ogniwa LTO,

przez co dość często stosowane są w taborze jezdnym który wymaga bardzo wysokich standardów pod względem niezawodności oraz bezpieczeństwa. Jak pokazano w tabeli 3-1, baterie bazujące na technologii LTO są jednocześnie najdroższym rozwiązaniem.

Ze względu na wysokie zapotrzebowanie rozwiązań rynkowych w obszarze niskich napięć tj. do 1000 V AC (1500 V DC) upowszechnione komercyjne rozwiązania modułów bateryjnych nie przekraczają typowo napięcia nominalnego pracy 1000 V.

Regulacje europejskie, w szczególności norma [70] określa dopuszczalny przedział zmienności napięć w systemach trakcyjnych (patrz podsumowanie w tabeli 3-2), przez co istnieje konieczność stosowania dwukierunkowych obniżająco-podwyższających konwerterów DC/DC tak, aby dopasować chwilowe wartości napięć pomiędzy zasobnikiem a trakcją. Szczegółowy opis działania takiego konwertera znajduje się w rozdziale 4.

Tabela 3-2 Dopuszczalny przedział zmienności napięć w systemach trakcyjnych prądu stałego wg. normy [70].

System	Najniższe napięcie krótkotrwałe [V]	Najniższe napięcie długotrwałe [V]	Napięcie nominalne [V]	Najwyższe napięcie długotrwałe [V]	Najwyższe napięcie krótkotrwałe [V]
DC 750	500	500	750	900	1000
DC 1500	1000	1000	1500	1800	1950
DC 3000	2000	2000	3000	3800	3900

Z perspektywy systemu istotnymi parametrami zasobników bateryjnych jest ich sprawność, na którą składają się m. in. całkowita rezystancja szeregową (ESR – Equivalent Series Resistance) oraz zakres dopuszczalnych napięć pracy ogniwa istotny z perspektywy prądów roboczych przetwornicy DC/DC oraz ograniczeń termicznych.

Przykładowy system bateryjny firmy ABB oparty o technologię LTO wraz z zintegrowanym BMS przedstawiono na rysunku 3-1. W załączonej pod rysunkiem tabeli można znaleźć informację o parametrach eksploatacyjnych, w tym zakresie napięć roboczych, pojemności oraz przewidywanym czasie życia.



Variants	Unit	8C-500	8C-800	10C-500	10C-800
Rating					
Nominal energy	kWh	20.3	30.5	17.7	26.5
Nominal voltage	V	442	662	442	662
Charge cut-off voltage	V	518	778	518	778
Discharge cut-off voltage	V	288	432	288	432
Peak power charge/discharge, up to	kW	200 / 175	300 / 260	200 / 175	300 / 260
Continuous power charge/discharge, typical	kW	85	125	85	125
Cell chemistry		Lithium Titanate Oxide (LTO)			
Discharge efficiency		>98 % at 25°C, 90%-10% SoC, 1C		>99 % at 25°C, 90%-10% SoC, 1C	
Operating temperature range		-40°C to 55°C			
Mechanical data					
Dimensions (excl. mounting feet)	mm	L600 x W600 x H1800	L600 x W600 x H2200	L600 x W600 x H1800	L600 x W600 x H2200
Weight	kg	284	416	284	416
Mounting location		Stationary, indoors			
Degree of protection		IP 20			
Shock & Vibration		Battery module according Cat. 1, Class B (IEC 61373)			
Cooling		Liquid cooling (water glycol)*			
		*Cooling power and flow rate to be selected based on operation profile			
Operation and diagnosis					
Communication interface		CANopen			
Service tool		Laptop-based service tool			
Lifetime					
Design life		15 years			
Cycle life		20'000 cycles at 35°C, 10-90 % SOC, 2C/2C		40'000 cycles at 35°C, 10-90 % SOC, 3C/3C	
Tested and certified					
Standards		UN 38.3, IEC 62619, IEC 62620, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-4			

Rysunek 3-1 Przekładowy moduł bateryjny w technologii LTO (źródło: abb.com)

3.2. Superkondensatory

Superkondensatory [71], [72] (ultrakondensatory, EDLC – Electrochemical Double Layer Capacitors) cechują się bardzo wysoką gęstością mocy oraz zdolnością do pracy w setkach tysięcy cykli ładowania i rozładowania bez istotnej degradacji parametrów. W porównaniu z bateriami mają znacznie niższą gęstość energii, co ogranicza ich zastosowanie jako samodzielnego magazynu dużej energii, jednak doskonale sprawdzają się jako zasobniki buforowe w systemach trakcyjnych, gdzie liczy się krótki czas odpowiedzi i możliwość szybkiej wymiany energii [22], [73].

Powszechnie stosowane rozwiązania w obszarze trakcji bazują na modułach superkondensatorowych łączonych w układy szeregowo-równoległe, co umożliwia uzyskanie napięć rzędu kilkuset woltów a nawet kilku tysięcy woltów i pojemności w zakresie kilku megadżuli [2]. W porównaniu z bateriami ich integracja jest prostsza (brak

wystąpienia tzw. zjawiska thermal runaway), a głównym ograniczeniem pozostaje wzrost rezystancji ESR i spadek efektywnej pojemności wraz ze starzeniem się dielektryka [23], [74], [75].

Budowę superkondensatora można scharakteryzować w następujący sposób:

- Elektrody: wykonane najczęściej z materiałów węglowych o bardzo dużej powierzchni właściwej (np. węgiel aktywny, grafen, nanorurki węglowe).
- Separator: cienka porowata membrana zapobiegająca zwarceniu elektrod, przepuszczająca jony elektrolitu.
- Elektrolit: przewodzący roztwór wodny lub organiczny, który dostarcza jonów dodatnich i ujemnych.

Mechanizm podwójnej warstwy na granicy elektroda–elektrolit tworzy się na skutek przyłożenia napięcia między elektrody. Warstwa ta składa się z:

- Warstwy Helmholtza – jony przeciwnych znaków gromadzą się bezpośrednio przy powierzchni elektrody.
- Warstwy dyfuzyjnej (Gouy–Chapman) – dodatkowe jony rozmieszczają się w elektrolitowym roztworze w pobliżu elektrody.

Dzięki ogromnej powierzchni elektrod (A) i bardzo małej odległości separacji ładunków (d), uzyskiwana jest bardzo wysoka pojemność w porównaniu z klasycznym kondensatorem, co definiuje podstawowa zależność opisująca kondensator:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (1)$$

gdzie: C - pojemność, ε - przenikalność elektryczna dielektryka, A - efektywna powierzchnia elektrod, d - odległość separacji ładunków.

Rysunek 3-2 przedstawia zintegrowany moduł superkondensatorowy firmy Maxwell. Przedstawiona poniżej tabela zawiera podstawowe parametry tj. pojemność, napięcie oraz rezystancję szeregową (ESR). Można zauważyć, że w porównaniu do baterii energia gromadzona w module jest znacznie niższa, natomiast dopuszczalne prądy przeciążeniowe są wielokrotnie wyższe.



ELECTRICAL	BMOD0165 P048 C0B
Rated Capacitance ¹	165 F
Minimum Capacitance, initial ¹	165 F
Maximum Capacitance, initial ¹	198 F
Maximum ESR _{dc} initial ¹	6.0 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{dc} ¹	100 A
Rated Voltage	48 V
Stored Energy ⁴	53 Wh
Absolute Maximum Voltage ²	51 V
Module Over Voltage (OV) Alarm "ON" (Nominal) ³	48.7 V
Cell Over Voltage (OV) Alarm (Nominal)	2.70 V
Cell Balance Voltage (Nominal)	2.30 V
Absolute Maximum Current	1,600 A
Maximum Series Voltage	800 V
Capacitance of Individual Cells ⁸	3,000 F
Stored Energy, Individual Cell ⁸	3.0 Wh
Number of Cells	18
TEMPERATURE	
Operating Temperature (Cell Case Temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C

Rysunek 3-2 Przekładowy moduł superkondensatorowy (źródło: maxwell.com)

3.3. Kryteria wyboru

Dobór technologii ESS w aplikacjach przytorowych zależy od wymagań:

- technicznych:
 - czasu reakcji,
 - pojemności,
 - mocy szczytowej,
 - czasu życia,
 - typu systemu i związanego z nim ruchu pojazdów tj.:
 - metro,
 - tramwaje,
 - kolej aglomeracyjna, itd.,
- ekonomicznych:
 - kosztów inwestycji,
 - kosztów eksploatacji,
- oraz uwarunkowań lokalnych:
 - dostępności miejsca,
 - integracji z infrastrukturą trakcyjną.

Podstawowym kryterium wyboru magazynu energii jest jego docelowe przeznaczenie w systemie trakcyjnym oraz związany z tym oczekiwany czas życia. Trakcja kolejowa

charakteryzuje się znaczną zmiennością obciążenia – zarówno w wymiarze krótkotrwałych przeciążeń, jak i w skali dobowej czy sezonowej.

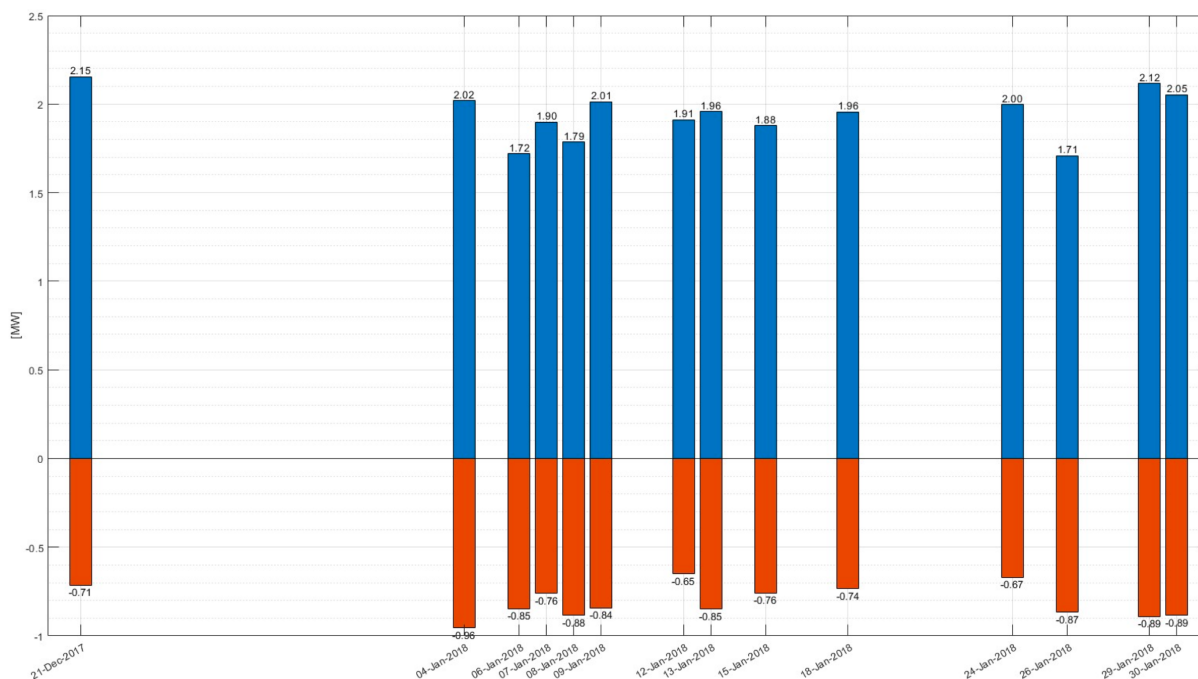
Superkondensatory doskonale sprawdzają się w ograniczaniu gwałtownych przeciążeń trwających zaledwie sekundy, jednak nie są odpowiednim rozwiązaniem w sytuacjach, gdy zapotrzebowanie na moc utrzymuje się przez kilka minut, np. podczas przejazdu pociągu przez długą, wielokilometrową sekcję zasilania. W takich przypadkach zdecydowanie lepszym wyborem są baterie.

Przy wymiarowaniu należy szczególnie pamiętać o wspomnianej zmienności obciążeń i odpowiednio uwzględnić w doborze pojemności użytkowej, zwłaszcza w kontekście ograniczeń wynikających z wartości C-rate.

Kluczowym aspektem jest również czas życia zasobnika. Podczas gdy systemy zasilania trakcji eksploatowane są średnio przez około 15 lat, zarówno w przypadku baterii, jak i superkondensatorów konieczne jest przewymiarowanie pojemności z uwzględnieniem parametrów końca życia (end of life) bądź zapewnienie odpowiedniego serwisu umożliwiającego wymianę elementów.

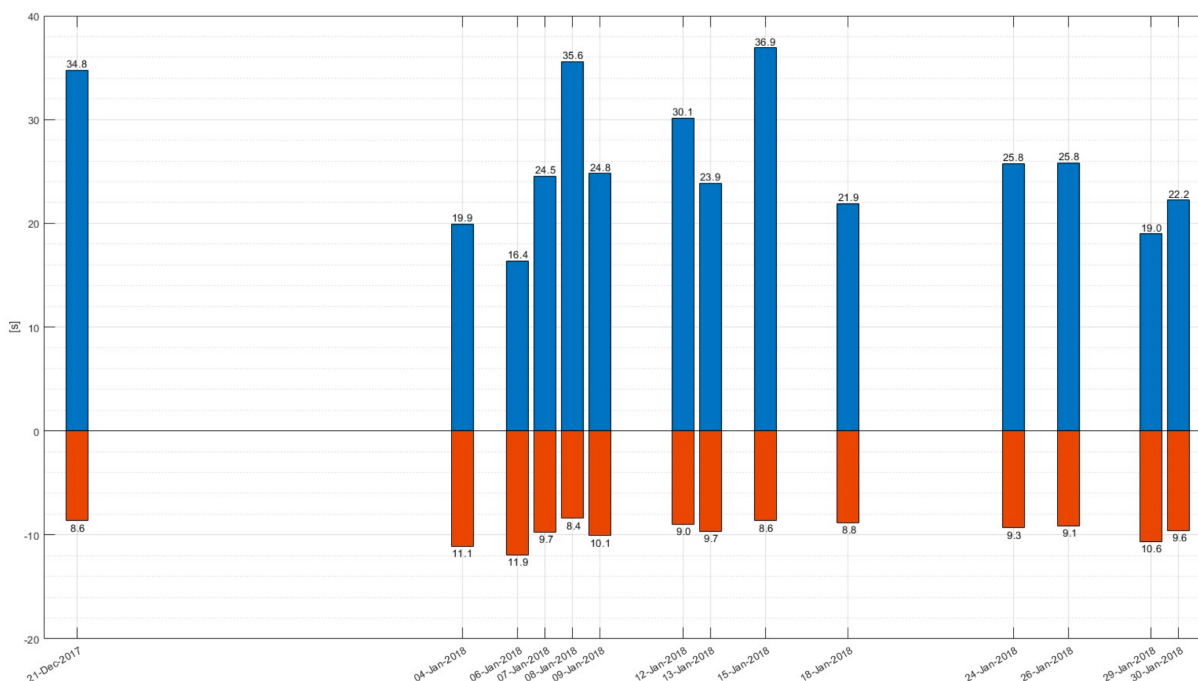
W celu zobrazowania zagadnienia związanego z dorywczym charakterem obciążeń linii trakcyjnej, autor przedstawia przykład oparty na analizie rzeczywistych pomiarów przepływu mocy wykonanych na podstacji zasilającej miejską sekcję tramwajową prądu stałego 750 V. Dane obejmują wybrane dni w okresie miesiąca i stanowiły istotny czynnik przy wymiarowaniu parametrów eksploatacyjnych zasobnika energii. Pomiarzy zostały przeprowadzone przez autora w ramach współpracy z podmiotem zatrudniającym.

Rysunek 3-3 przedstawia uśrednione wartości szczytowych poborów mocy zarejestrowanych na odpywie sekcyjnym podstacji w opisanym dniu. Wartości dodatnie odpowiadają przepływowi energii z podstacji do pojazdów znajdujących się na opomiarowanej sekcji, natomiast wartości ujemne oznaczają przepływ w kierunku przeciwnym, co należy interpretować jako zwrot energii z hamujących pojazdów do systemu poprzez podstację (np. do sąsiadującej sekcji). Na tej podstawie można było przyjąć, że przeciętny przejazd pojazdu wiązał się ze szczytowym zapotrzebowaniem na moc rzędu 2 MW (podczas przyspieszania), oraz -0.8 MW w związku ze zwrotem energii (podczas hamowania elektrodynamicznego).

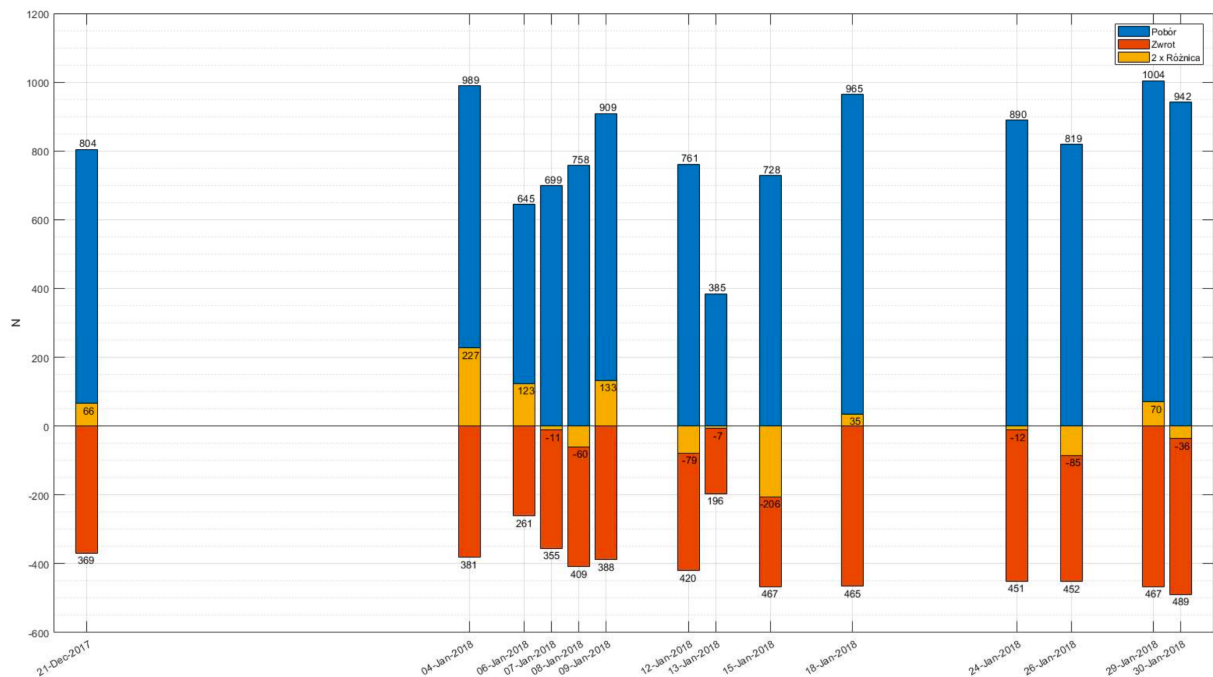


Rysunek 3-3 Średnia dobowa mocy szczytowych dla pojedynczej sekcji (wartość dodatnia – energia dostarczana do sekcji, zasilanie; wartość ujemna – energia zwracana z sekcji, rekuperacja).

Rysunek 3-4 przedstawia średni czas trwania pojedynczego zdarzenia związanego z przyspieszaniem lub hamowaniem pojazdów. Na tej podstawie można przyjąć, że przeciętny czas przyspieszania wynosił około 25 s, natomiast średni czas hamowania – około 10 s.



Rysunek 3-4 Średni czas trwania zdarzenia przyspieszenia i hamowania (wartość dodatnia – energia dostarczana do sekcji, zasilanie; wartość ujemna – energia zwracana z sekcji, rekuperacja).



Rysunek 3-5 Liczba zarejestrowanych zdarzeń przyspieszania i hamowania w cyklu dobowym.

Rysunek 3-5 przedstawia liczbę zarejestrowanych zdarzeń przyspieszania i hamowania w cyklu dobowym na wskazany dzień. Różnica pomiędzy tymi wartościami może być interpretowana jako potencjalna liczba zdarzeń, które mógłby obsłużyć zasobnik energii. Przy założeniu, że jedno hamowanie powinno odpowiadać jednemu przyspieszeniu, różnica wskazuje na ilość energii wytraconej w rezystorach hamowania pojazdów. Na tej podstawie można oszacować, że w analizowanym systemie średnio w ciągu doby wystąpiło około 750 zdarzeń przyspieszania, z czego około 375 hamowań przekazywanych było do sąsiadujących sekcji. Oznacza to potencjał rekuperacyjny rzędu 50% zdarzeń na dobę (w godzinach funkcjonowania komunikacji miejskiej), przy mocy szczytowej około 0,8 MW (z pominięciem receptywności własnej sekcji, której niniejsza analiza nie mogła uwzględnić).

Moc rozładowania magazynu energii należy rozpatrywać jako kompromis pomiędzy wymiarowaniem urządzenia – sieć potencjalnie oczekuje wartości około 2 MW na cykl – a kosztem inwestycyjnym koniecznym do zapewnienia odpowiednich parametrów zasilania. Tego typu ilustracja pozwala zobrazować hipotetyczny potencjał wymagań eksploatacyjnych, jakie stawiane są zasobnikowi energii w systemie trakcyjnym oraz opisanemu w rozdziale 4 konwerterowi DC/DC.

4. Układy energoelektroniczne w systemach trakcyjnych DC

W systemach trakcyjnych można wyróżnić kilka generacji prostowników, które odzwierciedlają ewolucję technologii energoelektronicznych.

Prostowniki niesterowane

Klasyczne układy diodowe pozostają wciąż stosowane w zasilaniu trakcyjnym ze względu na swoją prostotę, niskie koszty oraz wysoką niezawodność. Ich wadą jest brak możliwości regulacji napięcia wyjściowego oraz brak wpływu na kompensację mocy biernej, co ogranicza elastyczność pracy systemu [27], [76].

Prostowniki sterowane

Wprowadzenie prostowników tyrystorowych umożliwiło regulację napięcia wyjściowego poprzez zmianę kąta wysterowania. Rozwiązanie to pozwala na lepsze dopasowanie parametrów zasilania do potrzeb systemu trakcyjnego, jednak kosztem jest wprowadzanie do sieci prądu przemiennego znacznych odkształceń harmoniczných i pogorszenie współczynnika mocy [24], [25].

Prostowniki aktywne

Najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem są prostowniki aktywne (Active Front-End, AFE), wykorzystujące tranzystory IGBT sterowane metodą PWM. Pozwalają one na pełną kontrolę przepływu energii, poprawę jakości energii w sieci AC, ograniczenie zawartości harmoniczných oraz możliwość pracy dwukierunkowej, co jest szczególnie istotne w kontekście integracji przytorowych zasobników energii (ESS) oraz odzysku energii z hamowania regeneracyjnego [38], [77].

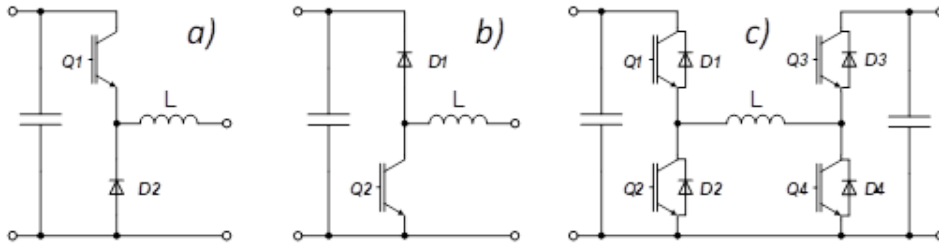
4.1. Konwertery DC/DC

W aplikacjach związanych z magazynowaniem energii, w tym w systemach trakcyjnych, coraz częściej stosuje się przekształtniki DC/DC o szerokim zakresie pracy napięciowej i prądowej. Szczególnie interesującą jest topologia czteroprzetacznikowego konwertera buck–boost (Four-Switch Buck-Boost, FSBB), która łączy w jednej strukturze możliwości obniżania i podwyższania napięcia, a jednocześnie umożliwia pracę dwukierunkową. Dzięki temu możliwa jest zarówno kontrola przepływu energii ze źródła do magazynu, jak i proces odwrotny – np. przy hamowaniu rekuperacyjnym [52], [53], [38].

4.1.1. Struktura i tryby pracy

Topologia FSBB powstaje przez zestawienie dwóch pół-mostków (rysunek 4-1), które współdzielą indukcyjność. Każdy z pół-mostków pełni rolę konwertera typu buck (obniżający) lub boost (podwyższający) w jednym kierunku przepływu prądu. Połączenie ich w układ pełnego mostka daje możliwość swobodnego przetaczania między

funkcjonalnością buck i boost w obu kierunkach. Rozwiązanie to jest prostsze i bardziej zwarte w porównaniu z kaskadowymi układami wielostopniowymi, a jednocześnie zachowuje pełną kontrolę nad napięciem i prądem wejściowym oraz wyjściowym [26], [78].

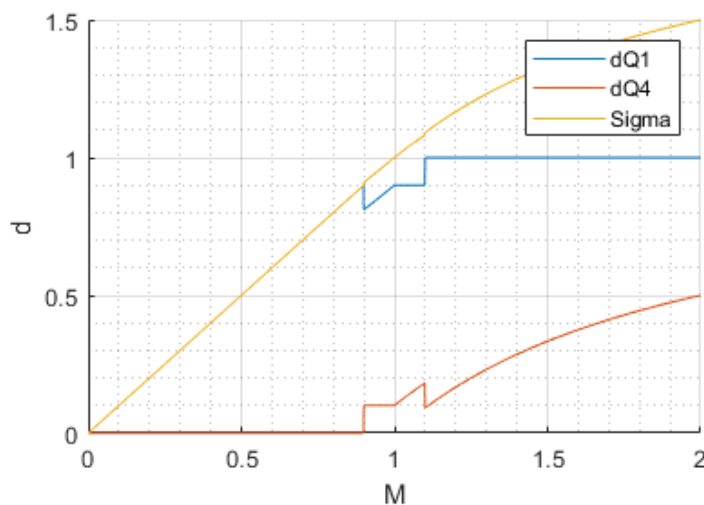


Rysunek 4-1 Topologie przekształtników DC-DC a) buck; b) boost; c) czterołącznikowy buck-boost (FSBB);

W idealnych warunkach zmiana trybu pracy następowałaby przy stosunku napięć wejściowego i wyjściowego:

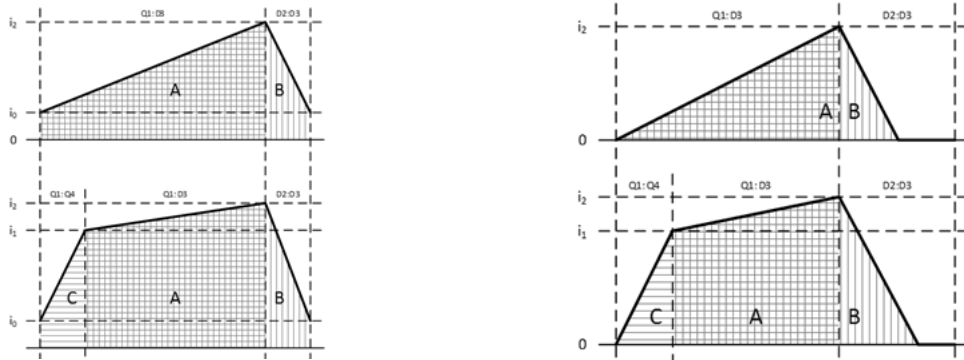
$$M = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad (2)$$

W praktyce jednak pojawia się problem tzw. strefy przejściowej, wynikający z minimalnych czasów załączeń i wyłączeń tranzystorów oraz równości napięć po stronie linii i magazynu energii. Powoduje to niestabilności i oscylacje napięcia, w szczególnych przypadkach uniemożliwia kontrolowany przepływ energii. Dlatego wprowadzono tryb przejściowy (buck–boost transition mode), w którym oba pół-mostki pracują równocześnie, a wartości współczynników wypełnienia są wyznaczane w sposób ciągły [52], [53]. Rysunek 4-2 przedstawia zmodyfikowaną funkcję transferu oraz współczynniki wypełnienia dla tranzystorów Q1 oraz Q2.



Rysunek 4-2 Funkcja transferu (M) oraz indywidualne zadane wypełnienia PWM dla tranzystorów pół-mostków H ($dQ1$, $dQ2$) oraz całego mostka H (Sigma)

Oprócz podziału na tryby napięciowe (buck, boost, transition), wyróżnia się także tryby prądowe – ciągły (Continuous Current Mode, CCM) i nieciągły (Discontinuous Current Mode, DCM), co przedstawiono na rysunku 4-3. W trybie CCM prąd indukcyjności nie osiąga zera w czasie okresu przełączania, natomiast w DCM – opada do zera i pozostaje zerowy przez część cyklu. Granicą między tymi trybami jest BCM (Boundary Conduction Mode).



Rysunek 4-3 Kształt prądu dławika w zależności od trybu przewodzenia (lewo – CCM; prawo – DCM) dwóch trybów pracy (góra – buck; dół – transition).

4.1.2. Obliczanie współczynników wypełnienia

W ramach prac eksperymentalnych i implementacyjnych z udziałem autora zaproponowano metodę wyznaczania współczynników wypełnienia dla wszystkich trybów pracy FSBB, zarówno w CCM, jak i DCM. Analiza opiera się na zasadzie równowagi wolto-sekundowej dla indukcyjności oraz bilansie ładunku. W trybie buck oraz boost współczynnik wypełnienia odpowiada klasycznym zależnościom znanym z jedno-kierunkowych konwerterów DC/DC [26]. W trybach przejściowych dodatkowo uwzględnia się ograniczenie jednego z pół-mostków do maksymalnego wypełnienia D_{max} , a sterowanie drugiego dobiera się tak, aby zapewnić żadaną wartość napięcia wyjściowego.

Dla trybu DCM wyznaczono zestaw równań opisujących różne przypadki zaniku prądu w kolejnych przedziałach przewodzenia. Pozwala to jednoznacznie określić granice między poszczególnymi pod-trybami oraz dobrać odpowiednie współczynniki sterujące.

Tabela 4-1 Tryby pracy konwertera FSBB

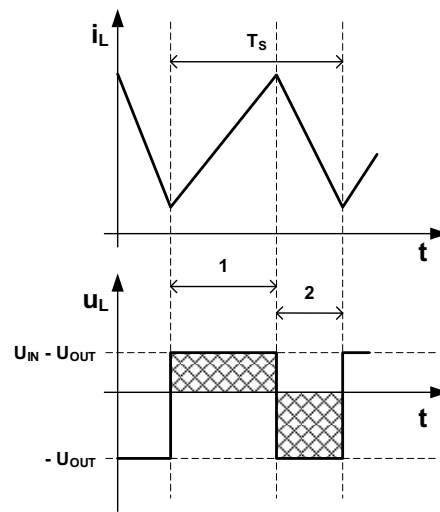
		Tryb napięciowy			
		Buck	Transition		Boost
			Buck	Boost	
Tryb Prądowy	CCM	CCM	CCM	CCM	
	DCM	DCM	DCM	DCM	

Obliczanie współczynników wypełnienia (duty cycles) dla każdego z powyższych trybów wykonywane jest przy następujących uproszczonych założeniach dotyczących FSBB, tj.: wszystkie elementy półprzewodnikowe traktowane są jako idealne przełączniki; wszystkie elementy pasywne są liniowe, niezmiennie w czasie i częstotliwości; przekształtnik pracuje w stanie ustalonym; źródło napięcia wejściowego jest idealne.

4.1.2.1. Tryb CCM (Continuous Current Mode)

W pracy ustalonej w trybie buck przekształtnika (patrz rysunek 4-4) średnie napięcie na indukcyjności w okresie przełączania jest równe zero. Korzystając z zasady równowagi wolto-sekundowej dla indukcyjności, możemy zapisać:

$$\frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot D_{buck} \cdot T_s = \frac{U_{out}}{L} \cdot (1 - D_{buck}) \cdot T_s \quad (3)$$



Rysunek 4-4 Napięcie oraz prąd dławika w trybie buck CCM, 1: $D_{buck} \cdot T_s$, 2: $(1 - D_{buck}) \cdot T_s$

Na tej podstawie możemy wyprowadzić wyrażenie na współczynnik wypełnienia dla trybu buck w CCM, który jest równy wzmacnieniu napięciowemu przekształtnika.

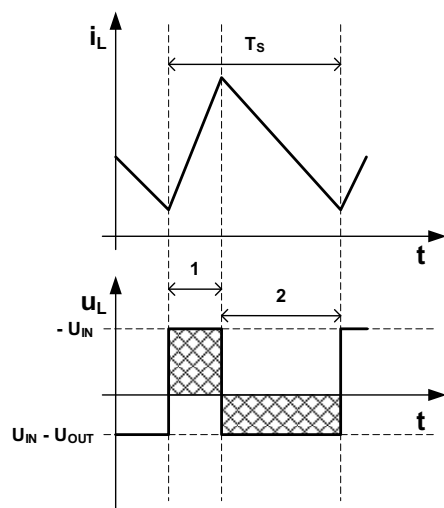
$$D_{buck} = \frac{U_{out}}{U_{in}} = M \quad (4)$$

Aby uzupełnić opis pracy FSBB, mamy:

$$D_{boost} = 0 \quad (5)$$

Współczynnik wypełnienia dla trybu podwyższającego (boost, patrz rysunek 4-5) wyprowadzany jest w taki sam sposób jak dla trybu obniżającego (buck). Stosując zasadę równowagi wolto-sekundowej dla indukcyjności, otrzymujemy:

$$\frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s = \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot (1 - D_{boost}) \cdot T_s \quad (6)$$



Rysunek 4-5 Napięcie i prąd dławika w trybie boost CCM, 1: $D_{boost} \cdot T_s$, 2: $(1 - D_{boost}) \cdot T_s$.

W wyniku przekształceń wzoru (6) otrzymujemy współczynnik wypełnienia dla trybu podwyższającego (boost):

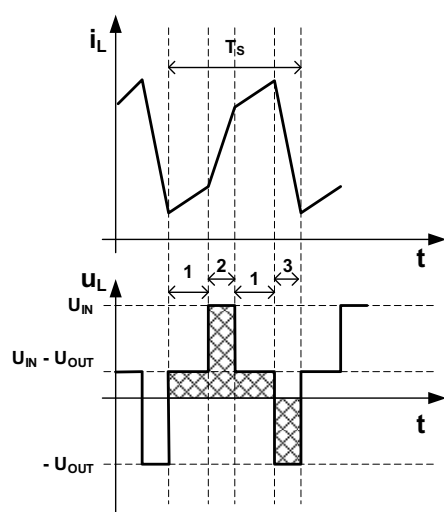
$$D_{boost} = 1 - \frac{U_{in}}{U_{out}} = \frac{M - 1}{M} \quad (7)$$

W przypadku pracy w trybie boost pół-mostek realizujący pracę buck musi przewodzić w sposób ciągły, dlatego:

$$D_{buck} = 1 \quad (8)$$

Dla pracy przejściowej w trybie buck (patrz rysunek 4-6), korzystając z zasady równowagi wolto-sekundowej dla indukcyjności, możemy zapisać:

$$\frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s + \frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s + \frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s = \frac{U_{out}}{L} (1 - D_{buck}) \cdot T_s \quad (9)$$



Rysunek 4-6 Napięcie i prąd indukcyjności podczas przejściowej pracy buck w CCM, 1: $\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s$, 2: $D_{boost} \cdot T_s$, 3: $(1 - D_{buck}) \cdot T_s$.

Stąd możemy zapisać współczynnik wypełnienia buck jako funkcję współczynnika boost:

$$D_{buck} = (1 - D_{boost}) \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}} = (1 - D_{boost}) \cdot M \quad (10)$$

Jednak w tym trybie ograniczamy pracę pół-mostka boost do D_{max} , i.e.:

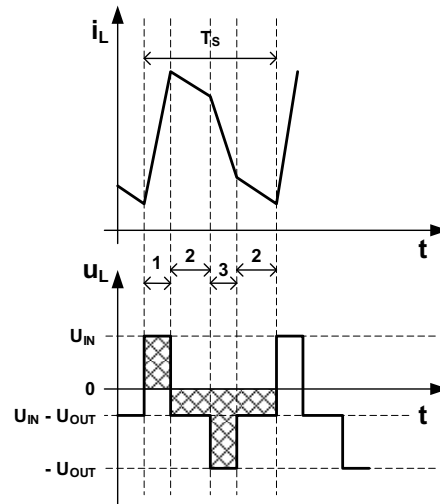
$$D_{boost} = 1 - D_{max} \quad (11)$$

Dlatego otrzymujemy wyrażenie do sterowania gałęzią buck przekształtnika:

$$D_{buck} = D_{max} \cdot M \quad (12)$$

Analogicznie jak dla przypadku pracy przejściowej buck opisanej równaniem (9), dla pracy przejściowej w trybie boost możemy zapisać równanie równowagi wolto-sekundowej indukcyjności (patrz rysunek 4-7):

$$\frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s = \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s + \frac{U_{out}}{L} (1 - D_{buck}) \cdot T_s + \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s \quad (13)$$



Rysunek 4-7 Napięcie i prąd indukcyjności podczas przejściowej pracy boost w CCM, 1: $D_{boost} \cdot T_s$, 2: $\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s$, 3: $(1 - D_{buck}) \cdot T_s$.

Następnie wyrażamy współczynnik wypełnienia boost:

$$D_{boost} = 1 - D_{buck} \cdot \frac{U_{in}}{U_{out}} = 1 - \frac{D_{buck}}{M} \quad (14)$$

Jak poprzednio, praca pół-mostka buck jest ograniczona do D_{max} , i.e.:

$$D_{buck} = D_{max} \quad (15)$$

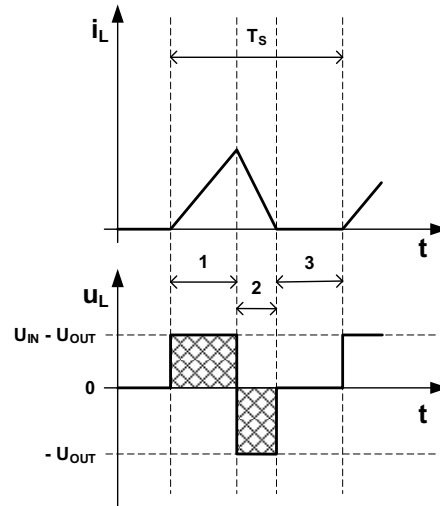
Zatem współczynnik wypełnienia boost można zapisać:

$$D_{boost} = 1 - \frac{D_{max}}{M} \quad (16)$$

4.1.2.2. Tryb DCM (Discontinuous Current Mode)

W trybie buck (patrz rysunek 4-8) korzystając z zasady równowagi wolto-sekundowej dla indukcyjności, możemy zapisać:

$$\frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot D_{buck} \cdot T_s = \frac{U_{out}}{L} \cdot D_1 \cdot T_s \quad (17)$$



Rysunek 4-8 Napięcie i prąd indukcyjności podczas pracy buck w DCM, 1: $D_{buck} \cdot T_s$, 2: $D_1 \cdot T_s$, 3: $(1 - D_{buck} - D_1) \cdot T_s$.

W przypadku DCM interesuje nas wyrażenie współczynnika D_1 :

$$D_1 = D_{buck} \cdot \left(\frac{U_i}{U_o} - 1 \right) = D_{buck} \cdot \frac{1 - M}{M} \quad (18)$$

Wyrażając średni prąd indukcyjności w okresie przełączania jako ważoną sumę średnich prądów dla każdego przedziału przewodzenia elementów półprzewodnikowych i podstawiając D_1 zgodnie z powyższym (18), otrzymujemy współczynnik wypełnienia buck:

$$D_{buck} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg} \cdot M^2}{U_{out} \cdot (1 - M)}} \quad (19)$$

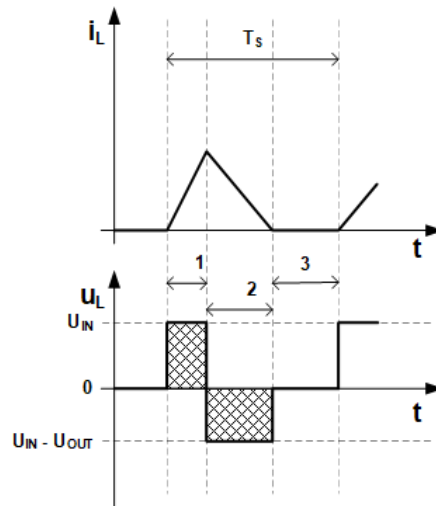
Współczynnik wypełnienia boost wynosi:

$$D_{boost} = 0 \quad (20)$$

Podobnie jak w trybie buck, w pracy w trybie boost (patrz rysunek 4-9) możemy skorzystać z równania równowagi wolto-sekundowej indukcyjności i wyznaczyć współczynnik D_1 :

$$\frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s = \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot D_1 \cdot T_s \quad (21)$$

$$D_1 = \frac{D_{boost}}{\frac{U_{out}}{U_{in}} - 1} = \frac{D_{boost}}{M - 1} \quad (22)$$



Rysunek 4-9 Napięcie i prąd indukcyjności podczas pracy boost w DCM, 1: $D_{boost} \cdot T_s$, 2: $D_1 \cdot T_s$, 3: $(1 - D_{boost} - D_1) \cdot T_s$.

Następnie z równania średniego prądu indukcyjności otrzymujemy zależność na współczynnik wypełnienia boost w DCM:

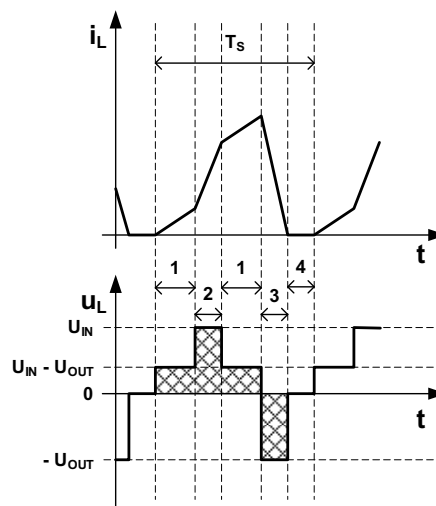
$$D_{boost} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg} \cdot (M-1)}{U_{out}}} \quad (23)$$

oraz:

$$D_{buck} = 1 \quad (24)$$

Dla pracy przejściowej w trybie buck (patrz rysunek 4-10), korzystając z zasady równowagi wolto-sekundowej dla indukcyjności, możemy zapisać:

$$\frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s + \frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s + \frac{U_{in} - U_{out}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s = \frac{U_{out}}{L} \cdot D_1 \cdot T_s \quad (25)$$



Rysunek 4-10 Napięcie i prąd indukcyjności podczas przejściowej pracy buck w DCM, 1: $\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s$, 2: $D_{boost} \cdot T_s$, 3: $D_1 \cdot T_s$, 4: $(1 - D_{buck} - D_1) \cdot T_s$.

Stąd otrzymujemy:

$$D_1 = D_{buck} \cdot \left(\frac{U_{in}}{U_{out}} - 1 \right) + D_{boost} = \frac{D_{buck}}{M} - D_{buck} + D_{boost} \quad (26)$$

Dalej, wyrażając średni prąd indukcyjności i podstawiając D_1 , dostajemy:

$$D_{buck} = \frac{M}{2 \cdot (1 - M)} \cdot \left[\sqrt{M^2 \cdot D_{boost}^2 + 4 \cdot (1 - M) \cdot \frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg}}{U_{out}}} + (M - 2) \cdot D_{boost} \right] \quad (27)$$

Do tego dodajemy ograniczenie współczynnika boost:

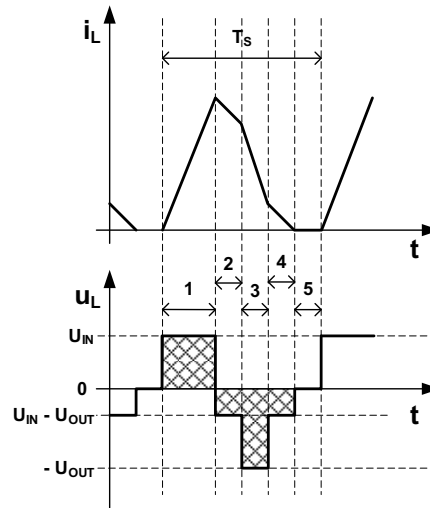
$$D_{boost} = 1 - D_{max} \quad (28)$$

W odróżnieniu od przejściowego trybu buck w DCM, dla trybu boost występują trzy przypadki zależnie od poziomu nieciągłości prądu, tzn. od tego, w którym z przedziałów przewodzenia w okresie przetężania prąd indukcyjności osiąga zero.

Przypadek 1 – wysoki poziom DCM

Zgodnie z rysunkiem 4-11, prąd osiąga zero w 4. przedziale przewodzenia: pół-mostek buck przewodzi (górny tranzystor), pół-mostek boost jest zablokowany (przewodzi górna dioda).

$$\frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s = \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s + \frac{U_{out}}{L} (1 - D_{buck}) \cdot T_s + \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot D_1 \cdot T_s \quad (29)$$



Rysunek 4-11 Przebiegi dla przejściowego boost w DCM – Przypadek 1, 1: $D_{boost} \cdot T_s$, 2: $\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s$, 3: $(1 - D_{buck}) \cdot T_s$, 4: $D_1 \cdot T_s$, $(\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} - D_1) \cdot T_s$.

Stąd:

$$D_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{out} + U_{in}}{U_{out} - U_{in}} \cdot (D_{buck} + D_{boost}) - \frac{U_{out}}{U_{out} - U_{in}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{M + 1}{M - 1} \cdot (D_{buck} + D_{boost}) - \frac{M}{M - 1} \quad (30)$$

Po zapisaniu średniego prądu indukcyjności i podstawieniu D_1 otrzymujemy współczynnik boost w tym trybie DCM:

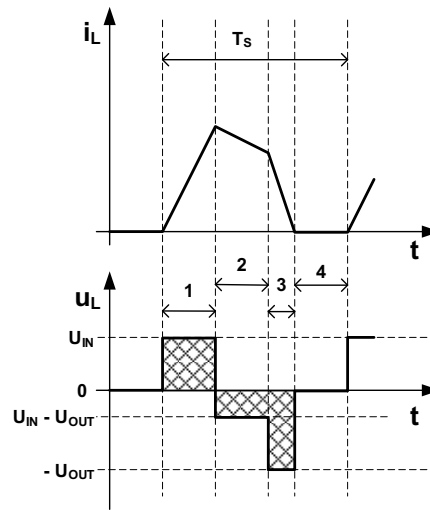
$$D_{boost} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{M-1}{M} \cdot D_{buck} + \frac{M+1}{M} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg}}{U_{out}} \cdot (M-1) - 1 \right)} + \frac{M+1}{M} \cdot (1 - D_{buck}) \right] \quad (31)$$

Jak poprzednio, praca pół-mostka buck jest ograniczona do D_{max} :

$$D_{buck} = D_{max} \quad (32)$$

Przypadek 2 – niski poziom DCM

Zgodnie z rysunkiem 4-12, prąd chwilowy indukcyjności spada do zera w 3. przedziale, gdy oba pół-mostki są zablokowane, a indukcyjność rozładowuje się do wyjścia przez diody swobodnego przepływu (free-wheeling).



Rysunek 4-12 Przebiegi dla przejściowego boost w DCM – Przypadek 2, 1: $D_{boost} \cdot T_s$, 2: $\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s$, 3: $D_1 \cdot T_s$, 4: $(\frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} + D_1) \cdot T_s$.

Stosując ponownie zasadę równowagi wolto-sekundowej zgodnie z polami oznaczonymi na rysunku 4-12:

$$\frac{U_{in}}{L} \cdot D_{boost} \cdot T_s = \frac{U_{out} - U_{in}}{L} \cdot \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \cdot T_s + \frac{U_{out}}{L} \cdot D_1 \cdot T_s \quad (33)$$

Wyznaczamy niewiadomy współczynnik:

$$D_1 = \frac{D_{buck} \cdot (U_{in} - U_{out}) + D_{boost} \cdot (U_{in} + U_{out})}{2U_{out}} = \frac{D_{buck} \cdot (1 - M) + D_{boost} \cdot (1 + M)}{2M} \quad (34)$$

Podstawiając do równania średniego prądu indukcyjności, dostajemy współczynnik boost dla głębokiego DCM:

$$D_{boost} = \frac{2M}{3M + 1} \cdot \sqrt{D_{buck}^2 + (3M + 1) \cdot \frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg}}{U_{out}}} - \frac{M + 1}{3M + 1} \cdot D_{buck} \quad (35)$$

Dla pracy pół-mostka buck otrzymujemy tożsame wyrażenie na D_1 jak w (34):

$$D_1 = \frac{D_{buck} \cdot (U_{in} - U_{out}) + D_{boost} \cdot (U_{in} + U_{out})}{2U_{out}} = \frac{D_{buck} \cdot (1 - M) + D_{boost} \cdot (1 + M)}{2M} \quad (36)$$

Po podstawieniu (36) do (35) ponownie otrzymujemy:

$$D_{boost} = \frac{2M}{3M + 1} \cdot \sqrt{D_{buck}^2 + (3M + 1) \cdot \frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg}}{U_{out}}} - \frac{M + 1}{3M + 1} \cdot D_{buck} \quad (37)$$

Z kolei dla pół-mostka buck:

$$D_{buck} = D_{max} \quad (38)$$

Aby wyznaczyć warunek brzegowy między przypadkiem 1 i 2 w DCM boost, ponownie wyrażamy średni prąd w całym cyklu, przy założeniu, że na granicy tych przypadków:

$$D_1 = (1 - D_{buck}) \quad (39)$$

otrzymujemy:

$$i_{L_{BCM}} = \frac{[D_{buck} \cdot (D_{buck} - 3) + D_{boost} \cdot (1 - D_{boost}) + 2] \cdot U_{out}}{4 \cdot f_s \cdot L} \quad (40)$$

Przypadek 3 – głęboki DCM (normalny boost DCM)

Ten przypadek odpowiada normalnej pracy boost w DCM (nie przejściowej), gdy prąd indukcyjności spada do zera w 2. przedziale, a na działanie wpływa jedynie współczynnik dla pół-mostka boost.

Zatem współczynnik boost jest taki jak w (22):

$$D_{boost} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_s \cdot L \cdot i_{Lavg} \cdot (M - 1)}{U_{out}}} \quad (41)$$

A dla pół-mostka buck:

$$D_{buck} = D_{max} \quad (42)$$

Dla wyznaczenia prądu granicznego między przypadkami 2 i 3 zakładamy, że na granicy:

$$D_1 = \frac{D_{buck} - D_{boost}}{2} \quad (43)$$

Stąd:

$$i_{L_{BCM}} = \frac{D_{boost} \cdot (2 \cdot D_{boost} + 1) \cdot (D_{buck} - D_{boost}) \cdot U_{out}}{4 \cdot D_{buck} \cdot f_s \cdot L} \quad (44)$$

4.1.3. Struktura sterowania

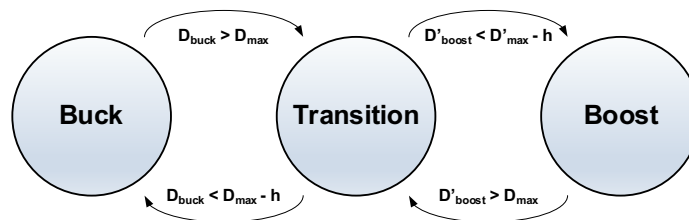
Aktywny współczynnik wypełnienia dla każdego pół-mostka przekształtnika FSBB wybierany jest w zależności od odpowiedniego trybu napięciowego i trybu prądowego. Wybór ten można opisać za pomocą automatu Mealy'ego, w którym poprzedni stan oraz wyznaczone współczynniki wypełnienia determinują stan aktywny (tj. tryb napięciowy i prądowy), a tym samym aktywny współczynnik wypełnienia.

Dla uproszczenia automatu stanów wprowadzono następujące oznaczenie, stosowane przy wyznaczaniu aktywnego współczynnika wypełnienia:

$$D'_{boost} = 1 - D_{boost} \quad (45)$$

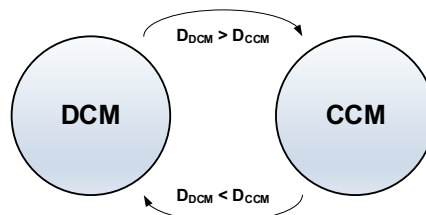
Przejście pomiędzy trybami napięciowymi odbywa się zgodnie z rysunkiem 4-13 i bazuje na porównaniu wyznaczonych współczynników wypełnienia dla strefy nie przejściowej (D_{buck} , D'_{boost}) z określonym współczynnikiem granicznym D_{max} .

Ponieważ przejście pomiędzy trybami napięciowymi zmienia wzorzec przełączania, do pętli przejściowych wprowadzono człon asymetryczny (oznaczony na rysunku 4-13 symbolem h), który zabezpiecza wybór trybu przed oscylowaniem między dwoma sąsiednimi stanami. Zamiast tego można by także zastosować blokadę czasową (tzw. timed lockout), aby uniemożliwić powrót do poprzedniego trybu napięciowego i uzyskać podobny efekt.



Rysunek 4-13 Wybór trybu napięciowego dla aktywnego współczynnika wypełnienia.

W dalszej kolejności, wewnątrz każdego trybu napięciowego, wybór trybu prądowego można zrealizować poprzez proste porównanie wyznaczonych współczynników wypełnienia dla CCM i DCM, wybierając mniejszy z nich (rysunek 4-14). Należy zauważyć, że – jak wspomniano na początku rozdziału – dla współczynnika boost stosowane jest oznaczenie dopełniające D'_{boost} . Alternatywnie można również porównać średni prąd indukcyjności I_{Lavg} z wyznaczonym prądem granicznym I_{LBCM} , aby określić tryb prądowy.



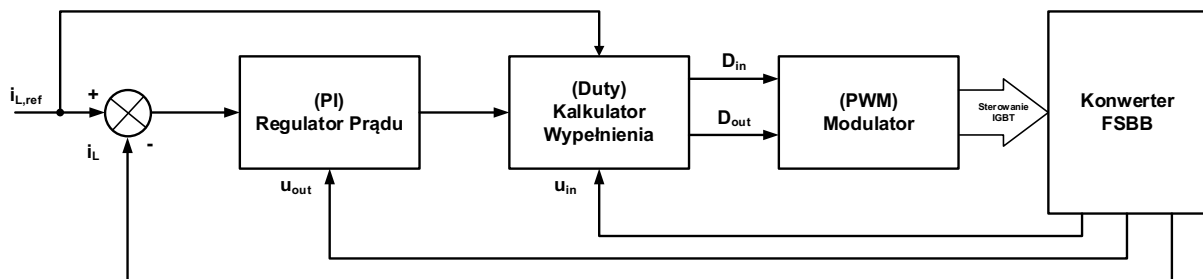
Rysunek 4-14 Wybór trybu prądowego dla aktywnego współczynnika wypełnienia.

Niniejszy opis obejmuje jedynie jeden kierunek przepływu energii. Aby jednak wybór współczynnika wypełnienia obejmował cały zakres pracy (tj. dwukierunkowy przepływ energii), przed powyższym wyborem trybu napięciowego i prądowego należy sprawdzić kierunek średniego prądu indukcyjności. W zależności od kierunku, w równaniach dla współczynników wypełnienia zamieniane są miejscami napięcia wejściowe i wyjściowe.

Sterowanie FSBB zrealizowano jako układ regulacji prądu średniego indukcyjności. Obliczone współczynniki wypełnienia są wybierane w zależności od aktualnego trybu pracy. Zastosowano regulator PI z możliwością dodania członu sprzężenia w przód (feed-forward) napięcia wyjściowego, co poprawia odpowiedź dynamiczną zwłaszcza w przypadku magazynów energii o dużej pojemności (baterie, superkondensatory).

Dla aplikacji dużej mocy uwzględniono pracę wielofazową (np. trzy fazy), z przesunięciem fazowym sygnałów PWM w celu redukcji tętnień i zawartości harmoniczných prądów. Sterowanie obejmuje zarówno „wirtualny” prąd średni wszystkich faz, jak i dodatkowy układ równoważenia prądów międzyfazowych.

Pętla regulacji przedstawiona na rysunku 4-15 wykorzystuje kalkulator współczynnika wypełnienia do realizacji dwukierunkowej regulacji średniego prądu indukcyjności w całym zakresie napięć wejściowych i wyjściowych.



Rysunek 4-15 Schemat blokowy regulacji średniego prądu indukcyjności.

Formalnie nazywamy pół-mostek znajdujący się po lewej stronie (patrz rysunek 4-1) mostkiem wejściowym, a jego elementy półprzewodnikowe są sterowane współczynnikiem wypełnienia D_{in} . Analogiczną konwencję stosujemy dla pół-mostka znajdującego się po prawej stronie (czyli D_{out}). Rozróżnienie to jest potrzebne, ponieważ tryb pracy danego pół-mostka może zmieniać się w czasie w zależności od kierunku przepływu prądu.

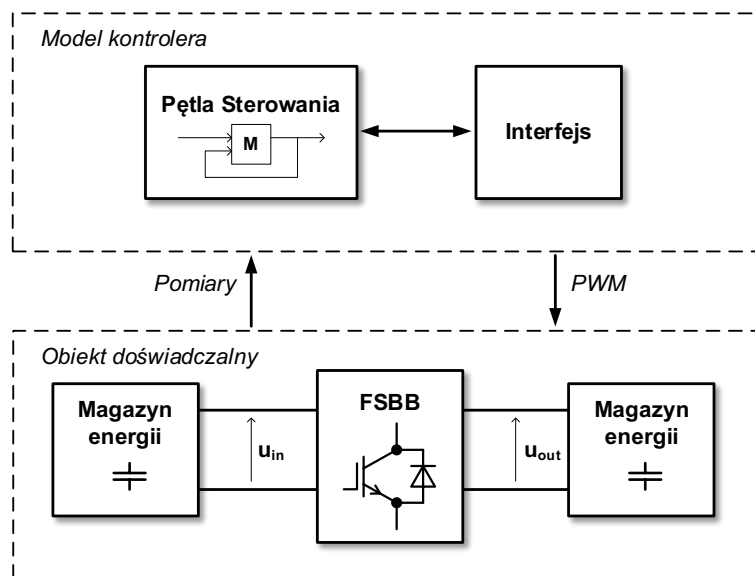
Regulator zamkniętej pętli jest regulatorem PI, do którego zmierzone napięcie wyjściowe może być dodane jako składowa wyprzedzająca (feed-forward) lub służyć do ustalenia warunków początkowych całki. Poprawia to odpowiedź układu regulacji, szczególnie w przypadkach, gdy obciążeniem wyjściowym jest kondensator lub bateria, jak ma to miejsce w zastosowaniach związanych z magazynowaniem energii.

4.1.4. Wyniki symulacyjne i eksperymentalne

Na potrzeby weryfikacji opracowano model symulacyjny obejmujący przekształtnik trójfazowy FSBB z tranzystorami IGBT oraz dwa zasobniki energii w postaci modułów superkondensatorowych. W teście zadano skok mocy 375 kW, powodując transfer energii pomiędzy zasobnikami w zakresie od trybu buck do boost poprzez strefę przejściową. Wyniki potwierdziły szybkie działanie układu sterowania, dokładne śledzenie wartości zadanych oraz płynne przejście między trybami bez zakłóceń napięciowych i prądowych.

Kolejny etap obejmował implementację algorytmu na rzeczywistym sterowniku energoelektronicznym i uruchomienie na przekształtniku średniego napięcia. Wyniki eksperymentalne były zgodne z symulacjami – zachowano stabilność, a zakłócenia podczas przejść między trybami były nieistotne.

Aby przedstawić zachowanie struktury regulacji pokazanej na rysunku 4-15, opracowano model symulacyjny, a następnie po walidacji w trybie software-in-the-loop pętla regulacji została zaimplementowana w kontrolerze wbudowanym, aby sterować wysokonapięciowym przekształtnikiem średniej mocy. Końcowa aplikacja przedstawiona tutaj składa się z trójfazowego, czterołącznikowego przekształtnika buck-boost z tranzystorami IGBT oraz dwóch jednostek magazynowania energii opartych na modułach superkondensatorowych.

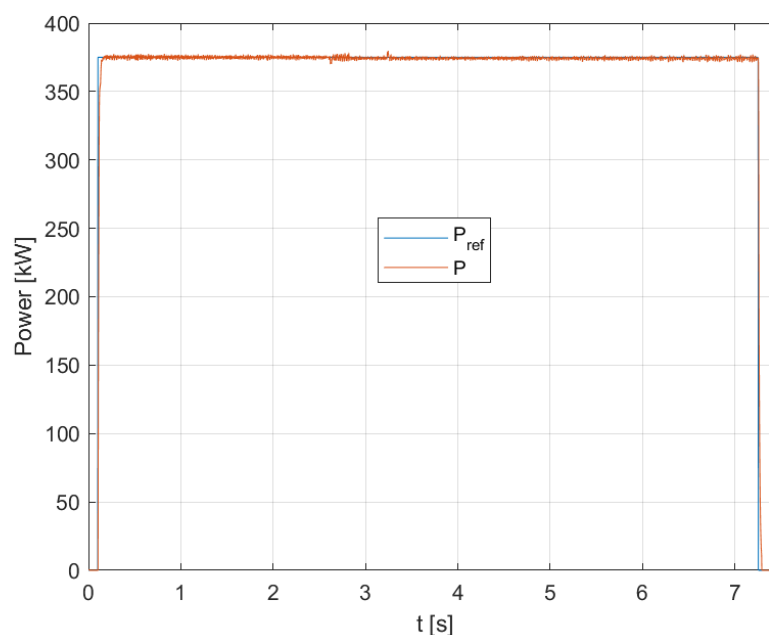


Rysunek 4-16 Rysunek poglądowy układu testowego

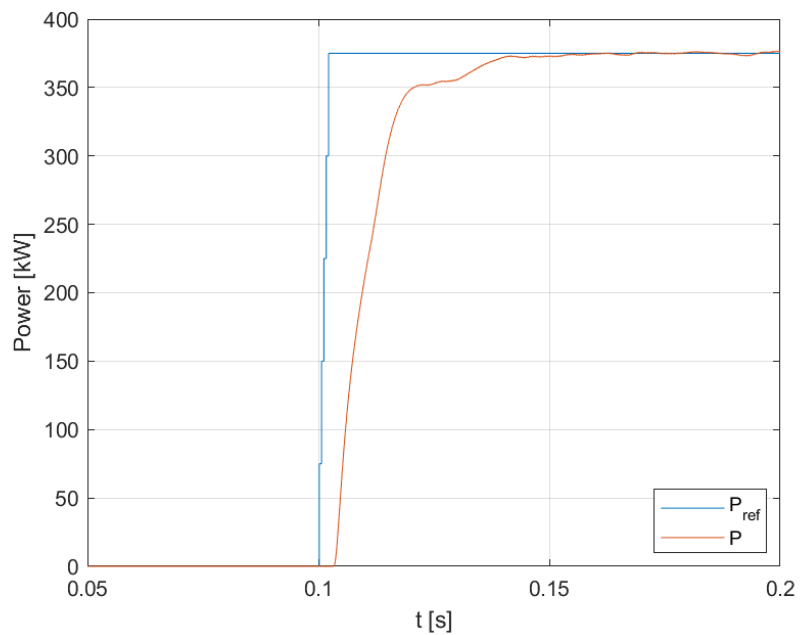
Model symulacyjny (patrz rysunek 4-16) obejmuje zaimplementowaną dyskretną pętlę prądową, emulację sprzętu sterującego oraz pomiarowego (filtrowanie i dyskretyzacja) oraz model przetwarzający przekształtnika energoelektronicznego. Dla napięcia wejściowego i wyjściowego zamodelowano dwie jednostki magazynowania energii oparte na superkondensatorach, ponieważ odpowiada to rzeczywistej aplikacji sprzętowej i umożliwia dwukierunkowy przepływ energii.

Model został sparametryzowany zgodnie z parametrami aplikacji końcowej, a w rozprawie przedstawiono przypadek symulacji ładowania jednostki wyjściowej magazynu superkondensatorowego przy stałej mocy. Jednostki magazynowania zostały wstępnie naładowane do wartości 1,6 kV (wejście) oraz 1,1 kV (wyjście), a w chwili 0,1 s symulacji zadano skok mocy o wartości 375 kW. Moc odniesienia była utrzymywana przez 7,15 s, tak aby energia została przeniesiona z jednostki wejściowej SU do jednostki wyjściowej SU, a przekształtnik przechodził z trybu buck do trybu boost, przechodząc przez strefę przejściową. Należy zauważyć, że o ile nie podano inaczej, wszystkie przedstawione pomiary są wartościami filtrowanymi (uśrednionymi w okresie przetężania).

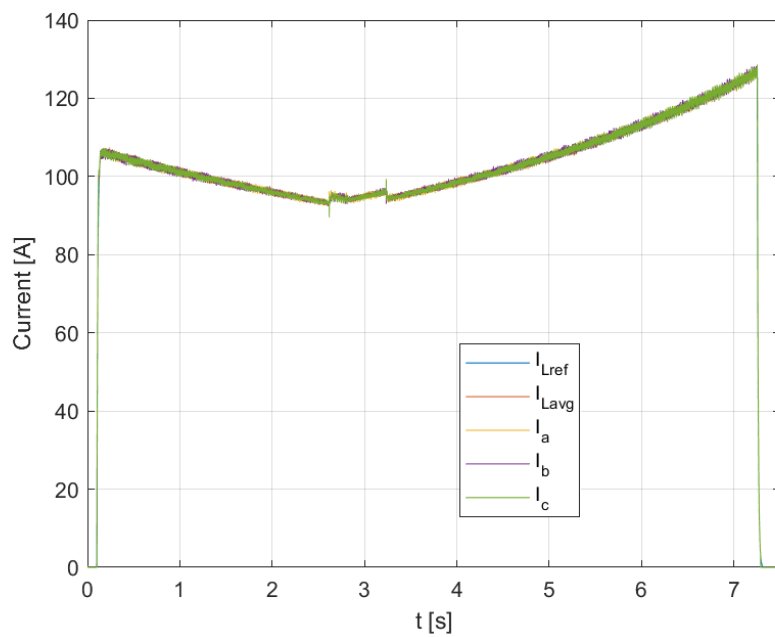
Jak można zaobserwować na rysunkach od 4-17 do 4-21, uzyskano szybkie sterowanie mocą i prądem przy dobrej dokładności w stanie ustalonym. Rysunek 4-17 przedstawia wynikową odpowiedź mocy przekształtnika P względem wartości zadanej mocy w czasie symulacji. Stan przejściowy odpowiedzi skokowej został powiększony na rysunku 4-18, gdzie stan ustalony osiągnięto w czasie ok. 50 ms. Rysunki 4-18 do 4-20 przedstawiają odpowiedź prądów indukcyjności na skok mocy zadanej. Rysunek 4-21 pokazuje szczegółowy przebieg prądów indukcyjności w trakcie przejść pomiędzy trybami buck – transition – boost. Dzięki zastosowaniu kalkulatora współczynnika wypełnienia, przejścia pomiędzy trybami pracy odbywają się przy minimalnych zakłóceniach mocy i napięć (wejściowych i wyjściowych, patrz rysunek 4-26). Rysunki 4-22 i 4-23 przedstawiają zmianę kształtu chwilowego prądu indukcyjności w wyniku przejścia pomiędzy trybami i zmiany wzorca modulacji. Widać także, że regulator prądowy szybko reaguje na lokalne zmiany średniego prądu, a przejście pozostaje płynne pomimo pracy regulatora PI z jednym zestawem współczynników dla całego zakresu pracy.



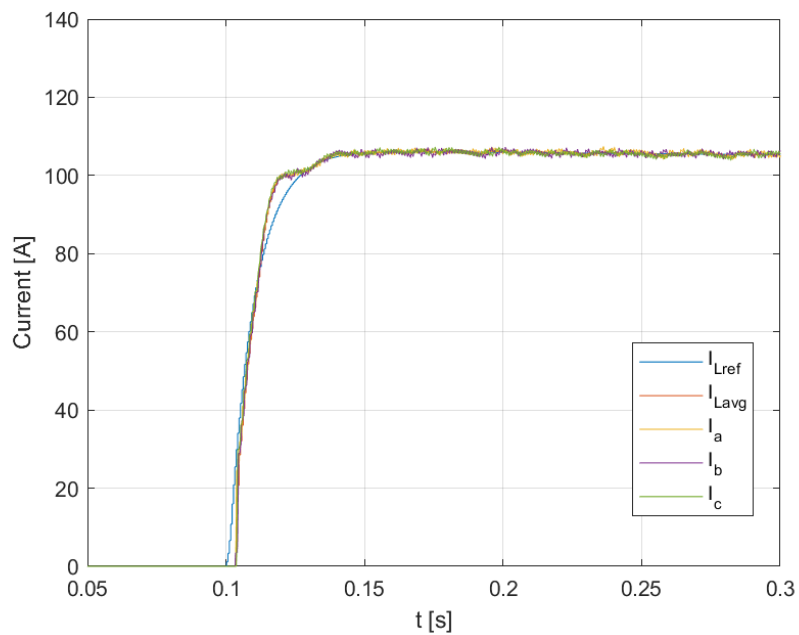
Rysunek 4-17 Wynik symulacji pokazujący moc zadaną P_{ref} i uzyskaną P w skoku wartości zadanej 375 kW.



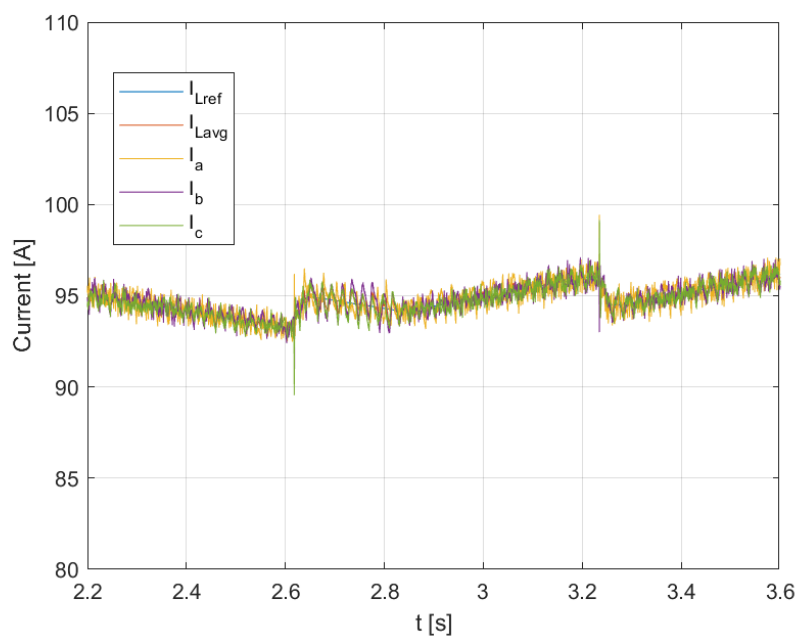
Rysunek 4-18 Wynik symulacji pokazujący moc zadaną P_{ref} i uzyskanej P w skoku wartości zadanej 375 kW - szczegóły.



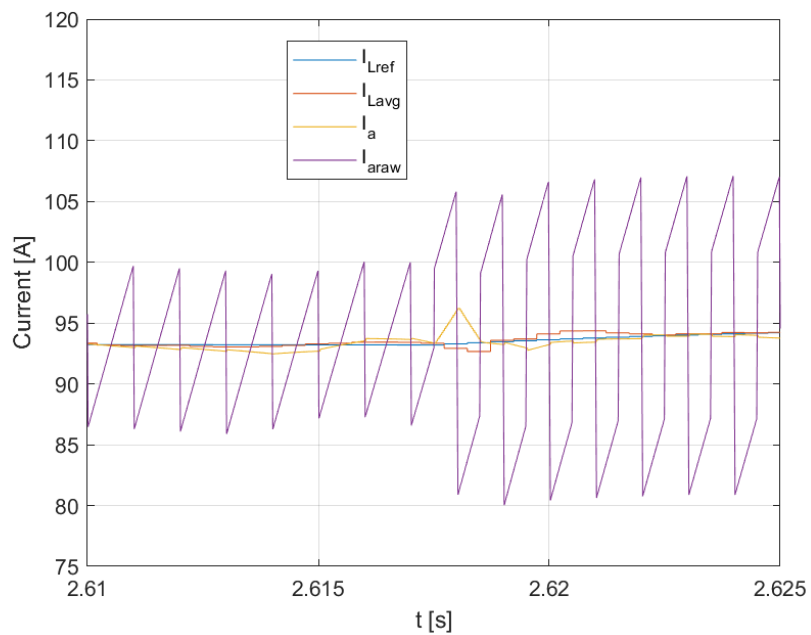
Rysunek 4-19 Wynik symulacji pokazujący kontrolę prądu dławika (I_{Lref} – wartość zadana; I_{Lavg} - wartość średnia krocząca; I_a , I_b , I_c – wartości średnie dla samodzielnych faz)



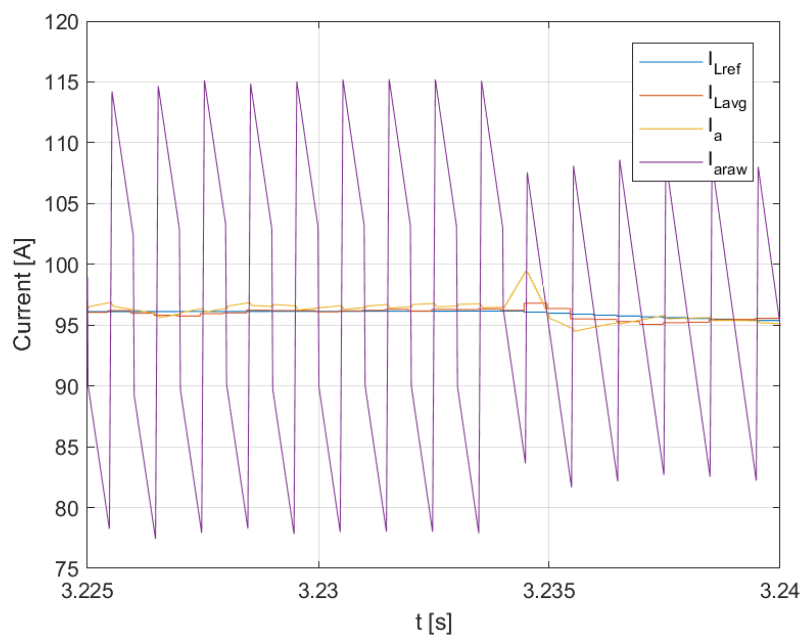
Rysunek 4-20 Wynik symulacji pokazujący kontrolę prądu dławika (I_{Lref} – wartość zadana; I_{Lavg} - wartość średnia krocząca; I_a, I_b, I_c – wartości średnie dla samodzielnych faz) – widok odpowiedzi skokowej.



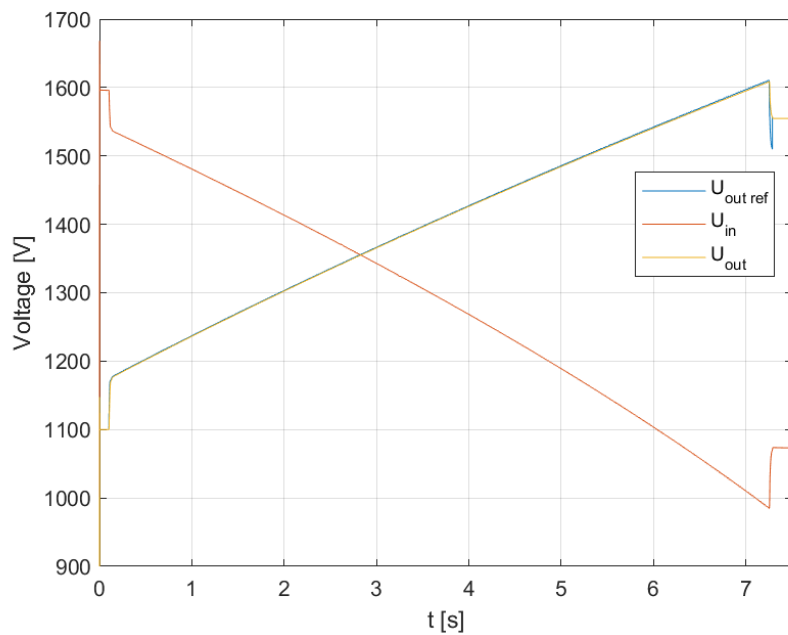
Rysunek 4-21 Wynik symulacji pokazujący kontrolę prądu dławika (I_{Lref} – wartość zadana; I_{Lavg} - wartość średnia krocząca; I_a, I_b, I_c – wartości średnie dla samodzielnych faz) – szczegółowy widok dla obszaru transycji.



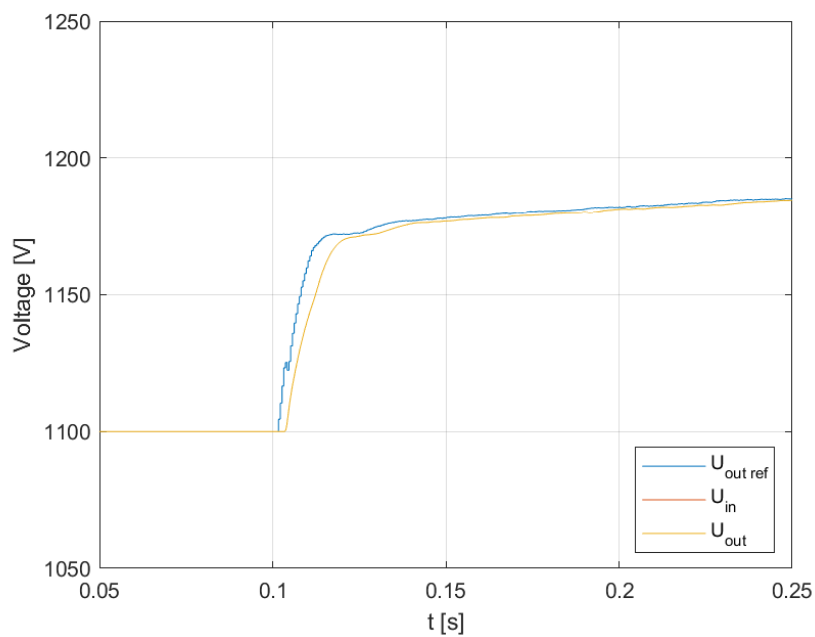
Rysunek 4-22 Wynik symulacji dla wartości chwilowych i średnich prądów dławika podczas tranzycji buck do buck-transition (I_{Lref} - prąd zadany, I_{Lavg} - prąd średni, I_a - prąd średni fazy, I_{araw} - prąd chwilowy).



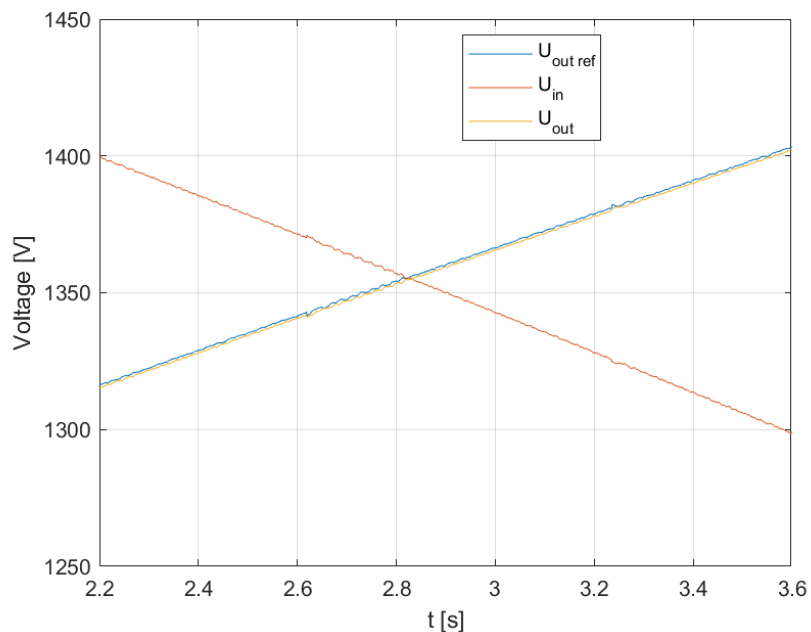
Rysunek 4-23 Wynik symulacji dla wartości chwilowych i średnich prądów dławika podczas tranzycji boost-transition do boost (I_{Lref} - prąd zadany, I_{Lavg} - prąd średni, I_a - prąd średni fazy, I_{araw} - prąd chwilowy).



Rysunek 4-24 Wynik symulacji dla napięć wejściowego i wyjściowego (U_{OutRef} – zadane napięcie wyjściowe, U_{In} – napięcie wejściowe, U_{Out} – napięcie wyjściowe).

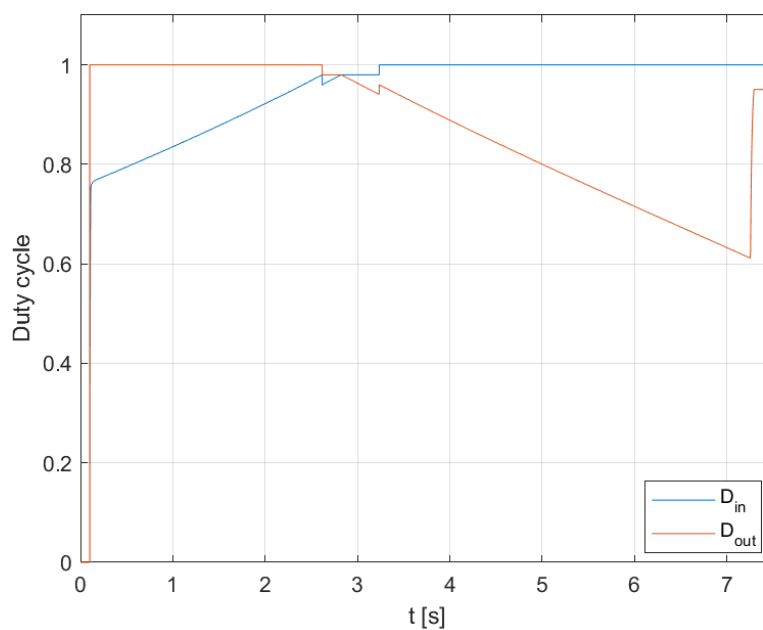


Rysunek 4-25 Wynik symulacji dla napięć wejściowego i wyjściowego (U_{OutRef} – zadane napięcie wyjściowe, U_{In} – napięcie wejściowe, U_{Out} – napięcie wyjściowe) – szczegóły odpowiedzi skokowej.

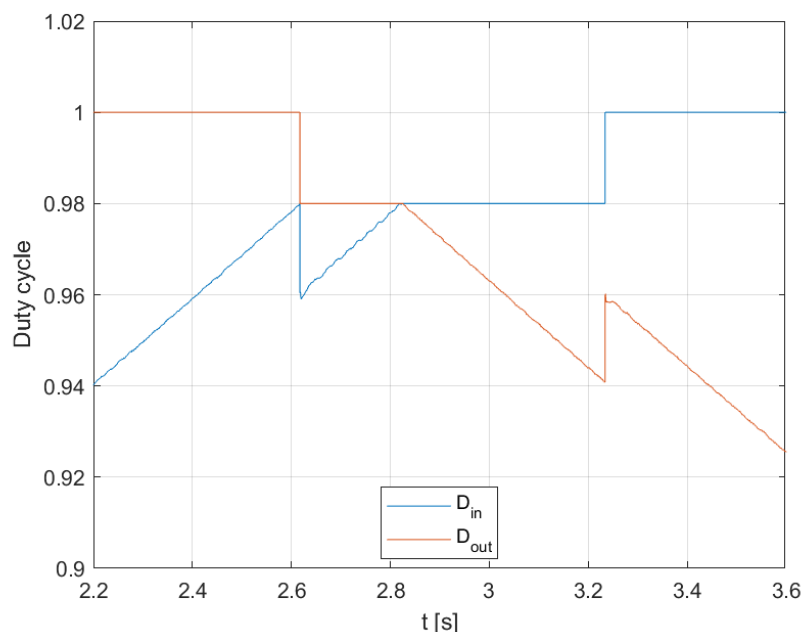


Rysunek 4-26 Wynik symulacji dla napięć wejściowego i wyjściowego (U_{OutRef} – zadane napięcie wyjściowe, U_{In} – napięcie wejściowe, U_{Out} – napięcie wyjściowe) – szczegóły w obszarze tranzycji.

Na rysunkach 4-27 i 4-28 przedstawiono współczynnik wypełnienia PWM dla półmostków wejściowego i wyjściowego, obliczony przez kontroler w trybie symulacyjnym, który jest identyczny z teoretycznymi obliczeniami pokazanymi na rysunku 4-2.



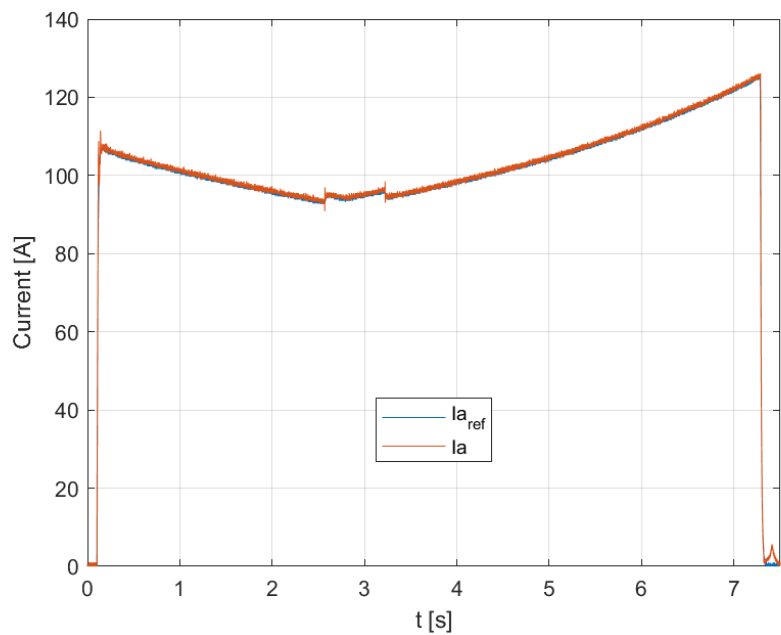
Rysunek 4-27 Wynik symulacji zadawanych wypełnień na mostek H przed balansowaniem (D_{in} – wypełnienie wejściowe, D_{out} – wypełnienie wyjściowe).



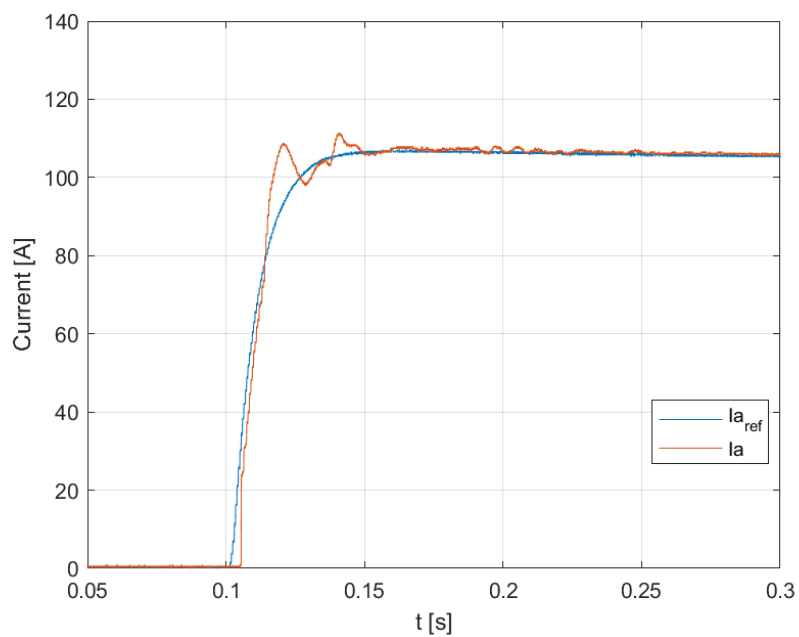
Rysunek 4-28 Wynik symulacji zadawanych wypełnień na mostek H przed balansowaniem (D_{in} – wypełnienie wejściowe, D_{out} – wypełnienie wyjściowe) – szczegóły obszaru tranzycji.

Do przetestowania regulacji na rzeczywistym obiekcie z rysunku 4-16, model został zastąpiony odpowiednią funkcjonalnością do współpracy z rzeczywistym sprzętem sterującym (patrz rysunek 4-37), a kod źródłowy został skompilowany i załadowany do kontrolera energoelektronicznego. Modelowany obiekt został zastąpiony rzeczywistym przekształtnikiem dużej mocy i dwiema jednostkami magazynowania energii opartymi na superkondensatorach. Oprogramowanie sterujące zostało sparametryzowane, a jednostki wstępnie naładowane, aby odtworzyć warunki użyte w modelu symulacyjnym. Następnie zadano skok mocy 375 kW, a napięcia i prądy zostały zmierzone za pomocą sond w systemie energetycznym, przedstawionym na rysunku 4-37, i porównane z wartościami odniesienia generowanymi przez regulator.

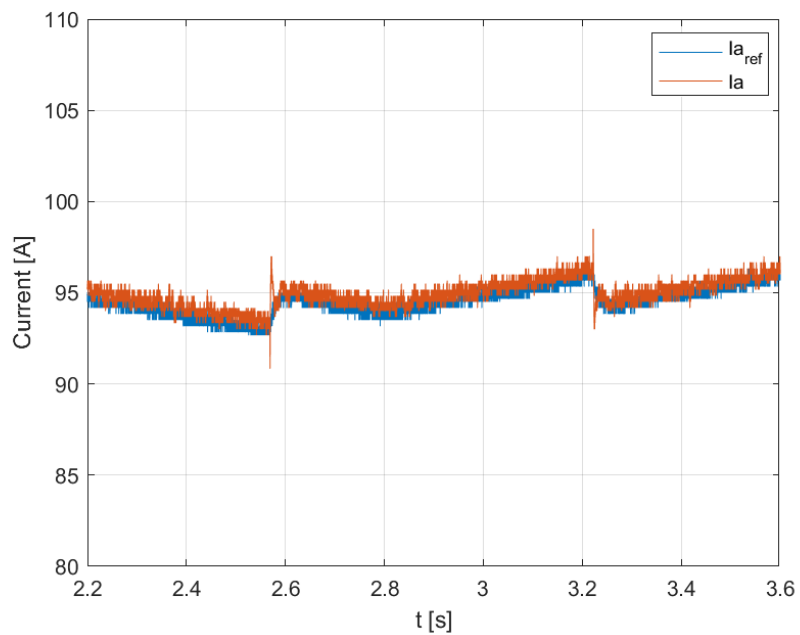
Jak można zauważyć na oscylogramach, działanie regulatora i systemu jest bardzo zbliżone do odpowiedzi symulacyjnej. Porównując rysunki 4-22 i 4-23 z rysunkami 4-32 i 4-33, można stwierdzić, że odpowiedź prądów indukcyjności jest identyczna podczas przejść buck – transition – boost. Zakłócenia w napięciach wejściowych i wyjściowych spowodowane zmianą trybu są funkcjonalnie nieistotne. Można to zaobserwować, porównując odpowiedzi napięciowe w całym cyklu konwersji z rysunków 4-24 i 4-34, reakcję na początkowy skok mocy z rysunków 4-25 i 4-35 oraz przebieg napięć w strefie przejściowej z rysunkami 4-26 i 4-34. Zgodność w strefie przejściowej jest widoczna również między przebiegami z rysunków 4-19 i 4-29 (w szczegółach między rysunkami 4-21 i 4-31). Natomiast odpowiedź prądu średniego dławika na skok wartości zadanej zachowuje się zgodnie między rysunkami 4-18 i 4-30.



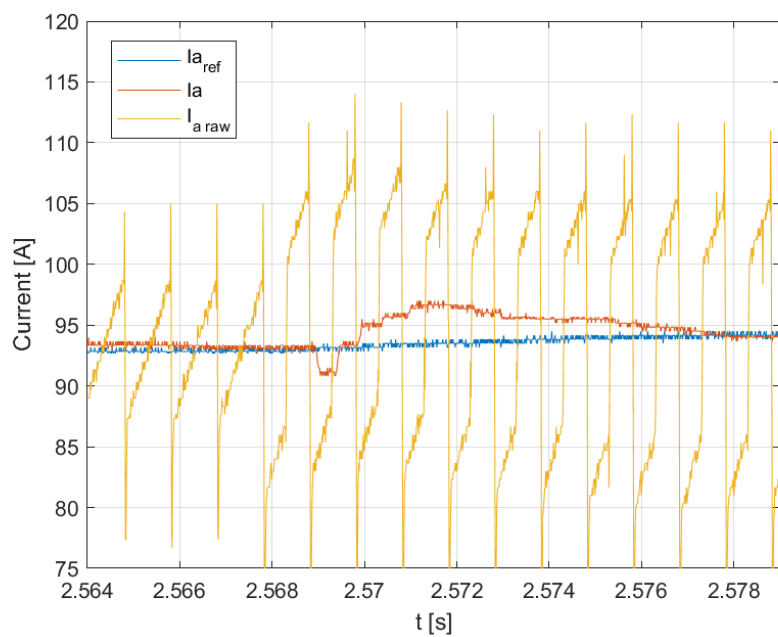
Rysunek 4-29 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący kontrolę prądu dtawika (I_{aref} – wartość zadana; I_{α} - wartość średnia krocząca).



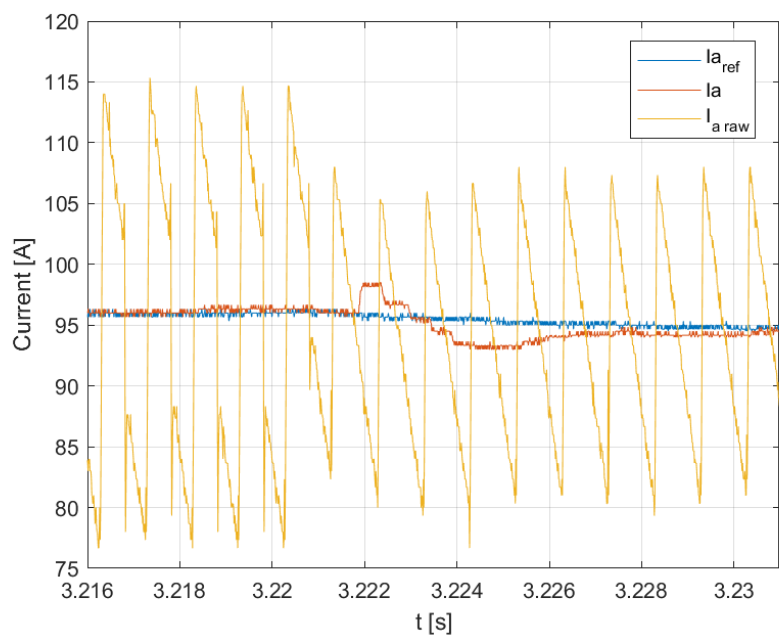
Rysunek 4-30 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący kontrolę prądu dtawika (I_{aref} – wartość zadana; I_{α} - wartość średnia krocząca) – szczegóły odpowiedzi skokowej.



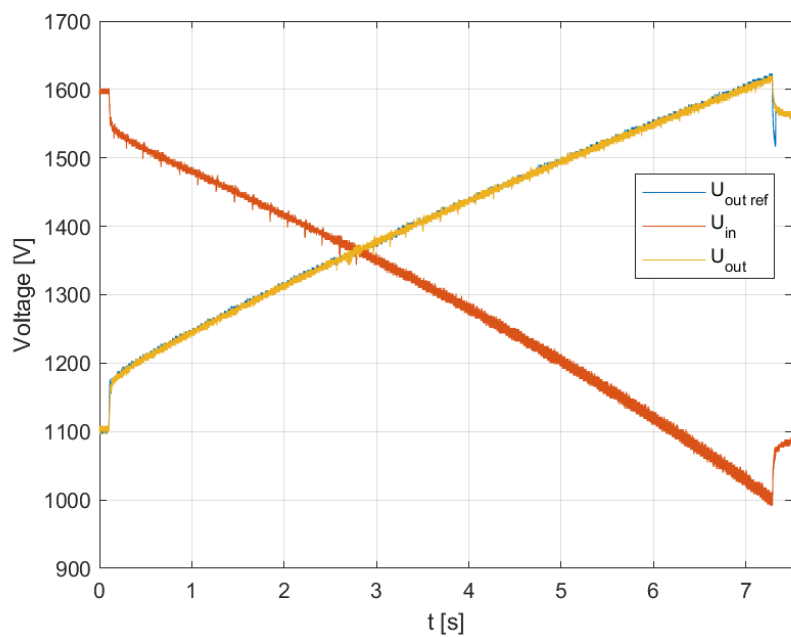
Rysunek 4-31 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący kontrolę prądu dławika (I_{a_ref} – wartość zadana; I_a - wartość średnia krocząca) – szczegóły obszaru tranzycji.



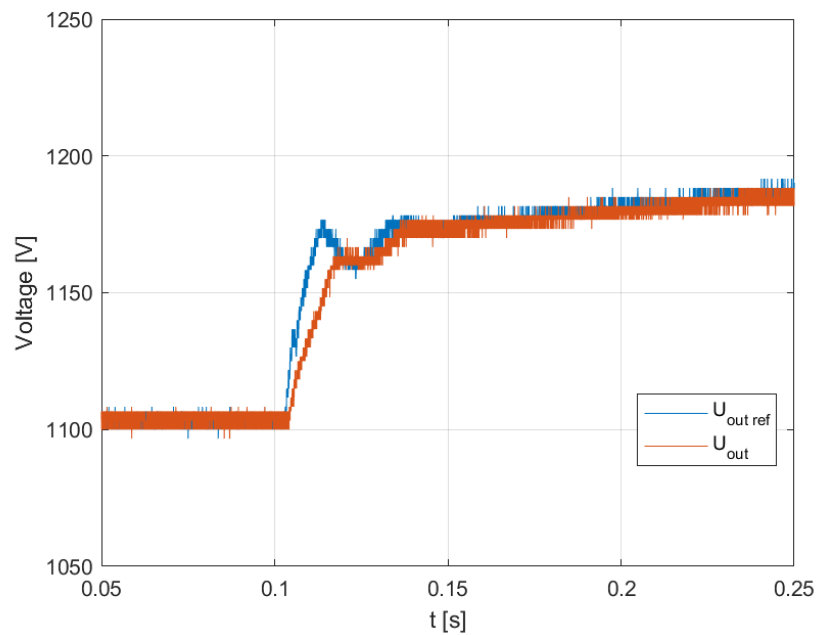
Rysunek 4-32 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący wartości chwilowe i średnie prądów dławika podczas tranzycji buck do buck-transition (I_{L_ref} - prąd zadany, I_{L_avg} - prąd średni, I_a - prąd średni fazy, I_{a_raw} - prąd chwilowy).



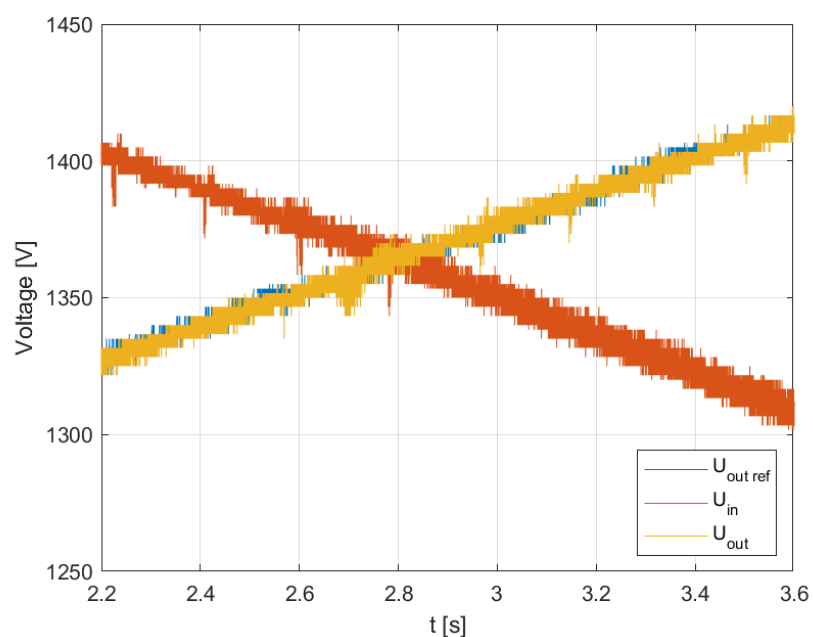
Rysunek 4-33 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący wartości chwilowe i średnie prądów dławika podczas tranzycji boost-transition do boost (I_{Lref} - prąd zadany, I_{Lavg} - prąd średni, I_a - prąd średni fazy, I_{a_raw} - prąd chwilowy).



Rysunek 4-34 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący napięcia wejściowe i wyjściowe (U_{outRef} - zadane napięcie wyjściowe, U_{in} - napięcie wejściowe, U_{out} - napięcie wyjściowe).



Rysunek 4-35 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący napięcia wejściowe i wyjściowe (U_{outRef} – zadane napięcie wyjściowe, U_{in} – napięcie wejściowe, U_{out} – napięcie wyjściowe) – szczegóły odpowiedzi skokowej.



Rysunek 4-36 Import danych pomiarowych z kontrolera / oscyloskopu pokazujący napięcia wejściowe i wyjściowe (U_{outRef} – zadane napięcie wyjściowe, U_{in} – napięcie wejściowe, U_{out} – napięcie wyjściowe) – szczegóły w obszarze tranzycji.



Rysunek 4-37 Stanowisko testowe rzeczywistego układu konwertera FSBB z dwoma magazynami superkondensatorowymi (źródło: archiwum własne za zgodą podmiotu zatrudniającego).

4.1.5. Podsumowanie

Opracowana metoda sterowania FSBB umożliwia pełny dwukierunkowy transfer energii w szerokim zakresie napięć i prądów, przy zachowaniu zwartej i stosunkowo prostej struktury układu. Zaprezentowane algorytmy zapewniają poprawne działanie zarówno w trybie buck, boost, jak i w strefie przejściowej, niezależnie od trybu przewodzenia. Uzyskane wyniki dowodzą, że rozwiązanie to może być skutecznie stosowane w aplikacjach dużej mocy, w tym w systemach magazynowania energii dla transportu elektrycznego i trakcji.

Warto podkreślić, że konwerter czteroprzełącznikowy buck–boost stanowi kluczowy element w systemach zasilania typu DC/DC. Jego dwukierunkowość oraz zdolność pracy w szerokim zakresie warunków napięciowych czynią go podstawowym modułem umożliwiającym efektywną integrację magazynów energii z siecią trakcyjną oraz innymi systemami elektroenergetycznymi. Opisane w rozdziale algorytmy feed-forward pozwalają na kształtowanie charakterystyki prądowo napięciowej konwertera w modelowanym systemie.

Autor niniejszej dysertacji brał aktywny udział w projektowaniu, implementacji i rozwoju tego typu urządzeń. Część wdrożeniowa pracy związana jest bezpośrednio z uruchomieniem konwertera FSBB oraz całego systemu magazynowania energii w warunkach rzeczywistych – na obiekcie komercyjnym [60]. Dzięki temu możliwe było zweryfikowanie poprawności opracowanych algorytmów sterowania, jak również potwierdzenie ich przydatności praktycznej w zastosowaniach przemysłowych i trakcyjnych.

5. Modelowanie systemu trakcji DC z magazynami energii

Modelowanie systemów trakcyjnych prądu stałego jest zagadnieniem złożonym ze względu na nieliniowy i dynamiczny charakter układu. Obecność wielu pojazdów o zmiennych profilach ruchowych (przyspieszanie, jazda ze stałą prędkością, hamowanie rekuperacyjne) powoduje, że konfiguracja obwodu elektrycznego sieci trakcyjnej zmienia się w czasie, co wymaga zastosowania odpowiednich metod analizy rozptyłu mocy.

W literaturze opisano szereg podejść obliczeniowych, od klasycznych metod iteracyjnych Gaussa–Seidla czy Newtona–Raphsona, po bardziej wyspecjalizowane metody wstrzyknięcia prądów (Current Injection Methods), przystosowane do nieliniowych i niesymetrycznych warunków pracy sieci trakcyjnych. Przykładowo w [15] przedstawiono model integrujący ruch wielu pojazdów z modelem elektrycznym podstacji i torów, uwzględniający również proces rekuperacji i ograniczenia przepustowości sieci. Walidacja pokazała, że interakcje między pojazdami – szczególnie wzajemne zasilanie w trakcie hamowania i rozruchu – mają istotny wpływ na bilanse energetyczne. Wskazano również, że przy małej gęstości ruchu znaczna część energii rekuperacyjnej jest tracona w rezystorach, co uzasadnia potrzebę wprowadzania zasobników energii przytorowych.

Kolejnym krokiem rozwoju modeli trakcyjnych było uwzględnienie magazynów energii, zarówno pokładowych, jak i przytorowych. W [16] zaproponowano zdekomponowany model pociągu z hybrydowym zasobnikiem energii (bateria i superkondensator), w którym zachowanie układu trakcyjnego i zasobnika opisano oddzielnie, a następnie powiązano na poziomie punktu przyłączenia do sieci. Takie podejście pozwoliło na uproszczenie obliczeń i skrócenie czasu symulacji przy zachowaniu wysokiej dokładności. Zastosowany solver przepływu mocy bazował na zmodyfikowanej metodzie wstrzyknięcia prądów, zdolnej do obsługi podstacji nierozpraszcających energii zwrotnej (najczęściej spotykanych w rzeczywistych sieciach DC).

Wspomniane prace jednoznacznie podkreślają znaczenie magazynowania energii w poprawie efektywności systemów trakcyjnych. Z jednej strony – modele wielopojazdowe pokazują ograniczoną receptywność klasycznych sieci, a z drugiej – modele z zasobnikami wskazują na możliwość obniżenia strat rekuperacyjnych, stabilizację napięcia i zmniejszenie zapotrzebowania mocy szczytowej z podstacji.

Na bazie tych doświadczeń niniejsza rozprawa rozwija autorskie modele łączące:

- ruch pojazdów trakcyjnych,
- modelowanie obwodowe sieci zasilającej metodą węzłową,
- integrację przytorowych zasobników energii poprzez modele energoelektronicznych konwerterów DC/DC,
- oraz algorytmy optymalizacji pozwalające wyznaczyć najbardziej efektywną lokalizację i parametry ESS.

5.1. Model ruchu pojazdów

Model ruchu pojazdów trakcyjnych odpowiada za odwzorowanie dynamiki przejazdu wzdłuż analizowanej sekcji sieci trakcyjnej. Jego zadaniem jest dostarczenie w sposób deterministyczny informacji o przebiegu położenia, prędkości, przyspieszenia oraz mocy wymienianej z siecią. Model ten nie posiada sprzężenia zwrotnego z solverem obwodowym, tzn. nie dokonuje korekty zadanej trajektorii jazdy w zależności od chwilowych warunków napięciowych czy ograniczeń prądowych.

W praktyce oznacza to, że jeśli w trakcie obliczeń okaże się, iż dla zadanych parametrów przejazd nie jest możliwy (np. z powodu spadku napięcia poniżej wartości krytycznej lub przekroczenia prądu granicznego), to dany scenariusz uznaje się za niewykonalny. Wówczas konieczne jest zastosowanie działań korygujących na poziomie modułu optymalizacyjnego – takich jak zmiana parametrów ruchowych (prędkości, przyspieszeń), dodanie lub przemieszczenie zasobników energii, bądź korekta nastaw podstacji. Celem całego procesu jest wyznaczenie takiej konfiguracji systemu, która umożliwi realizację przejazdu przy zachowaniu zadanych ograniczeń.

5.1.1. Założenia modelu

Wprowadzono następujące założenia modelu:

- ruch pojazdu odbywa się wzdłuż jednoznacznie zdefiniowanej trasy (sekcji toru),
- dynamika ruchu obliczana jest na podstawie równań bilansu sił z uwzględnieniem oporów ruchu,
- parametry pojazdu (masa, opory, sprawności) są stałe dla danej symulacji,
- trajektoria ruchu jest z góry określona parametrami wejściowymi i nie ulega modyfikacjom w trakcie obliczeń,
- model sygnalizuje jedynie spełnienie bądź niespełnienie kryteriów pracy (napięcie, prąd), bez dokonywania korekty profilu jazdy.

5.1.2. Dane wejściowe i wyjściowe modelu

Model ruchu korzysta z danych wejściowych [3]:

- infrastrukturalnych – długość sekcji, lokalizacja przystanków, profil nachylenia toru,
- pojazdowych – masa całkowita i wirująca, parametry aerodynamiczne, opór toczenia, charakterystyki trakcyjne (siła maksymalna, ograniczenia prądowe i napięciowe, sprawność napędu),
- eksploatacyjnych – prędkość maksymalna, przyspieszenia i opóźnienia dopuszczalne, prędkość początkowa, czas postoju na przystankach,
- energetycznych – wartości napięcia znamionowego w sieci i ograniczenia prądowe.

Na wyjściu model generuje następujące dane:

- wektor danych dla solvera, określający pozycję pojazdu wzdłuż sekcji,

- wektor danych dla solvera, określający chwilowe wartości mocy do przekształcenia w prądy węzłowe,
- krok symulacji.

5.1.3. Funkcja przygotowania danych dla solvera

Oprócz obliczeń dynamiki, model ruchu odpowiada za przygotowanie danych wejściowych dla solvera węzłowego. Obejmuje to m.in.:

- przypisanie (mapowanie) mocy chwilowej pojazdów do odpowiednich źródeł w węzłach,
- uwzględnienie zmieniających się położeń w czasie, tj obsługę „mijania” pojazdów i zasobników (ESS) poprzez prawidłowe powiązanie ich z odpowiednimi węzłami (węzły stałe i ruchome),
- aktywację źródeł (np. przejście z trybu poboru na tryb rekuperacji) zgodnie z parametrami pojazdu i warunkami symulacji.

Dzięki temu solver otrzymuje spójny zestaw danych dla każdego kroku obliczeniowego, a sam model ruchu pełni rolę generatora scenariuszy wejściowych, które następnie są weryfikowane pod kątem wykonalności.

5.1.3.1. Obliczenia ruchu

Ruch pojazdu opisywany jest równaniem bilansu sił [3]:

$$m \cdot a = F_{tr} - (F_r + F_a + F_g) \quad (46)$$

gdzie:

m – masa całkowita z uwzględnieniem mas wirujących,

a – przyspieszenie,

F_{tr} – siła trakcyjna wynikająca z charakterystyki napędu i ograniczeń,

F_r – opór toczenia, proporcjonalny do masy i nacisku na tor,

F_a – opór aerodynamiczny $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_d \cdot v^2$,

ρ – gęstość powietrza,

c_d – współczynnik aerodynamiczny,

v – prędkość,

F_g – siła wynikająca z nachylenia toru $m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$,

g – przyspieszenie ziemskie,

α – kąt nachylenia toru.

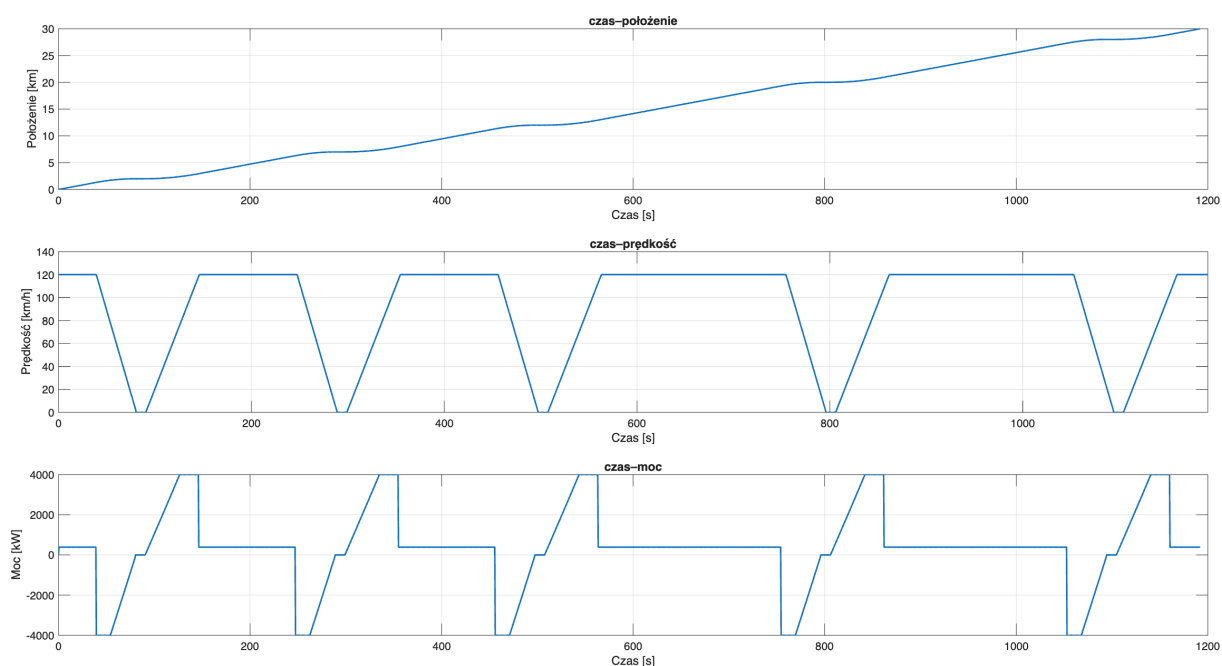
Moc wymieniana z siecią obliczana jest jako:

$$P = F_{tr} \cdot v \cdot \eta \quad (47)$$

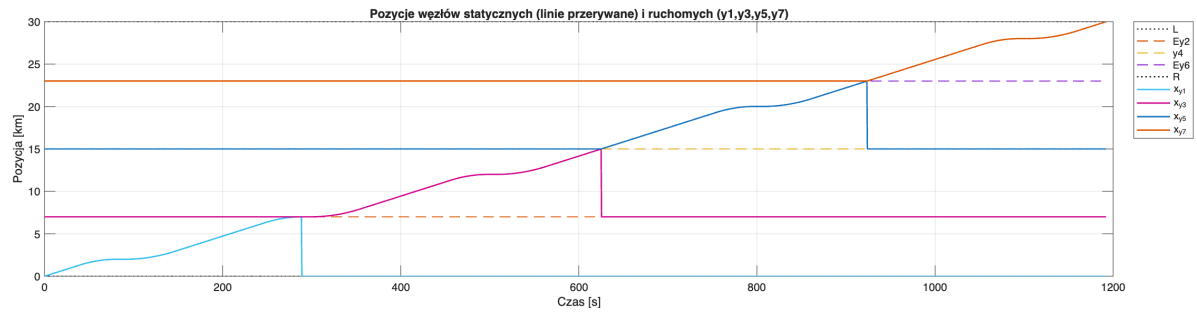
gdzie v – to prędkość chwilowa, a η – sprawność układu napędowego.

5.1.4. Implementacja i walidacja modelu

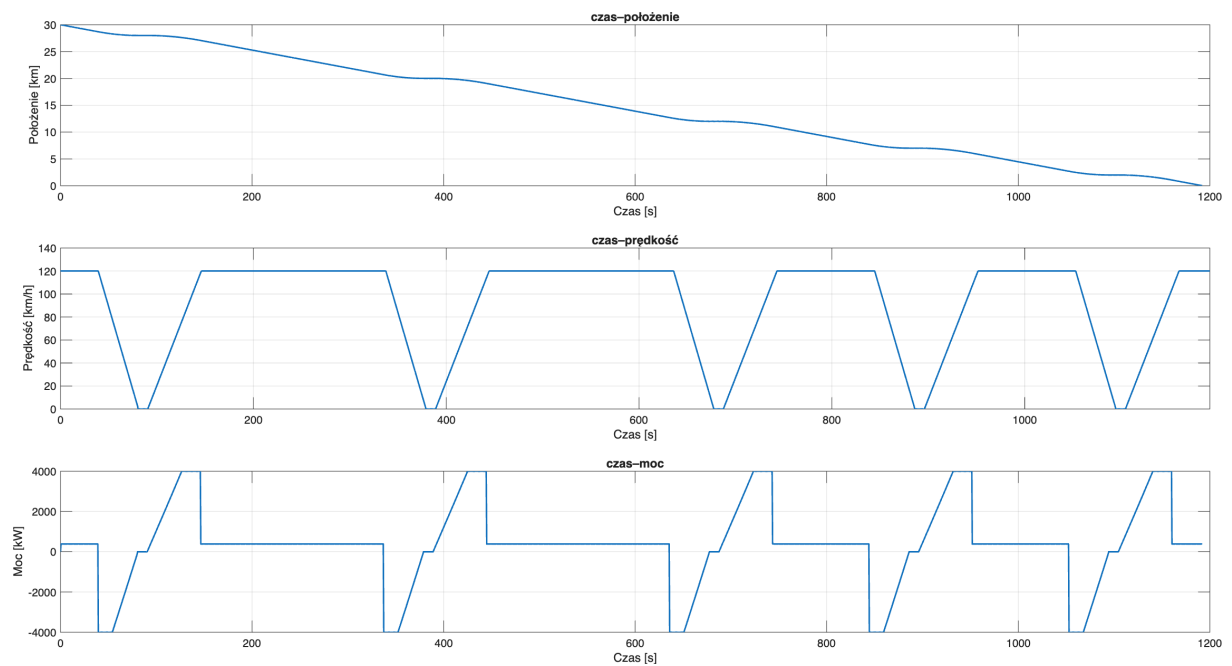
Implementacja modelu zrealizowana jest w środowisku MATLAB w oparciu o dwa kluczowe skrypty *plan_vehicle.m* oraz *map_vehicle.m*. Wynik działania pierwszego ze skryptów przedstawiony jest na rysunkach 5-1 oraz 5-3 jako przykład planowania trasy pojazdu odpowiednio w kierunku linii A oraz linii B. Ze względu na konieczność powiązania pojazdów z odpowiednimi ruchomymi węzłami obwodu opisanego w rozdziale 5.1, wynik działania drugiego skryptu przedstawiony jest analogicznie na rysunkach 5-2 oraz 5-4.



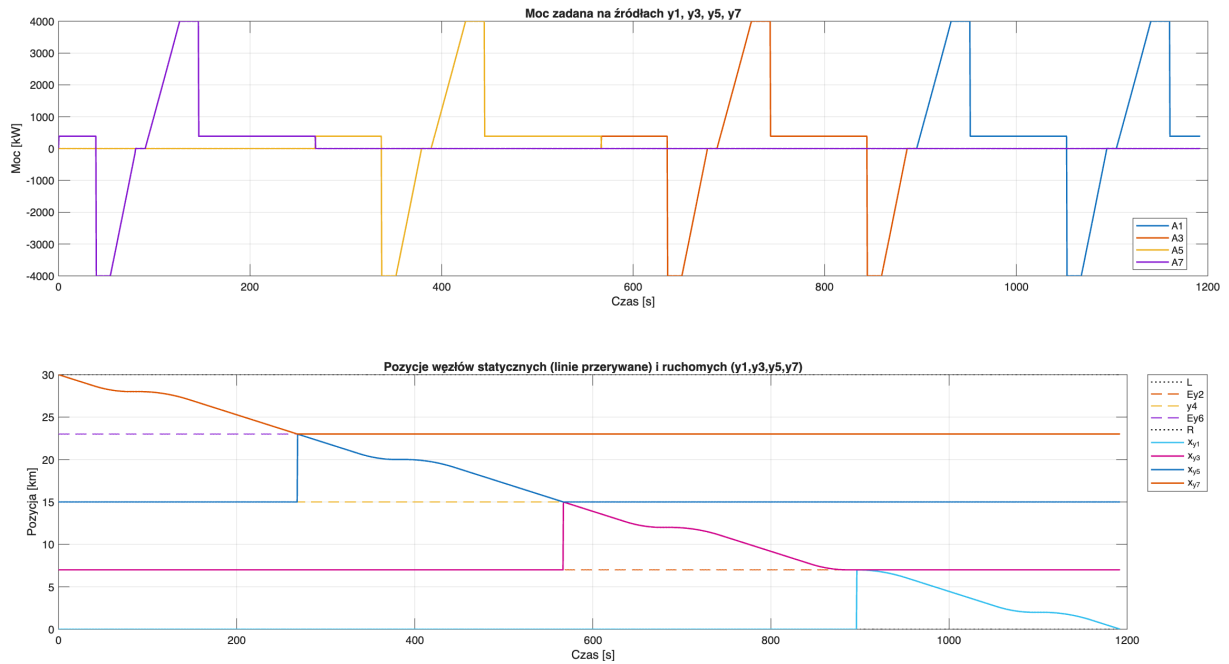
Rysunek 5-1 Przykład wyniku planowania ruchu pojazdu w kierunku A ze zdefiniowanymi przystankami



Rysunek 5-2 Przykład wyniku mapowania źródeł w ruchomych węzłach dla ruchu pojazdu w kierunku A



Rysunek 5-3 Przykład wyniku planowania ruch pojazdu w kierunku B ze zdefiniowanymi przystankami



Rysunek 5-4 Przykład wyniku mapowania źródeł w ruchomych węzłach dla ruchu pojazdu w kierunku B

Jako dane wejściowe funkcja przyjmuje `plan = plan_vehicle(veh, stops, dt, delay)` strukturę parametrów zdefiniowaną w następujący sposób:

Argument `veh` definiuje parametry pojazdu (w nawiasie przedstawiono domyślną wartość i jednostkę przyjętą w analizach), i.e.:

- v_{max} - prędkość maksymalną eksploatacyjną pojazdu ($120 \frac{km}{h}$),
- a - przyspieszenie ($0,6 \frac{m}{s^2}$),
- d - opóźnienie podczas hamowania ($0,8 \frac{m}{s^2}$),
- m - masa całkowita ($250t$),
- k_{rot} - współczynnik mas wirujących do korekty masy efektywnej ($0,08$),

$$m_{eff} = (1 + k_{rot}) \cdot m$$
- $C_d \cdot A$ - iloczyn współczynnika aerodynamicznego i powierzchni czołowej ($6m^2$),
- C_{rr} - współczynnik oporu toczenia ($0,0025$),
- ρ - gęstość powietrza ($1,225 \frac{kg}{m^3}$),
- η_{tr} - sprawność w trybie trakcyjnym ($0,92$),
- η_{rg} - sprawność w trybie rekuperacyjnym ($0,9$),
- P_{max} - moc maksymalna napędu ($4000kW$)
- P_{aux} - moc urządzeń pomocniczych,
- g - przyspieszenie ziemskie ($9,81 \frac{m}{s^2}$).

Argument `stops` definiuje parametry przystanków (w nawiasie przedstawiono domyślną wartość i jednostkę przyjętą w analizach), i.e.:

- X - wektor pozycji początku, przystanków i końca linii ([0; 2; 5; 7; 12; 20; 28; 30]km),
- H - wektor wysokości bezwzględnych dla początku, przystanków i końca linii ([0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]m),
- t_{stop} - czas postoju na przystankach (10s).

Argumenty dt oraz $delay$ definiują odpowiednio krok symulacji oraz opóźnienie rozpoczęcia ruchu, wyrażone w sekundach.

Funkcja `plan_vehicle` odpowiada za wyznaczenie trajektorii ruchu pojazdu na analizowanej linii. Algorytm działa według następujących zasad:

- **Start ruchu:**

Pojazd wjeżdża na linię z prędkością maksymalną określoną w parametrach. Jeżeli jednak, biorąc pod uwagę położenie pierwszego przystanku oraz ograniczenia wynikające z maksymalnego dopuszczalnego opóźnienia, zatrzymanie w tym punkcie byłoby nieosiągalne, prędkość początkowa zostaje wstecznie obliczona w taki sposób, aby umożliwić prawidłowe zatrzymanie.

- **Ruch między przystankami:**

Na każdym odcinku pomiędzy kolejnymi przystankami pojazd dąży do osiągnięcia prędkości maksymalnej. Przy tym uwzględniana jest dostępna długość odcinka oraz ograniczenia wynikające z przyspieszenia i opóźnienia. W efekcie prędkość chwilowa zależy od dynamiki przyspieszania, hamowania oraz dostępnej przestrzeni ruchu.

- **Postoje:**

Po osiągnięciu przystanku pojazd zatrzymuje się i realizuje postój przez czas zadany w parametrach wejściowych.

- **Wyjazd z linii:**

Po obsłużeniu ostatniego przystanku pojazd przyspiesza do prędkości maksymalnej (o ile pozwala na to pozostała długość odcinka) i opuszcza linię z prędkością wynikającą z odległości ostatniego przystanku do końca toru.

- **Wynik działania:**

W rezultacie generowany jest dyskretny (próbkowany) wektor położenia pojazdu w funkcji czasu oraz odpowiadający mu wektor chwilowych mocy. Dane te stanowią podstawę do dalszej analizy bilansu mocy i interakcji z systemem zasilania trakcyjnego.

Na podstawie wyznaczonej charakterystyki ruchu, obejmującej profil prędkości, przyspieszeń, opóźnień oraz nachylenia toru (wzniosu), generowany jest dyskretny (próbkowany) wektor chwilowego zapotrzebowania na moc. Obliczenia te uwzględniają zarówno siły oporu ruchu (aerodynamiczne, toczne i wynikające z masy pojazdu), jak i

ograniczenia mocy maksymalnej układu napędowego. Otrzymany wektor mocy stanowi bezpośrednio wejście do modelu obwodu zasilania trakcyjnego i pozwala analizować oddziaływanie pojazdu na system energetyczny w kolejnych chwilach czasowych.

Struktura wynikowa *plan* zawiera następujące rekordy:

- Y - wektor próbek położenia chwilowych w $[m]$,
- P - wektor próbek mocy chwilowych $[W]$.

Jako dane wejściowe funkcja przyjmuje `map = map_vehicle(plan, static_nodes)` strukturę parametrów zdefiniowaną w następujący sposób:

Argument *plan* jest wynikiem działania funkcji `plan_vehicle`.

Argument *static_nodes* jest wektorem położenia statycznych węzłów obwodów i.e. węzły ESS oraz łącznik sekcyjny.

Funkcja `map_vehicle` realizuje proces odwzorowania położenia pojazdu w topologii modelu obwodowego. Jej zadaniem jest przypisanie chwilowych wartości mocy do odpowiednich źródeł oraz mapowanie pozycji ruchomych węzłów pojazdu pomiędzy węzłami statycznymi linii.

Algorytm działa następująco:

- Określenie sekcji ruchu:

Na podstawie wektora pozycji ustalane jest, pomiędzy którymi węzłami statycznymi znajduje się pojazd w danym kroku czasowym.

- Mapowanie węzłów ruchomych:

Wyznaczone zostają węzły odpowiadające aktualnej pozycji pojazdu. Funkcja dokonuje ich podmiany w strukturze modelu na właściwy fragment pomiędzy sąsiadującymi węzłami statycznymi.

- Przypisanie mocy do źródeł:

Moc wynikająca z planowania ruchu (trajektorii prędkości i zapotrzebowania energetycznego) zostaje przypisana do odpowiadającego pojazdowi źródła, zgodnie z jego aktualnym położeniem na linii.

Struktura wynikowa *map* zawiera następujące rekordy:

- Y_y - tablica wektorów próbek położenia chwilowych mapowana dla węzłów $y = \{Y_1, \dots, Y_7\}$ w $[m]$,
- P_y - tablica wektorów próbek mocy chwilowych mapowana dla węzłów $y = \{Y_1, \dots, Y_7\}$ w $[m]$,

5.2. Model węzłowy systemu trakcyjnego

Modelowanie oddziaływania pojazdu trakcyjnego z siecią zasilania prądu stałego wymaga odwzorowania kluczowych zjawisk determinujących jakość i stabilność napięciową. W literaturze stosowane są klasyczne podejścia obwodowe, w których sieć odwzorowuje się przy użyciu elementów impedancyjnych. Rozwiązania tego typu pozwalają na uzyskanie wysokiej dokładności odwzorowania procesów fizycznych, jednak ich złożoność obliczeniowa znacząco utrudnia analizę wielowariantową oraz integrację z algorytmami optymalizacyjnymi [8].

W niniejszym opracowaniu przyjęto zatem podejście uproszczone, w którym sieć trakcyjna opisywana jest jako rezystancyjny układ wieloźródłowy analizowany w stanach ustalonych. Zastosowanie tego modelu umożliwi zachowanie najistotniejszych zjawisk eksploatacyjnych, takich jak spadki napięć wzdłuż linii, ograniczenia prądowe poszczególnych elementów czy asymetria zasilania. Jednocześnie obliczenia stają się znacznie prostsze, co pozwala na efektywne wykorzystanie modelu w procesach optymalizacyjnych [15], [79].

5.2.1. Założenia modelu

Topologia systemu

Na potrzeby opracowania przyjęto jako reprezentatywną topologię linii dwustronnie zasilanej, wyposażonej w łącznik sekcyjny pomiędzy liniami. Rozwiązanie to jest powszechnie spotykane m. in. w infrastrukturze kolejowej, m.in. w Polsce (PKP) oraz we Włoszech (RFI) [3].

W modelu zakłada się:

- obecność dwóch skrajnych zasilaczy: lewego i prawego,
- istnienie dwóch równoległych linii trakcyjnych: pierwszej dla ruchu w kierunku lewo–prawy oraz drugiej dla ruchu w kierunku prawo–lewy,
- węzły wewnętrzne, numerowane od lewej do prawej, odpowiadające kolejnym pozycjom wzdłuż sekcji,
- rezystancje poszczególnych segmentów pomiędzy węzłami,
- łącznik poprzeczny, umożliwiający sprzężenie wybranych węzłów obu linii,
- urządzenia (pojazdy trakcyjne, zasobniki energii, elementy hamujące) odwzorowane jako źródła prądowe względem wspólnego węzła odniesienia.

Przyjęto, że w modelu nie uwzględnia się stanów zdegenerowanych, takich jak całkowite odłączenie jednego z elementów systemu (np. wyłączenie podstacji wskutek awarii).

5.2.2. Dane wejściowe i wyjściowe modelu

Dane wejściowe modelu obejmują zarówno parametry infrastruktury, jak i charakterystyki pojazdów trakcyjnych oraz warunki ruchu. Uwzględniono w szczególności:

- długość analizowanej sekcji trakcyjnej, określającą rozmiar rozpatrywanego układu,
- parametry ruchu pojazdów, takie jak prędkość maksymalna, przyspieszenie oraz opóźnienie eksploatacyjne,
- rozkład przystanków – ich liczbę, lokalizację oraz czas postoju, co pozwala na odwzorowanie rzeczywistego profilu jazdy,
- prędkość wjazdową na sekcję, determinującą warunki początkowe symulacji,
- parametry elektryczne sieci, obejmujące napięcia znamionowe podstacji oraz rezystancje linii trakcyjnych i podstacyjnych,
- profil nachylenia toru, wpływający na zapotrzebowanie mocy pojazdu,
- parametry pojazdu trakcyjnego, obejmujące:
 - masę całkowitą i masę wirującą,
 - parametry aerodynamiczne oraz opór toczenia,
 - zużycie mocy na potrzeby układów pomocniczych,
 - sprawności układu napędowego,
 - ograniczenia prądowe i napięciowe wynikające z charakterystyki układu zasilania oraz zabezpieczeń.

Symulacja prowadzona jest w krokach czasowych lub przestrzennych, w zależności od przyjętej metodyki analizy. W każdej próbkę obliczeniowej rozwiązywany jest stan ustalony równoważnego układu rezystancyjnego, z uwzględnieniem wszystkich przyjętych ograniczeń.

Na wyjściu modelu uzyskuje się zestaw wielkości opisujących zarówno ruch pojazdów, jak i warunki pracy układu zasilania. Dane te pozwalają na ocenę jakości zasilania, bilansów energetycznych oraz efektywności zastosowanych algorytmów optymalizacyjnych. W szczególności obejmują one:

- próbki kinematyki ruchu – położenie pojazdów, ich prędkość chwilową oraz odpowiadający im czas symulacji,
- przebiegi napięcia na pojeździe – wartości chwilowe napięcia w węźle przyłączenia pojazdu, obrazujące jakość zasilania i wpływ warunków sieciowych,
- przebiegi prądu wymienianego z siecią – informację o poborze bądź zwrocie energii przez pojazdy trakcyjne,
- przebiegi mocy żądanej i rzeczywistej – umożliwiające ocenę zgodności między zapotrzebowaniem pojazdu a warunkami sieci,
- prądy dostarczane przez poszczególne podstacje – pozwalające określić obciążenie stacji zasilających i sprawdzić warunki asymetrii zasilania,
- bilans energii – obejmujący energię pobraną z sieci, oddaną w procesie rekuperacji oraz wytraconą w rezystorach hamowania i innych elementach stratnych,
- sygnalizację ograniczeń oraz stanów pracy podstacji – wskazującą na aktywację zabezpieczeń, występowanie przeciążeń czy odłączenie elementów w wyniku przekroczenia progów napięciowych lub prądowych.

Tak zdefiniowany zestaw danych wyjściowych pozwala na ocenę efektywności pracy systemu trakcyjnego w zadanych warunkach ruchowych i stanowi podstawę do dalszych analiz optymalizacyjnych.

5.2.3. Elementy modelu węzłowego systemu trakcyjnego

Model obwodowy systemu trakcyjnego pozwala określić współzależności systemu tj. modele pojazdów, zasobników, podstacji połączonych ze sobą przez skupione elementy rezystancyjne.

W modelu wyróżnić można:

A. Model zasilacza podstacyjnego

Zasilacz podstacyjny odwzorowano jako źródło Nortonowskie, składające się z prądowego źródła sterowanego oraz równoległej przewodności. Parametry tego elementu definiują:

$$I_x = E_x \cdot g_x \quad (48)$$

gdzie:

- E_x jest zadany napięciem podstacji,
- g_x jest przyjętą przewodnością podstacji,
- x jest oznaczeniem węzła, do którego podłączony jest zasilacz (skrajnie lewy lub skrajnie prawy).

Model zasilacza jest jednokierunkowy – element może zasilać sieć, lecz nie może przyjmować energii zwrotnej. W sytuacji, gdy napięcie w węźle przyłączenia przekracza wartość napięcia Thevenina, solver wymusza odłączenie danego źródła od układu

$$I_x = 0 \text{ A} \quad (49)$$

$$g_x = 1 \mu\text{S} \quad (50)$$

B. Model pojazdu trakcyjnego

Pojazd trakcyjny modelowany jest jako idealne, sterowane źródło prądowe reprezentujące zużycie energii na potrzeby napędu oraz układów pomocniczych. Moc pojazdu wyznacza niezależny model ruchu i przekazuje ją do solvera jako wektor danych wejściowych. Ponieważ wartości prądów zależą od napięć w węzłach, model pojazdu ma charakter nieliniowy i jego rozwiązanie wymaga podejścia iteracyjnego

$$I_y = P_{y,ref} / U_y \quad (51)$$

Niezależnie odwzorowany jest hamulec elektrodynamiczny, opisany jako dodatkowe źródło Nortonowskie, którego działanie aktywuje się po przekroczeniu określonego progu napięciowego. W ten sposób model rozróżnia fazę poboru energii od fazy rekuperacji

$$I_{y,dump} = E_{y,dump} \cdot g_{y,dump} \quad (52)$$

- $P_{y,ref}$ jest zadaną mocą elektryczną,
- U_y jest szukanym napięciem w węźle,

- $E_{y,dump}$ jest zadaniem napięciem załączenia hamulca elektrodynamicznego,
- $g_{y,dump}$ jest przyjętą przewodnością hamulca elektrodynamicznego,
- y jest oznaczeniem węzła, przyjęto $A, 1$ dla pierwszego węzła w linii $A, B, 1$ dla pierwszego węzła w linii B .

C. Model stacjonarnego zasobnika energii

Stacjonarny zasobnik energii (ESS, ang. Energy Storage System) odwzorowano za pomocą dwóch równoległych źródeł Nortonowskich:

- pierwszego, odpowiadającego za tryb ładowania w przypadku nadwyżki energii (np. rekuperacja hamujących pojazdów)

$$I_{y,chg} = E_{y,chg} \cdot g_{y,chg} \quad (53)$$

- drugiego, reprezentującego tryb wspomagania w sytuacji obciążenia sieci i spadku napięcia.

$$I_{y,supp} = E_{y,supp} \cdot g_{y,supp} \quad (54)$$

Charakterystyka prądowo-napięciowa ESS definiowana jest poprzez progi załączenia oraz odpowiednie przewodności. Parametry te mają kluczowe znaczenie w procesie optymalizacji systemu – umożliwiają w pierwszej kolejności przepływ mocy pomiędzy pojazdami, następnie magazynowanie nadwyżek w ESS, a dopiero w ostateczności rozpraszanie energii w hamulcach rezystorowych.

- $E_{y,chg}$ oraz $E_{y,supp}$ są zadanymi napięciami progu załączenia ładowania oraz wspomagania,
- $g_{y,chg}$ oraz $g_{y,supp}$ są przyjętymi przewodnościami definiującymi charakterystykę prądowo-napięciową zasobnika,
- y jest oznaczeniem węzła.

D. Elementy obwodowe

Połączenia pomiędzy węzłami odwzorowano jako rezystancje, zależne od odległości oraz rezystywności przewodów. Położenia podstacji i zasobników są stałe, natomiast pozycje pojazdów zmieniają się w czasie, zgodnie z niezależnym modelem ruchu. Wartości rezystancji pomiędzy kolejnymi węzłami są dynamicznie aktualizowane w zależności od aktualnego położenia pojazdów

$$R_{b,a} = (x_b - x_a) \cdot R_{pk} \quad (55)$$

- x_a oraz x_b są zadanymi położeniami sąsiadujących węzłów,
- R_{pk} jest przyjętą rezystancją linii na jednostkę długości.

5.2.4. Metoda rozwiązywania modelu

Metoda węzłowa i budowa macierzy przewodności

Do rozwiązywania układu zastosowano metodę równań węzłowych, która pozwala na wyznaczenie napięć w poszczególnych węzłach sieci trakcyjnej. Każdy element obwodu: podstacja, pojazd, zasobnik energii, hamulec elektrodynamiczny oraz elementy liniowe, reprezentowany jest przez równoważny model w postaci źródła prądowego i/lub przewodności [12].

Podstawowym równaniem metody węzłowej jest:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I} \quad (56)$$

gdzie:

- \mathbf{G} jest macierzą przewodności sieci,
- \mathbf{U} jest wektorem niewiadomych napięć węzłowych,
- \mathbf{I} jest wektorem źródeł prądowych zasilających węzły.

Macierz przewodności \mathbf{G} powstaje przez sumowanie przewodności gałęzi przyłączonych do danego węzła oraz wprowadzanie ujemnych wartości przewodności pomiędzy węzłami sąsiednimi.

Dla każdego węzła k :

$$\sum_k g_{km}(U_k - U_m) + I_k = 0 \quad (57)$$

gdzie:

- g_{km} jest przewodnością między węzłami k i m ,
- I_k jest prądem źródłowym wpływającym do węzła k .

Iteracyjne wyznaczanie prądów z mocy zadanych

W przypadku pojazdów trakcyjnych oraz zasobników energii źródła prądowe są sterowane zadanymi wartościami mocy. Oznacza to, że w solverze należy każdorazowo przeliczyć wartość prądu na podstawie zależności:

$$I = -\frac{P}{U} \quad (58)$$

gdzie:

- P – moc zadana,
- U – napięcie w węźle przyłączenia pojazdu,
- I – odpowiadający prąd źródła Nortonowskiego.

Zależność ta wprowadza nieliniowość do układu równań, ponieważ wektor prądów \mathbf{I} jest funkcją wektora napięć \mathbf{U} , który sam jest dopiero wyznaczany z równań węzłowych:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}(\mathbf{U}) \quad (59)$$

Nieliniowość wynika z odwrotnej zależności między prądem a napięciem, warunkowego działania elementów (ESS, chopper), oraz sprzężenia zwrotnego – wzrost prądu powoduje spadek napięcia, co z kolei wpływa na kolejną zmianę prądu. Dzięki zastosowaniu procedury iteracyjnej uzyskuje się stabilne rozwiązanie równowagi.

W literaturze przedmiotu opisywane są inne, bardziej zaawansowane metody rozwiązywania nieliniowych układów obwodowych, takie jak metody Newtona–Raphsona, techniki hybrydowe czy algorytmy optymalizacyjne wspomagane relaksacją. Charakteryzują się one większą złożonością obliczeniową, ale często szybszą zbieżnością. W ramach niniejszego opracowania przyjęto jednak prostą metodę iteracyjną Gaussa-Seidela, która – mimo swojej ograniczonej formalnie dokładności – okazała się wystarczająca zarówno pod względem stabilności, jak i szybkości obliczeń w rozpatrywanych scenariuszach [11].

Algorytm iteracyjny metodą Gaussa-Seidela przebiega następująco:

1. Inicjalizacja – przyjęcie początkowego przybliżenia napięć, np. wartości znamionowej dla wszystkich węzłów.
2. Obliczenie prądów – wyznaczenie wektora $\mathbf{I}^{(k)}$ na podstawie zadanych mocy \mathbf{P}_{ref} i bieżących napięć $\mathbf{U}^{(k)}$. Gdzie k jest kolejnym powtórzeniem pętli algorytmu.
3. Rozwiązanie układu węzłowego – obliczenie nowych napięć $\mathbf{U}^{(k+1)}$ z równania macierzowego.

$$\mathbf{U}^{(k+1)} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{I}^{(k)} \quad (60)$$

4. Sprawdzenie zbieżności – porównanie wartości napięć i mocy w kolejnych iteracjach:

$$\max_i \left| U_i^{(k+1)} - U_i^{(k)} \right| < \varepsilon \quad (61)$$

$$\max_i \left| P_i^{(k+1)} - P_{i,ref} \right| < \varepsilon \quad (62)$$

gdzie ε jest przyjętą tolerancją numeryczną.

5. Aktualizacja – jeżeli warunek (60) i (61) nie są spełnione, przechodzimy ponownie do wyznaczenia kolejnego przybliżenia k wektora prądów stosując dodatkową relaksację współczynnikiem α :

$$\mathbf{I}^{(k+1)} = (1 - \alpha) \cdot \mathbf{I}^{(k)} + \alpha \cdot \frac{\mathbf{U}^{(k+1)}}{\mathbf{P}_{ref}} \quad (63)$$

6. Powtórzenie procedury algorytmu od punktu 2 z podstawieniem aktualizacji z punktu 5, aż do uzyskania zbieżności lub ograniczenia z góry maksymalnej liczby iteracji (zabezpieczenie przed nieskończoną pętlą w przypadku braku zbieżności lub wystąpienia niestabilności numerycznej).

Podsumowując, nieliniowość układu wynika z kilku czynników:

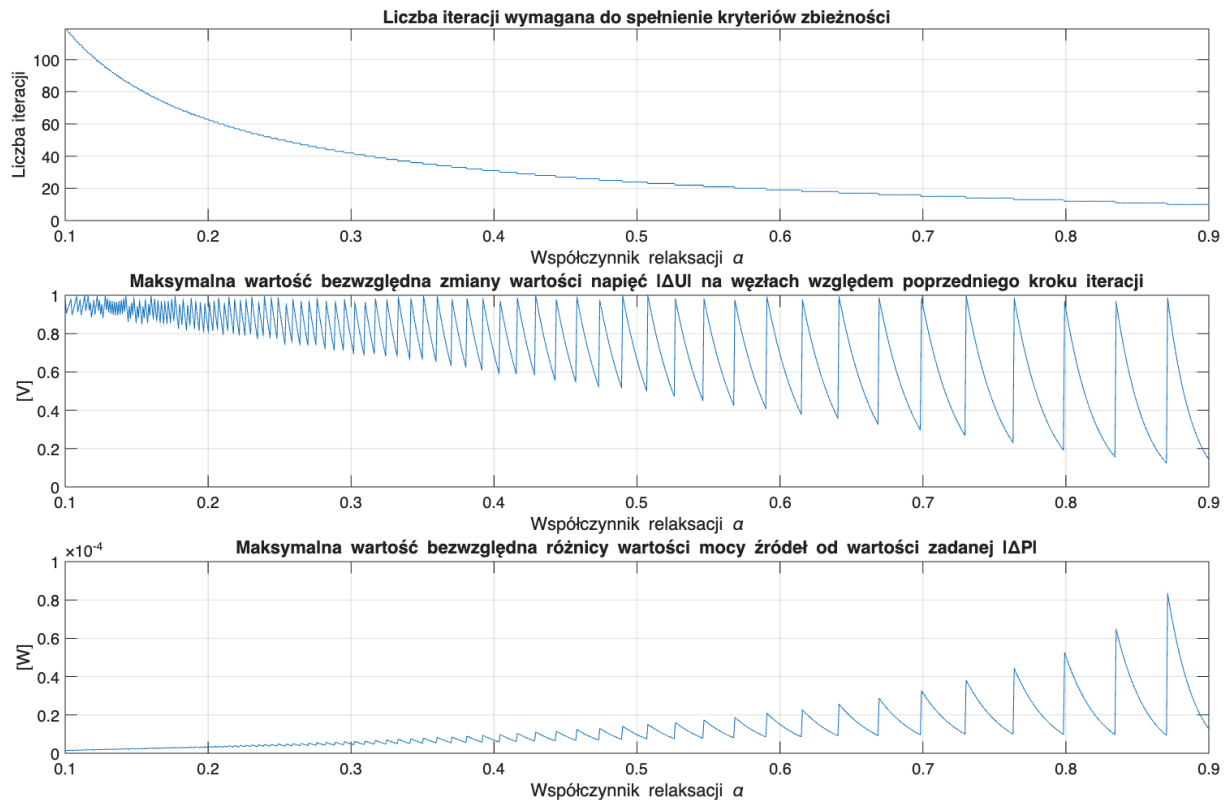
- zależności odwrotnej między prądem a napięciem – dla stałej zadanej mocy przy spadku napięcia prąd rośnie w sposób nieliniowy (hiperboliczny),
- warunkowego działania elementów (ESS, chopper), które włączają się dopiero po przekroczeniu progów napięciowych i zmieniają strukturę układu równań,
- sprzężenia zwrotnego – wzrost prądu powoduje dalszy spadek napięcia, a ten z kolei wymusza kolejną zmianę prądu.

Dzięki zastosowaniu procedury iteracyjnej uzyskuje się stabilne rozwiązanie równowagi, odzwierciedlające rzeczywiste warunki pracy sieci trakcyjnej. Wybór odpowiednich kryteriów zbieżności i ograniczeń pozwala uniknąć problemów z oscylacjami oraz zapewnia numeryczną stabilność algorytmu.

5.2.5. Implementacja i walidacja modelu

Solver został zaimplementowany w postaci funkcji skryptowej w środowisku MATLAB, co pozwoliło na pełną integrację z pozostałymi komponentami modelu, takimi jak moduł ruchu pojazdów oraz algorytmy optymalizacyjne. Struktura skryptu opiera się na implementacji opisanej powyżej metody węzłowej z dynamiczną aktualizacją macierzy przewodności i wektora źródeł prądowych w zależności od warunków pracy układu. Skrypt realizuje również procedurę iteracyjnego wyznaczania prądów na podstawie mocy zadanych, wraz z warunkowym dołączaniem elementów nieliniowych, takich jak hamulce elektrodynamiczne (choppery) oraz zasobniki energii.

Na wstępie dokonano analizy wpływu współczynnika relaksacji α (patrz rysunek 5-5) opisanego zależnością 63 na liczbę iteracji wymaganych do osiągnięcia kryterium zbieżności znalezienia rozwiązań równania 59 (tj. osiągnięcia wartości zadanej mocy na źródłach). Na jej podstawie przyjęto za satysfakcjonującą wartość współczynnika relaksacji równą 0,6 przy zachowaniu kryterium zbieżności napięć ΔU mniejszego niż $1mV$, oraz maksymalnej różnicy mocy źródeł względem wartości zadanej mniejszego niż $1W$.



Rysunek 5-5 Porównanie wpływu współczynnika relaksacji α na liczbę iteracji wymaganych do uzyskania warunków kryterium zbieżności w rozwiązaniu równania obwodowego.

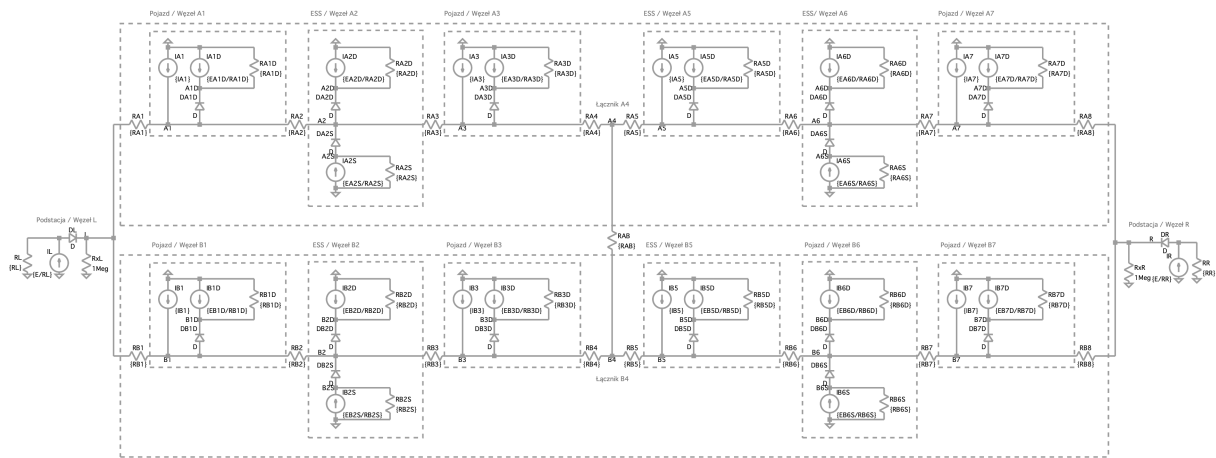
Dla niezależnego potwierdzenia poprawności implementacji przeprowadzono walidację porównawczą z modelem przygotowanym w programie LT-Spice [80], będącym powszechnie stosowanym narzędziem do analizy obwodów elektrycznych. Model walidacyjny odwzorowywał tę samą topologię układu – linię dwustronnie zasilaną z uwzględnieniem rezystancji segmentów, zasilaczy podstacyjnych oraz odbiorników reprezentujących pojazdy trakcyjne i elementy stratne [10]. Schemat połączeń elementów modelu przedstawiony jest na rysunku 5-6.

Porównanie przeprowadzono w kilku typowych scenariuszach pracy systemu (patrz tabela 5-2):

- jazda jednego pojazdu z poborem mocy – analiza spadków napięcia wzdłuż linii i obciążenia podstacji,
- jazda dwóch pojazdów w trybie rekuperacji i poboru – ocena przepływu energii pomiędzy pojazdami,
- praca z zasobnikiem energii (ESS) – sprawdzenie poprawności aktywacji progów ładowania i wspomagania,
- działanie choppera – walidacja aktywacji elementu rezystancyjnego przy przekroczeniu progu napięciowego.

Wyniki porównania wskazały satysfakcjonującą zgodność wartości napięć w węzłach oraz prądów gałęziowych pomiędzy implementacją MATLAB a symulacjami w LT-Spice (patrz tabele porównawcze od 5-3 do 5-6). Niewielkie różnice obserwowane w wartościach przejściowych wynikały z różnic w sposobie implementacji warunków

nieliniowych, tolerancji oraz procedur iteracyjnych w obu środowiskach. Uzyskane rezultaty potwierdziły, że opracowany solver MATLAB zapewnia oczekiwaną dokładność odwzorowania zjawisk dla potrzeb analiz wielowariantowych i obliczeń optymalizacyjnych [10].



Rysunek 5-6 Wizualizacja net-listy sekcji trakcyjnej opracowanej w oprogramowaniu LT-Spice [80] na potrzeby walidacji skryptu solwera napisanego w środowisku MATLAB.

Przyjęte parametry wejściowe systemu zaprezentowano w tabeli 5-1 oraz 5-2. Są to odpowiednio napięcia podstacji, parametry przewodności linii i modeli pojazdów oraz pozycje węzłów.

Tabela 5-1 Parametry wejściowe dla modelu solwera

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Napięcia jałowe podstacji	$[E_R; E_L]$	[3600; 3600]	V
Przewodności podstacji	$[g_R; g_L]$	[31,25; 31,25]	S
Rezystancja linii	R_{pk}	10	$m\Omega/km$
Napięcie aktywacji choppera	E_{dump}	3800	V
Przewodność choppera	g_{dump}	5	S
Napięcie aktywacji wspomagania	E_{supp}	3700	V
Przewodność trybu wspomagania	g_{supp}	2,5	S
Napięcie aktywacji ładowania	E_{chrg}	3500	V
Przewodność trybu ładowania	g_{chrg}	2,5	S
Pozycje węzłów podstacji	$[x_R; x_L]$	[0; 30]	km
Pozycje węzłów [A1, A2, ..., A6, A7]	$[y_{A1}; y_{A2}; y_{A3}; y_{A4}; y_{A5}; y_{A6}; y_{A7}]$	[2; 7; 10; 15; 20; 23; 28]	km
Pozycje węzłów [A1, A2, ..., A6, A7]	$[y_{B1}; y_{B2}; y_{B3}; y_{B4}; y_{B5}; y_{B6}; y_{B7}]$	[5; 10; 12; 15; 18; 20; 25]	km

Tabela 5-2 Wartości zadane dla solvera MATLAB dla różnych scenariuszy walidacyjnych

#	Moc zadana w [MW] (linia A)				Moc zadana w [MW] (linia B)				ESS (linia A)		ESS (linia B)	
	A1	A3	A5	A7	B1	B3	B5	B7	A2	A6	B2	B6
1	0	1	3	0	1	0	0	3	nie	nie	nie	nie
2	-4	0	0	0	0	0	0	3	nie	nie	nie	nie
3	-4	0	-4	0	0	1	1	0	tak	nie	nie	nie
4	0	4	0	0	-1	0	0	-1	nie	tak	tak	nie

Wyniki podsumowano w formie listingów wynikowych zwracanych przez algorytm oraz tabelarycznego porównania tabeli 5-3 do 5-6.

Widoczna jest oczekiwana zgodność obu modeli – różnice napięć węzłowych nie przekraczają wartości 1 V, co przy napięciach rzędu 3500 - 3600 V stanowi odchylenie mniejsze niż 0,03%. Niewielkie różnice wynikają z przyjętych zaokrągleń oraz różnic w sposobie modelowania rezystancji gałęziowych oraz modelowania zaworów jednokierunkowych.

Listing bilansu solvera MATLAB dla przypadku #1 (patrz wyniki w tabelach 5-2 oraz 5-3):

```
-- Nodes Voltages [V]:
A: L:3598.3 - A1:3590.4 - EA2:3570.7 - A3:3558.8 - A4:3553.1 - A5:3539.6 - EA6:3556.9 -
A7:3585.7 - R:3597.2
B: L:3598.3 - B1:3575.5 - EB2:3566.7 - B3:3563.1 - B4:3557.9 - B5:3557.3 - EB6:3556.9 -
B7:3556.0 - R:3597.2

-- Branches Currents [A]:
A: L - [394.8] -> A1 - [394.8] -> EA2 - [394.8] -> A3 - [113.8] -> A4 - [271.3] -> A5 - [-
576.3] -> EA6 - [-576.3] -> A7 - [-576.3] -> R
B: L - [456.1] -> B1 - [176.4] -> EB2 - [176.4] -> B3 - [176.4] -> B4 - [18.9] -> B5 - [18.9]
-> EB6 - [18.9] -> B7 - [-824.7] -> R
Tie: A4 - [-157.5] -> B4 (positive: A4-B4)

-- Vehicles and ESS Currents [A]:
A: A1: [0.0] - EA2: [0.0] - A3: [-281.0] - A5: [-847.6] - EA6: [0.0] - A7: [0.0]
B: B1: [-279.7] - EB2: [0.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - EB6: [0.0] - B7: [-843.7]

-- Substations Powers [kW]:
L: [3061.7] - R: [5039.8]

-- Vehicles and ESS Powers [kW]:
A: A1: [0.0] - EA2: [0.0] - A3: [-1000.0] - A5: [-3000.0] - EA6: [0.0] - A7: [0.0]
B: B1: [-1000.0] - EB2: [0.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - EB6: [0.0] - B7: [-3000.0]
```

```

-- Vehicles Dumpers Powers Loss [kW]:
A: A1: [0.0] - A3: [0.0] - A5: [0.0] - A7: [0.0]
B: B1: [0.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - B7: [0.0]

-- Substation Powers Loss [W]:
L: [1447.9] - R: [3925.8]

-- Line Powers Loss [W]:
A: [116.4]
B: [83.6]
Tie: [4.7]

```

Tabela 5-3 Porównanie wyników analiz dla solvera MATLAB oraz LT-Spice dla #1

Węzeł	MATLAB [V]	LTspice [V]	Δ [V]	Δ [%]
L	3598,3	3597,29	1,01	0,03
A1	3590,4	3589,39	1,01	0,03
A2	3570,7	3569,65	1,05	0,03
A3	3558,8	3557,81	0,99	0,03
A4	3553,1	3552,12	0,98	0,03
A5	3539,6	3538,55	1,05	0,03
A6	3556,9	3555,84	1,06	0,03
A7	3585,7	3584,65	1,05	0,03
R	3597,2	3596,18	1,02	0,03
B1	3575,5	3574,48	1,02	0,03
B2	3566,7	3565,66	1,04	0,03
B3	3563,1	3562,13	0,97	0,03
B4	3557,9	3556,84	1,06	0,03
B5	3557,3	3556,27	1,03	0,03
B6	3556,9	3555,89	1,01	0,03
B7	3556	3554,94	1,06	0,03

Objaśnienie listingu (spójne dla wszystkich analizowanych scenariuszy):

- Etykieta `Nodes Voltage` przedstawia napięcia wyznaczone na węzłach zgodnie z nomenklaturą przyjętą na rysunku 5-6, odpowiednio dla linii `A` i `B`. Węzły zaczynające się oznaczeniem `E` odpowiadają zasobnikom energii, węzły `L` i `R` są to węzły zasilaczy podstawowych. Węzeł `A4` i `B4` są ze sobą rezystancyjnie połączone odwzorowując kabinę sekcją.
- Etykieta `Branches Currents` przedstawia przepływ prądu między węzłami zgodnie z kierunkiem symbolu `->`. Etykieta `Tie` dotyczy połączenia sekcyjnego.
- Etykieta `Vehicles and ESS Currents` przedstawia prądy wpływające z danego węzła do źródła reprezentującego zasobnik `E` lub pojazd `A / B`.
- Etykieta `Substations Powers` przedstawia moce pobierane z podstacji
- Etykieta `Vehicles and ESS Powers` przedstawia moce zasobników i pojazdów wyliczone przez solver.
- Etykiety `Vehicles Dumper Loss`, `Substation Power Loss` oraz `Line Power Loss` przedstawiają odpowiednio sumaryczną moc strat generowanych przez rezystory chopperów, podstacje oraz linie przesyłowe.

Listing bilansu solvera MATLAB dla przypadku #2 (patrz wyniki w tabelach 5-2 oraz 5-4):

```
-- Nodes Voltages [V]:  
  
A: L:3764.5 - A1:3771.9 - EA2:3749.5 - A3:3736.0 - A4:3713.6 - A5:3699.1 - EA6:3690.4 -  
A7:3675.9 - R:3670.1  
  
B: L:3764.5 - B1:3745.9 - EB2:3727.4 - B3:3719.9 - B4:3708.8 - B5:3692.8 - EB6:3682.2 -  
B7:3655.7 - R:3670.1  
  
-- Branches Currents [A]:  
  
A: L - [-371.6] -> A1 - [449.1] -> EA2 - [449.1] -> A3 - [449.1] -> A4 - [289.5] -> A5 -  
[289.5] -> EA6 - [289.5] -> A7 - [289.5] -> R  
  
B: L - [371.6] -> B1 - [371.6] -> EB2 - [371.6] -> B3 - [371.6] -> B4 - [531.1] -> B5 -  
[531.1] -> EB6 - [531.1] -> B7 - [-289.5] -> R  
  
Tie: A4 - [159.6] -> B4 (positive: A4-B4)  
  
-- Vehicles and ESS Currents [A]:  
  
A: A1: [1060.5] - EA2: [0.0] - A3: [0.0] - A5: [0.0] - EA6: [0.0] - A7: [0.0]  
  
B: B1: [0.0] - EB2: [0.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - EB6: [0.0] - B7: [-820.6]  
  
-- Substations Powers [kW]:  
  
L: [-0.0] - R: [-0.0]  
  
-- Vehicles and ESS Powers [kW]:  
  
A: A1: [4000.0] - EA2: [0.0] - A3: [0.0] - A5: [0.0] - EA6: [0.0] - A7: [0.0]  
  
B: B1: [0.0] - EB2: [0.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - EB6: [0.0] - B7: [-3000.0]  
  
-- Vehicles Dumpers Powers Loss [kW]:  
  
A: A1: [904.5] - A3: [0.0] - A5: [0.0] - A7: [0.0]  
  
B: B1: [0.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - B7: [0.0]
```

-- Substation Powers Loss [kW]:

L: [0.0] - R: [0.0]

-- Line Powers Loss [kW]:

A: [41.6]

B: [53.1]

Tie: [0.8]

Tabela 5-4 Porównanie wyników analiz dla solvera MATLAB oraz LT-Spice dla #2

Węzeł	MATLAB [V]	LTspice [V]	Δ [V]	Δ [%]
L	3764,5	3765,51	-1,01	0,03
A1	3771,9	3772,94	-1,04	0,03
A2	3749,5	3750,49	-0,99	0,03
A3	3736	3737,02	-1,02	0,03
A4	3713,6	3714,57	-0,97	0,03
A5	3699,1	3700,09	-0,99	0,03
A6	3690,4	3691,41	-1,01	0,03
A7	3675,9	3676,93	-1,03	0,03
R	3670,1	3671,14	-1,04	0,03
B1	3745,9	3746,93	-1,03	0,03
B2	3727,4	3728,36	-0,96	0,03
B3	3719,9	3720,93	-1,03	0,03
B4	3708,8	3709,78	-0,98	0,03
B5	3692,8	3693,85	-1,05	0,03
B6	3682,2	3683,22	-1,02	0,03
B7	3655,7	3656,67	-0,97	0,03

Listing bilansu solvera MATLAB dla przypadku #3 (patrz wyniki w tabelach 5-2 oraz 5-5):

-- Nodes Voltages [V]:

A: L:3799.8 - A1:3805.5 - EA2:3784.8 - A3:3785.0 - A4:3785.5 - A5:3809.4 - EA6:3803.1 - A7:3792.7 - R:3788.5

B: L:3799.8 - B1:3785.5 - EB2:3771.2 - B3:3765.5 - B4:3771.5 - B5:3763.4 - EB6:3767.6 - B7:3778.1 - R:3788.5

-- Branches Currents [A]:

A: L - [-285.3] -> A1 - [414.3] -> EA2 - [-9.5] -> A3 - [-9.5] -> A4 - [-476.8] -> A5 - [208.7] -> EA6 - [208.7] -> A7 - [208.7] -> R

B: L - [285.2] -> B1 - [285.2] -> EB2 - [285.2] -> B3 - [-198.8] -> B4 - [268.5] -> B5 - [-208.7] -> EB6 - [-208.7] -> B7 - [-208.7] -> R

Tie: A4 - [467.3] -> B4 (positive: A4→B4)

-- Vehicles and ESS Currents [A]:

A: A1: [1051.1] - EA2: [-423.8] - A3: [0.0] - A5: [1050.0] - EA6: [0.0] - A7: [0.0]

B: B1: [0.0] - EB2: [0.0] - B3: [-265.6] - B5: [-265.7] - EB6: [0.0] - B7: [0.0]

-- Substations Powers [kW]:

L: [-0.0] - R: [-0.0]

-- Vehicles and ESS Powers [kW]:

A: A1: [4000.0] - EA2: [-1604.0] - A3: [0.0] - A5: [4000.0] - EA6: [0.0] - A7: [0.0]

B: B1: [0.0] - EB2: [0.0] - B3: [-1000.0] - B5: [-1000.0] - EB6: [0.0] - B7: [0.0]

-- Vehicles Dumpers Powers Loss [kW]:

A: A1: [1337.9] - A3: [0.0] - A5: [1388.7] - A7: [0.0]

B: B1: [0.0] - B3: [822.6] - B5: [795.9] - B7: [0.0]

-- Substation Powers Loss [kW]:

L: [0.0] - R: [0.0]

-- Line Powers Loss [kW]:

A: [25.9]

B: [18.3]

Tie: [6.6]

Tabela 5-5 Porównanie wyników analiz dla solvera MATLAB oraz LT-Spice dla #3

Węzeł	MATLAB [V]	LTspice [V]	Δ [V]	Δ [%]
L	3 799,80	3 800,75	-0,95	-0,025
A1	3 805,50	3 806,45	-0,95	-0,025
A2	3 784,80	3 785,74	-0,94	-0,025
A3	3 785,00	3 786,02	-1,02	-0,027
A4	3 785,50	3 786,50	-1,00	-0,026
A5	3 809,40	3 810,34	-0,94	-0,025
A6	3 803,10	3 804,08	-0,98	-0,026

A7	3 792,70	3 793,64	-0,94	-0,025
R	3 788,50	3 789,47	-0,97	-0,026
B1	3 785,50	3 786,48	-0,98	-0,026
B2	3 771,20	3 772,22	-1,02	-0,027
B3	3 765,50	3 766,52	-1,02	-0,027
B4	3 771,50	3 772,48	-0,98	-0,026
B5	3 763,40	3 764,42	-1,02	-0,027
B6	3 767,60	3 768,60	-1,00	-0,027
B7	3 778,10	3 779,03	-0,93	-0,025

Listing bilansu solvera MATLAB dla przypadku #4 (patrz wyniki w tabelach 5-2 oraz 5-6):

-- Nodes Voltages [V]:

A: L:3734.8 - A1:3740.9 - EA2:3756.1 - A3:3765.1 - A4:3738.0 - A5:3727.5 -
EA6:3721.2 - A7:3716.0 - R:3713.9

B: L:3734.8 - B1:3719.7 - EB2:3721.2 - B3:3724.0 - B4:3728.1 - B5:3722.3 -
EB6:3718.4 - B7:3708.7 - R:3713.9

-- Branches Currents [A]:

A: L - [-303.2] -> A1 - [-303.2] -> EA2 - [-303.2] -> A3 - [542.0] -> A4 - [210.5]
-> A5 - [210.5] -> EA6 - [104.4] -> A7 - [104.4] -> R

B: L - [303.2] -> B1 - [-31.2] -> EB2 - [-137.4] -> B3 - [-137.4] -> B4 - [194.2] -
> B5 - [194.2] -> EB6 - [194.2] -> B7 - [-104.4] -> R

Tie: A4 - [331.6] -> B4 (positive: A4→B4)

-- Vehicles and ESS Currents [A]:

A: A1: [0.0] - EA2: [0.0] - A3: [1062.4] - A5: [0.0] - EA6: [-106.1] - A7: [0.0]

B: B1: [-268.8] - EB2: [-106.2] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - EB6: [0.0] - B7: [-269.6]

-- Substations Powers [kW]:

L: [-0.0] - R: [-0.0]

-- Vehicles and ESS Powers [kW]:

A: A1: [0.0] - EA2: [0.0] - A3: [4000.0] - A5: [0.0] - EA6: [-394.7] - A7: [0.0]

B: B1: [-1000.0] - EB2: [-395.0] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - EB6: [0.0] - B7: [-
1000.0]

-- Vehicles Dumpers Powers Loss [kW]:

A: A1: [0.0] - A3: [817.7] - A5: [0.0] - A7: [0.0]

B: B1: [243.9] - B3: [0.0] - B5: [0.0] - B7: [107.3]

-- Substation Powers Loss [kW]:

L: [0.0] - R: [0.0]

-- Line Powers Loss [kW]:

A: [28.2]

B: [9.9]

Tie: [3.3]

Tabela 5-6 Porównanie wyników analiz dla solvera MATLAB oraz LT-Spice dla #4

Węzeł	MATLAB [V]	LTspice [V]	Δ [V]	Δ [%]
L	3 734,80	3 735,79	-0,99	-0,027
A1	3 740,90	3 741,85	-0,95	-0,025
A2	3 756,10	3 757,01	-0,91	-0,024
A3	3 765,10	3 766,11	-1,01	-0,027
A4	3 738,00	3 739,00	-1,00	-0,027
A5	3 727,50	3 728,48	-0,98	-0,026
A6	3 721,20	3 722,17	-0,97	-0,026
A7	3 716,00	3 716,94	-0,94	-0,025
R	3 713,90	3 714,86	-0,96	-0,026
B1	3 719,70	3 720,63	-0,93	-0,025
B2	3 721,20	3 722,19	-0,99	-0,027
B3	3 724,00	3 724,93	-0,93	-0,025
B4	3 728,10	3 729,06	-0,96	-0,026
B5	3 722,30	3 723,23	-0,93	-0,025
B6	3 718,40	3 719,34	-0,94	-0,025
B7	3 708,70	3 709,63	-0,93	-0,025

W rozdziale 6 zaimplementowane i zwalidowane algorytmy solvera zostaną wykorzystane do wyznaczenia optymalnych pozycji oraz charakterystyk przytorowych zasobników energii w założonym modelu.

6. Algorytmy optymalizacji dla systemów trakcyjnych DC

Współczesne systemy trakcyjne prądu stałego stają się coraz bardziej złożone ze względu na wzrastającą liczbę pojazdów, ich rosnące moce oraz wymogi efektywności energetycznej. Wprowadzenie pojazdów zdolnych do rekuperacji energii podczas hamowania wymusiło integrację dodatkowych elementów, takich jak pojazdowe układy przekształtników hamowania i zasobniki energii (ESS). Układy te pozwalają na zwiększenie stabilności napięciowej sieci oraz poprawę bilansu energetycznego, jednak jednocześnie generują szereg pytań projektowych: gdzie zlokalizować zasobniki, jakie powinny mieć parametry, przy jakich progach napięciowych powinny się załączać, a także jak dostroić progi zadziałania układów hamowania [3], [15], [17].

Znaczenie tego typu analiz nie ogranicza się wyłącznie do etapu badań czy modelowania. Wyniki symulacji i optymalizacji stanowią istotne wsparcie już na etapie planowania inwestycyjnego. Pozwalają one na porównywanie różnych scenariuszy rozwoju infrastruktury trakcyjnej oraz ocenę korzyści wynikających z wdrożenia dodatkowych elementów (np. zasobników energii) w kontekście kosztów i efektywności. Co więcej, uzyskane wyniki mogą stanowić wartościowe narzędzie w rozmowach z potencjalnymi inwestorami – ułatwiają prezentację możliwych rozwiązań oraz ich konsekwencji jeszcze przed podjęciem decyzji inwestycyjnej [38], [61].

W pracy wykorzystany został model symulacyjny, który umożliwia przeprowadzanie obliczeń w kolejnych krokach czasowych dla całego obwodu z uwzględnieniem ruchu pojazdów. Dzięki temu można analizować wpływ różnych ustawień parametrów na takie wielkości jak: straty w liniach, ilość energii wytracanej w rezystorach hamowania, poziom wykorzystania energii rekuperowanej czy obciążenie podstacji zasilających. Model umożliwia również śledzenie wymiany energii pomiędzy pojazdami a zasobnikami energii oraz ocenę stopnia samo-receptywności systemu, czyli udziału energii odzyskanej w całkowitym zapotrzebowaniu.

Parametry decyzyjne

W rozważanym zagadnieniu optymalizacyjnym można wyróżnić kilka kluczowych grup parametrów decyzyjnych:

- Parametry układów pojazdowych przekształtników hamowania:
 - próg napięcia aktywacji,
 - charakterystyka rezystorów hamulca (rezystancja minimalna przy napięciu granicznym),
 - sposób załączania i odłączania w zależności od stanu systemu.
- Parametry stacjonarnych zasobników energii (ESS):
 - progi napięciowe aktywacji trybu wspomaganie oraz ładowania (rekuperacji),
 - maksymalny prąd ładowania i rozładowania,
 - pojemność energetyczna (wpływająca na zdolność absorpcji długotrwałych przepływów energii),
 - liczba zasobników i ich lokalizacja wzdłuż linii.
- Parametry ruchowe i eksploatacyjne:

- odstęp czasowy między pojazdami (tzw. headway),
- maksymalna moc pojazdów,
- charakterystyka przyspieszeń i opóźnień, które decydują o intensywności wymiany energii z siecią.

Funkcje kosztu (cele optymalizacyjne)

Przyjęcie określonych parametrów ma bezpośredni wpływ na szereg wskaźników charakteryzujących pracę systemu. Do istotnych funkcji kosztu, które mogą być analizowane, przyjęto:

- Straty energii w liniach trakcyjnych – związane z przepływami prądów, rosnące wraz z oddaleniem źródła zasilania od odbiorników. Minimalizacja strat przekłada się na wyższą sprawność systemu i mniejsze koszty operacyjne.
- Straty energii w rezystorach hamowania – energia, której nie udało się zagospodarować i która została wytracona w postaci ciepła. Minimalizacja tych strat oznacza lepsze wykorzystanie rekuperacji.
- Energia obsłużona przez zasobniki ESS – miernik efektywności zasobników. Zbyt niska wartość oznacza ich niewykorzystanie, a zbyt wysoka wskazuje na ryzyko przewymiarowania lub przeciążenia.
- Samo-receptywność systemu – udział energii odzyskanej, która została efektywnie ponownie zużyta przez system (pojazdy lub ESS). Im wyższy ten wskaźnik, tym większa niezależność energetyczna układu od podstacji.
- Koszt i rozmiar zasobników energii – czynnik ekonomiczny, który musi być zrównoważony z efektywnością energetyczną.
- Obciążenie podstacji – rozpatrywane zarówno w sensie wartości średnich, jak i mocy szczytowych, co ma znaczenie dla niezawodności systemu i kosztów infrastruktury.

6.1. Optymalizacja wielokryterialna

Ponieważ cele optymalizacyjne mogą być sprzeczne (np. minimalizacja strat w przekształtnikach hamowania może wymagać większej liczby zasobników, co zwiększa koszt systemu), naturalnym podejściem jest zastosowanie metod optymalizacji wielokryterialnej (multi-objective optimization). Wynikiem takiej optymalizacji nie jest jedno rozwiązanie, ale zbiór tzw. rozwiązań Pareto-optymalnych, które reprezentują różne kompromisy pomiędzy poszczególnymi celami. Projektant systemu może następnie dokonać wyboru w zależności od przyjętych priorytetów – np. minimalizacji kosztów inwestycyjnych, maksymalizacji samo-receptywności lub redukcji strat.

Metody

Do analizy i optymalizacji można zastosować różne grupy metod. Porównanie dla wymienionych grup pod względem zalet, wad oraz przykładowego zastosowania w systemach trakcyjnych i zasobnikach energii znajduje się w tabeli 6-1:

- Metody deterministyczne (np. programowanie nieliniowe, MILP).
 W tej grupie znajdują się klasyczne techniki optymalizacji, które opierają się na sformułowaniu funkcji celu oraz zbioru ograniczeń. Przykładem są metody programowania nieliniowego (NLP) czy programowania mieszanego całkowitoliczbowego (MILP). Ich zaletą jest możliwość uzyskania jednoznacznego rozwiązania optymalnego przy znanych warunkach i dobrze zdefiniowanych modelach matematycznych. Wadą natomiast jest ograniczona skalowalność w przypadku dużych i nieliniowych problemów, jak również trudności w uwzględnianiu złożonych zjawisk fizycznych i nieliniowych charakterystyk elementów systemu [28].
- Metody meta-heurystyczne (algorytmy genetyczne, rojowe, wyżarzanie, NSGA-II).
 W praktyce systemy trakcyjne i ESS charakteryzują się dużą liczbą zmiennych, nieliniowością oraz ograniczeniami technicznymi. Dlatego proponuje się stosowanie metaheurystyk, takich jak algorytmy genetyczne (GA), algorytmy rojowe (PSO), symulowane wyżarzanie (SA) czy algorytmy wielokryterialne, jak NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II). Ich zaletą jest elastyczność oraz zdolność do znajdowania dobrych (choć nie zawsze globalnie optymalnych) rozwiązań w problemach wielokryterialnych, gdzie jednocześnie minimalizuje się np. straty w linii, energię wytracaną w przekształtnikach hamowania oraz wielkość zasobników [29], [30], [54].
- Metody oparte na próbkowaniu i meta-modelowaniu (Monte Carlo, Latin Hypercube, RSM).
 Pozwalają one na ocenę wpływu zmienności parametrów wejściowych na wyniki systemowe. Dodatkowo stosuje się metody metamodelowania (np. Response Surface Methodology – RSM), które tworzą uproszczone modele zastępcze na podstawie ograniczonej liczby symulacji szczegółowych. Umożliwia to szybsze przeszukiwanie przestrzeni projektowej przy niższym koszcie obliczeniowym [31], [55].
- Nowoczesne podejścia z uczeniem maszynowym (np. optymalizacja bayesowska z wykorzystaniem metamodeli).
 Widocznym w badaniach jest wykorzystanie optymalizacji bayesowskiej oraz innych algorytmów opartych na metamodelach tworzonych z użyciem metod uczenia maszynowego (np. regresji Gaussian Processes, sieci neuronowych czy drzew decyzyjnych). Umożliwiają one adaptacyjne poszukiwanie optimum poprzez stopniowe dopasowywanie modelu zastępczego do dotychczasowych wyników symulacji. Takie podejście szczególnie dobrze sprawdza się w problemach kosztownych obliczeniowo, gdzie liczba możliwych eksperymentów symulacyjnych jest ograniczona [32], [81].

Tabela 6-1 Porównanie metod analizy i optymalizacji branych pod uwagę w opracowaniu

Grupa metod	Przykłady	Zalety	Wady	Przykłady zastosowania w systemach trakcyjnych i ESS
Deterministyczne	NLP, MILP	<ul style="list-style-type: none"> • Gwarantują ściśle optimum przy poprawnym sformułowaniu problemu • Dobrze rozwinięte narzędzia programistyczne (np. MATLAB, Gurobi, CPLEX) 	<ul style="list-style-type: none"> • Duża wrażliwość na nieliniowości • Wymagają dokładnych modeli • Trudności z dużą liczbą zmiennych dyskretnych 	Wyznaczanie optymalnych punktów pracy ESS i przekształtników hamowania przy znanych ograniczeniach technicznych; analiza scenariuszy dla ustalonych pozycji zasobników
Meta-heurystyczne	GA, PSO, SA, NSGA-II	<ul style="list-style-type: none"> • Radzą sobie z problemami nieliniowymi i nieciągłymi • Dobrze działają w optymalizacji wielokryterialnej • Łatwość implementacji 	<ul style="list-style-type: none"> • Brak gwarancji znalezienia optimum globalnego • Duża liczba iteracji obliczeniowych 	Wyznaczanie optymalnych lokalizacji ESS na linii, doboru napięć progowych, liczby zasobników – przy równoczesnej minimalizacji strat i maksymalizacji samo-receptywności
Próbkowanie i meta-modelowanie	Monte Carlo, LHS, RSM	<ul style="list-style-type: none"> • Analiza wrażliwości systemu na zmienność parametrów • Możliwość przybliżonej oceny przestrzeni projektowej • Redukcja kosztów obliczeń przy użyciu metamodeli 	<ul style="list-style-type: none"> • Wyniki przybliżone • Wymagają dużej liczby symulacji wstępnych 	Analiza wpływu zmian parametrów (np. progów napięciowych ESS) na bilans energetyczny systemu; szacowanie ryzyka przeciążeń
Uczenie maszynowe i metody bayesowskie	Gaussian Processes, Bayesian Optimization, NN	<ul style="list-style-type: none"> • Umożliwiają adaptacyjne poszukiwanie optimum • Skuteczne przy kosztownych obliczeniach • Radzą sobie z dużą liczbą parametrów 	<ul style="list-style-type: none"> • Wymagają przygotowania danych uczących • Często trudne do interpretacji fizycznej 	Optymalizacja charakterystyki ESS i przekształtników hamowani przy ograniczonej liczbie symulacji; tworzenie metamodeli systemu trakcyjnego do szybkich analiz inwestycyjnych

6.2. Uzasadnienie wyboru metody

W ramach niniejszej pracy, pomimo szerokiego wachlarza metod optymalizacji opisanych w literaturze (patrz rozdziały 2 oraz 6.1), w głównej mierze zdecydowano się na zastosowanie techniki przeszukiwania przestrzeni parametrów opartej na próbkowaniu i zagnieżdżonych pętlach obliczeniowych oraz uproszczonego podejścia probabilistycznego (metoda tożsama z MILP z dyskretyzacją zmiennych oraz Monte Carlo). Wybór ten podyktowany był kilkoma względami:

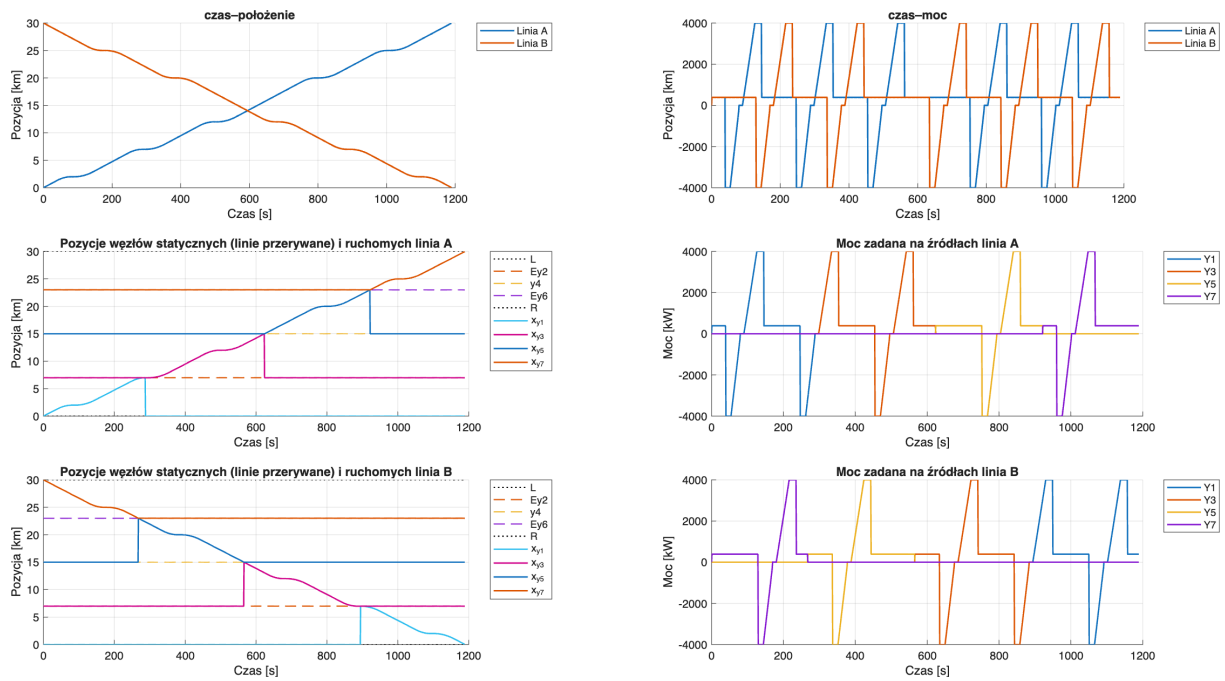
- Przejrzystość i prostota – metoda z przeszukiwaniem przestrzeni parametrów pozwala w sposób bezpośredni analizować zależność wyników od wybranych parametrów, co jest łatwe do zrozumienia i interpretacji przez inżynierów praktyków, którzy będą korzystali z opracowanego narzędzia.
- Pełna kontrola nad przestrzenią poszukiwań – możliwe jest jednoznaczne zdefiniowanie zakresów zmiennych (np. progi napięciowe przekształtników hamowania, napięcia aktywacji i ładowania ESS, położenie zasobników, ich liczba) oraz obserwacja trendów bez konieczności korzystania z metod stochastycznych.
- Zastosowanie wdrożeniowe – doktorat ma charakter wdrożeniowy, a stworzone środowisko symulacyjne ma służyć jako narzędzie do analiz inżynierskich i wspierać proces podejmowania decyzji już na etapie planowania inwestycyjnego. W tym kontekście kluczowa jest nie tyle formalna doskonałość metody optymalizacji, ile możliwość szybkiego i transparentnego uzyskiwania wyników porównawczych dla różnych scenariuszy.
- Podstawa do dalszych badań – przyjęta technika nie wyklucza zastosowania bardziej zaawansowanych metod w przyszłości. Wręcz przeciwnie – uzyskane wyniki mogą stanowić punkt odniesienia oraz zbiór danych treningowych dla metamodeli, które w kolejnych etapach rozwoju narzędzia można wykorzystać w ramach optymalizacji heurystycznych czy bayesowskich.

W związku z powyższym, wyniki symulacji przedstawione w niniejszej pracy opierają się na metodzie przeszukiwania parametrycznego oraz Monte Carlo. Pozwala to przedstawić w sposób czytelny wpływ poszczególnych zmiennych projektowych na funkcje kosztu takie jak:

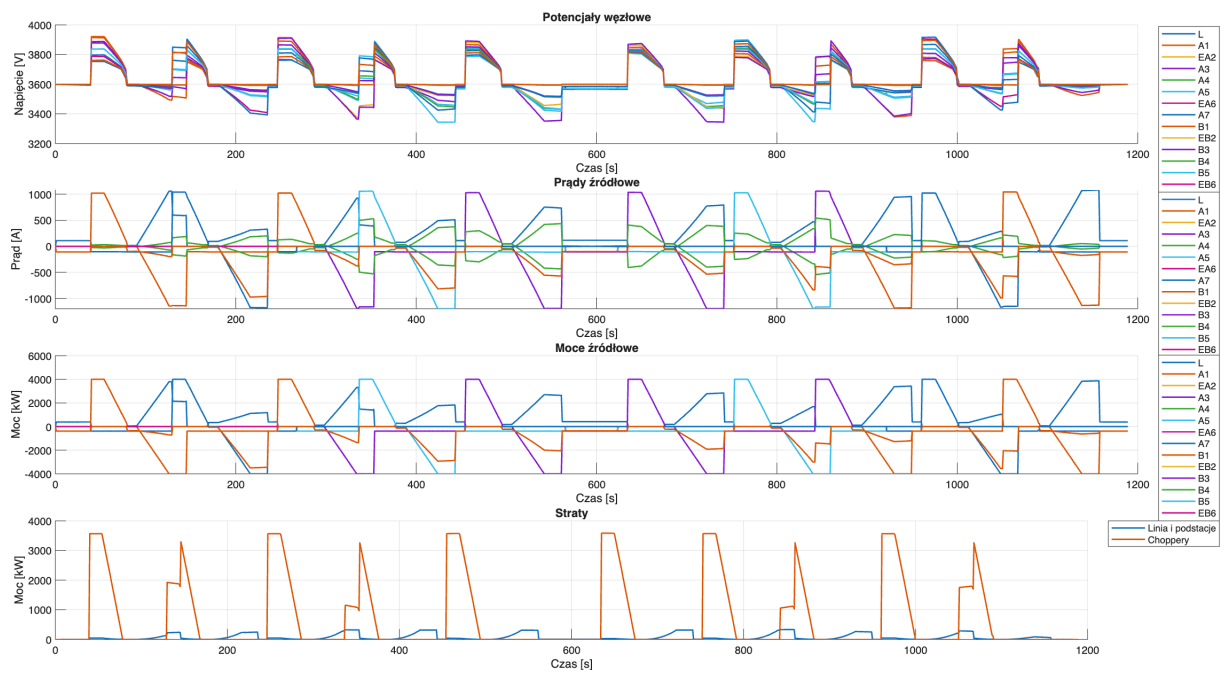
- straty w liniach trakcyjnych,
- energia wytracana w przekształtnikach hamowania,
- efektywność wykorzystania ESS,
- stopień samo-receptywności systemu.

6.3. Symulacje i wyniki

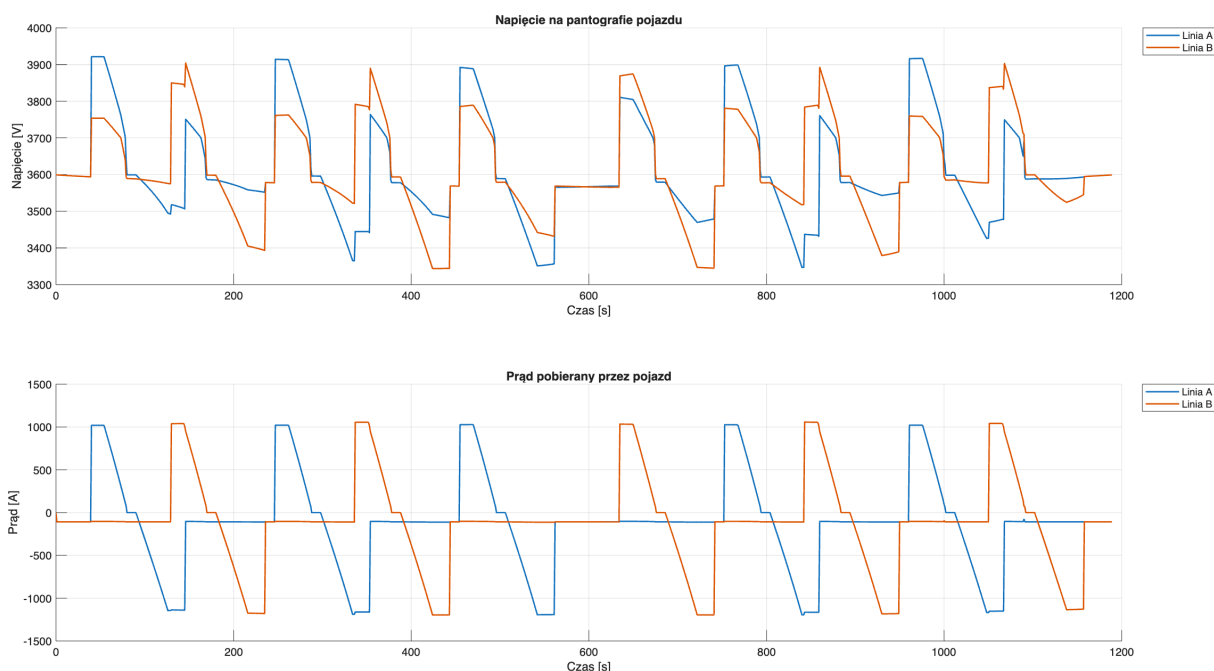
Rysunki od 6-1 do 6-3 przedstawiają kolejne kroki realizacji algorytmu opisanego w rozdziale 5. W pierwszej kolejności (na rysunku 6-1) wyznaczana jest trajektoria ruchu na podstawie zdefiniowanych prędkości, przyspieszeń oraz przystanków. Następnie znając model ruchu na podstawie parametrów pojazdu wyznacza się teoretyczne zapotrzebowanie na moc w każdym dyskretnym kroku. W ramach niniejszej analizy założono, że przejazd oraz zapotrzebowanie na moc są wartościami oczekiwanymi do zrealizowania, tzn. nie ma sprzężenia zwrotnego optymalizacji do tej części modelu i traktuje się go jako daną wejściową która będzie oddziaływać z systemem zasilania.



Rysunek 6-1 Wyniki symulacji działania jednej iteracji algorytmu (modelowanie ruchu pojazdów).



Rysunek 6-2 Wyniki symulacji działania jednej iteracji algorytmu (rozwiązanie obwodu – węzły i źródła).



Rysunek 6-3 Wyniki symulacji działania jednej iteracji algorytmu (mapowanie węzłów i źródeł z powrotem do pojazdów).

Oddziaływanie modelu ruchu na elektryczny model obwodowy (rysunek 6-2) uzależnione jest również od parametrów modelu tj. rezystancje linii, wartości napięć zasilających podstację, które też traktuje się jako niezmiennicze w procesie optymalizacji (patrz parametry opisane w tabelach od 6-2 do 6-5).

Poza opisanymi parametrami występują zmienne które w tym modelu będą podlegać optymalizacji tj. (patrz tabela 6-6):

- liczba i ilość zasobników N z ograniczeniem od 0 do 4, maksymalnie jeden każdą czwartą część linii (patrz rysunek 5-6),
- położenie zasobnika $x_{E,n}$ w ograniczeniu jednej ćwiartki, dla danego przykładu łącznik sekcyjny znajduje się w połowie linii na 15 km, więc ograniczenie lokalizacji zasobnika w ćwiartce będzie między 0 a 15,
- nastawa aktywacji E_{dump} choppera pojazdu, ograniczona od dołu napięciem podstacji, z góry osiągnięciem mocy strat równej nominalnej mocy pojazdu przy maksymalnym dopuszczanym napięciu linii. W rozważanym modelu jest to zakres od 3600V do 4000V,
- nastawa charakterystyki konwertera zasobnika dla trybu odzysku E_{chrg} i wspomaganie E_{supp} . W rozważanym modelu jest to zakres od 3400 do 3600 dla trybu wsparcia oraz od 3600 do 3800 dla trybu odzysku energii,

Model solvera wyznacza wszystkie parametry obwodu zastępczego na podstawie których można wyznaczyć istotne dla tej analizy zmienne które będą podlegać optymalizacji, tj.:

- całkowita moc strat P_{tot} będąca sumą strat generowanych przez rezystory przekształtników hamowania oraz straty rezystancyjne linii,
- ilość energii wymienianej z zasobnikami energii $E_{E,tot}$.

Zatem można przyjąć, że proces optymalizacyjny opisany jest funkcją kosztu polegającą na minimalizacji strat systemu trakcyjnego, przy zachowaniu jak najmniejszej potrzebnej wymiany energii z zasobnikami (optymalizacja pojemności i mocy zasobnika). Można przyjąć, iż minimalizowaną funkcją jest algorytm solvera S .

$$P_{tot} = \min S(N, x_{E,n}, E_{dump}, E_{chrg}, E_{supp}) \quad (64)$$

$$E_{E,tot} = \min S(N, x_{E,n}, E_{dump}, E_{chrg}, E_{supp}) \quad (65)$$

Należy podkreślić, że P_{tot} oraz $E_{E,tot}$ są tylko jednymi z wielu możliwych celów funkcji kosztu, wybranymi na potrzeby przedstawienia zasady działania algorytmów i metodologii. Możliwym jest wybór innych zestawów danych wynikowych solvera na potrzeby minimalizacji. Oprócz stratności systemu autor spotkał się w zapytaniach ofertowych z potrzebą minimalizacji:

- różnicy wartości średniej \bar{U} napięcia na pojeździe względem zadanego napięcia oczekiwanego U_{ref} (ograniczenie lokalnych zapadów napięcia),
- różnicy energii wymienionej z zasobnikami stacjonarnymi E_E względem zadanej pojemności $E_{E,max}$ (najlepsze wykorzystanie zdefiniowanej z góry, często przez koszt, pojemności),
- różnicy maksymalnej wartości prądu na wybranym odcinku linii $I_{l,max}$ względem wartości zadanej $I_{l,ref}$ (ograniczenie prądów powrotnych w celu minimalizacji niedozwolonych spadków napięcia na szynie jezdnej względem ziemi),
- lub ich wagowych kombinacji.

Tabela 6-2 Przyjęte parametry linii

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Długość sekcji	L	30	km
Liczba linii	-	2	-
Liczba łączników sekcyjnych	-	1	-
Pozycja łącznika	-	15	km
Pozycja 1-go przystanku	-	2	km
Pozycja 2-go przystanku	-	7	km
Pozycja 3-go przystanku	-	12	km
Pozycja 4-go przystanku	-	20	km
Pozycja 5-go przystanku	-	25	km
Czas postoju na przystanku	-	10	s
Nachylenie	h	0	%

Tabela 6-3 Przyjęte parametry pojazdów

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Maksymalna prędkość	v_{max}	120	$\frac{km}{h}$
Przyspieszenie	a	0,6	$\frac{m}{s^2}$
Opóźnienie	d	0,8	$\frac{m}{s^2}$
Masa całkowita	m	250	t
Współczynnik mas wirujących	k_{rot}	0,8	-
Iloczyn współczynnika aerodynamicznego i powierzchni czołowej	$C_d \cdot A$	6	m^2
Współczynnik oporu toczenia	C_{rr}	0,0025	-
Gęstość powietrza	ρ	1,225	$\frac{kg}{m^3}$
Sprawność w trybie trakcyjnym	η_{tr}	0,92	-
Sprawność w trybie rekuperacyjnym	η_{rg}	0,9	-
Moc maksymalna napędu	P_{max}	4000	kW
Moc urządzeń pomocniczych	P_{aux}	100	kW
Przyspieszenie ziemskie	g	9,81	$\frac{m}{s^2}$

Tabela 6-4 Parametry obwodu trakcyjnego

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Napięcia jałowe podstacji	$[E_R; E_L]$	[3600; 3600]	V
Przewodności podstacji	$[g_R; g_L]$	[31,25; 31,25]	S
Rezystancja linii	R_{pk}	40	$\frac{m\Omega}{km}$

Tabela 6-5 Parametry solvera

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Krok symulacji	dt	1	s

Współczynnik relaksacji	α	0,05	–
Minimalne napięcie węzła	U_{min}	2000	V
Tolerancja bilansu błędu mocy	ΔP	0,1	kW
Tolerancja błędu napięciowego	ΔU	1	mV
Maksymalna liczba iteracji	i	100	-

Tabela 6-6 Zakresy przeszukania zmiennych modelu optymalizacji (w nawiasie przedstawiono wartość domyślną)

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Zakres napięcie aktywacji przekształtnika hamowania	E_{dump}	[3600; 3950] (3700)	V
Zakres napięcia aktywacji wspomagania	E_{supp}	[3400; 3600] (3550)	V
Zakres napięcia aktywacji ładowania	E_{chrg}	[3600; 3800] (3650)	V
Zakres zmian pozycji zasobnika	$[x_{E,n,min}; x_{E,n,max}]$	[0; 15] (7)	km
Liczba zasobników	N	[0; 4] (0)	

6.3.1. Wyniki działania algorytmu przeszukania

Na potrzeby przedstawienia wyników działania algorytmów założono, że obiektem modelowanym jest przypadek ruchu opisany w rozdziale 6.3 a minimalizowaną funkcją kosztu jest całkowita energia strat w modelowanym systemie będąca sumą całkowitej energii strat w linii (E_l) i całkowitej energii strat w rezystorach pojazdowych przekształtników hamowania (E_d). W listingach kodu i niektórych oznaczeniach przyjęto stosowanie potocznego nazewnictwa dla przekształtników hamowania tj. *chopper* lub *dumper*.

Przypadek pierwszy

Przypadek pierwszy (#1) jest prostym jedno-wymiarowym przeszukaniem siatki po parametrze progu aktywacji przekształtnika hamowania rezystancyjnego (E_{dump}) z 50 punktową siatką przeszukania między wartościami 3600 a 3900 V.

Rysunek 6-4 przedstawia, zgodnie z teorią, że straty na linii (E_l) maleją wraz ze wzrostem napięć w węzłach, które zmieniają się względem rosnącego parametru przeszukania

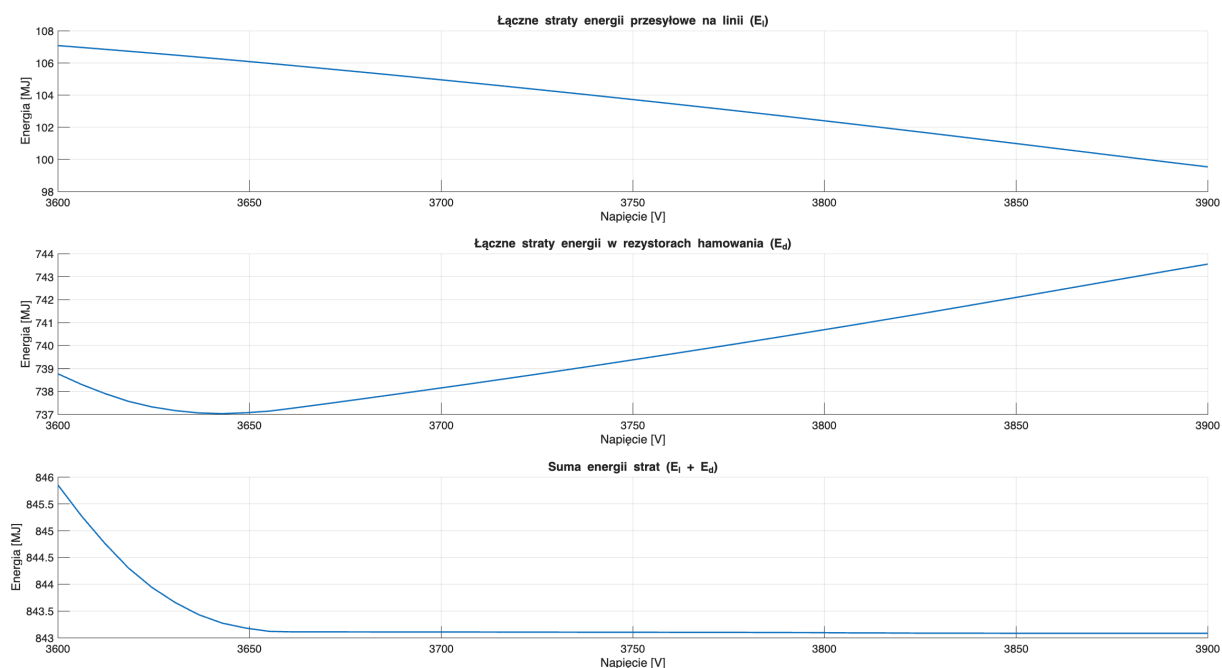
(maleją prądy przy zachowaniu tej samej mocy przenoszonej). Nadmiarowa energia pochodząca z hamowania pojazdów może zostać przekazana wyłącznie do innego pojazdu lub być rozproszona w linii (E_l) albo w rezystorach przekształtników hamowania (E_d).

Przypadek ten przyjmuje się jako referencję dla dalszych analiz (patrz tabela 6-7).

Tabela 6-7 Podsumowanie przypadku #1

Przypadek #1	
Całkowita energia strat systemu ($E_l + E_d$)	844 MJ

Niewielki przyrost energii całkowitej energii strat, rzędu 3 MJ, obserwowany jest w dolnej granicy przeszukania (poniżej 3650V) i związany jest bliskością progu do napięcia zasilaczy podstacyjnych oraz interakcją między dwoma przekształtnikami hamowania dla dwóch pojazdów. Przyjmuje się, że w związku z wypłaszczeniem charakterystyki powyżej wartości 3650V, będzie ona optymalną nastawą dla progu aktywacji przekształtnika hamowania (E_{dump}).



Rysunek 6-4 Wynik symulacji poszukiwania minimum energii start dla pierwszego przypadku (#1), tj. jednowymiarowego przeszukania siatki po napięciu aktywacji przekształtników hamowania, bez aktywnych zasobników energii.

Przypadek drugi

W kolejnym, drugim (#2) przypadku przeszukano siatkę dwuwymiarowo (patrz tabela 6-8), tj. iterując po parametrach:

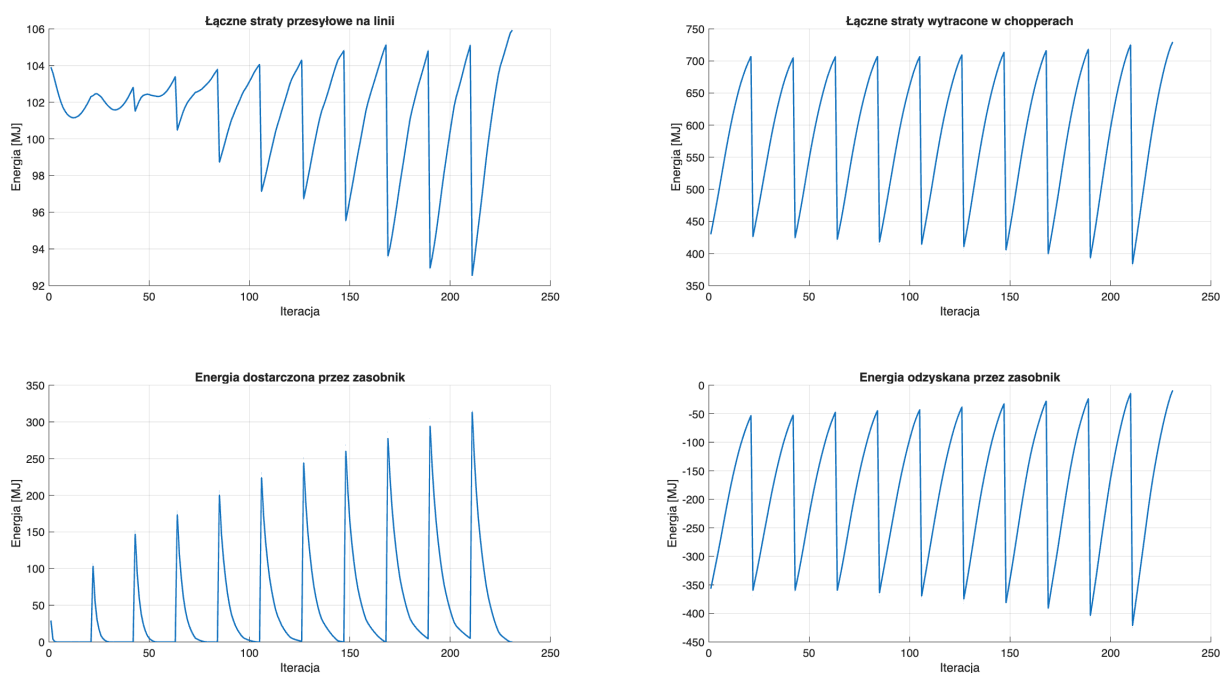
- napięciu aktywacji przekształtnika hamowania (E_{dump}) pozostawionym na wartości 3650 V (1 punkt, indeks i).

- charakterystyce prądowo-napięciowej zasobnika (E_{supp} , $E_{supp,min}$) oraz (E_{chrg} , $E_{chrg,max}$) w zakresie odpowiednio od 3400V do 3600V dla funkcji wsparcia (supp.) oraz od 3600V do 3700V dla ładowania (chrg.), łączenie 21 kroków oznaczonych indeksem j,
- położeniu jednego aktywnego zasobnika w pierwszej ćwiartce ($x_{E,1}$) w zakresie od 0.5 km do 14.5 km (11 punktów, indeks k),

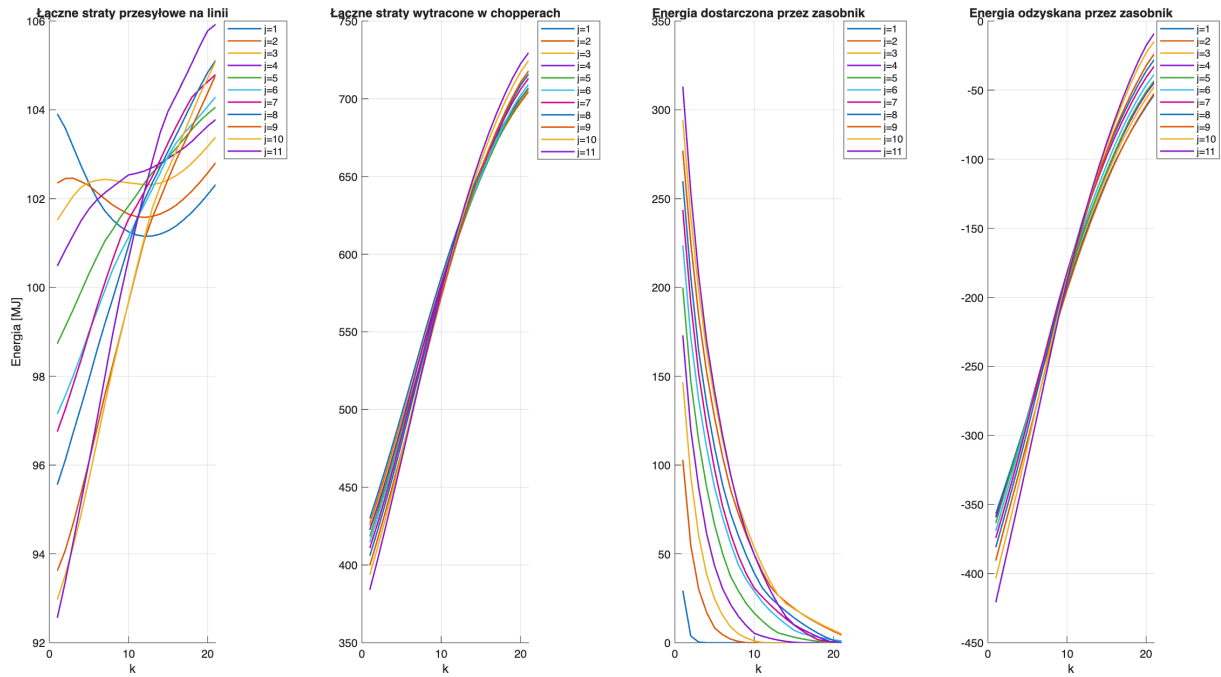
Tabela 6-8 Zakresy parametrów siatki przeszukania dla drugiego przypadku (#2)

	Zakres przeszukania	Jednostka	Liczba kroków
E_{dump}	3650	V	1 (indeks i)
E_{supp}	[3400; 3600]	V	21 (indeks j)
$E_{supp,min}$	$E_{supp} - 100$	V	
E_{chrg}	[3600; 3700]	V	
$E_{chrg,max}$	$E_{chrg} + 100$	V	
$x_{E,1}$	[0,5; 14,5]	V	11 (indeks k)

Wynik analizy wyznaczenia całkowitej energii strat linii (E_l), strat w rezystorach przekształtników hamowania (E_d) oraz wymiany energii z zasobnikami stacjonarnymi w trybie ładowania (E_r) i wspomagania (E_s) dla kolejnych kroków przedstawiony jest na rysunku 6-5 oraz 6-6. Można zaobserwować, że dla różnych zestawów parametrów, możliwe jest uzyskanie zbliżonego stanu strat i wymiany energii w systemie.



Rysunek 6-5 Wynik symulacji poszukiwania minimum strat dla drugiego przypadku (#2) tj. dwuwymiarowego przeszukania po pozycji oraz charakterystyce zasobnika (liczba aktywnych zasobników: $i = 1$; j – przeszukiwanie po charakterystyce zasobnika; k – przeszukiwanie po pozycji zasobnika) - iteracje skumulowane od 1 do $i \cdot j \cdot k$.



Rysunek 6-6 Wynik symulacji poszukiwania minimum strat dla drugiego przypadku (#2) tj. dwuwymiarowego przeszukania po pozycji oraz charakterystyce zasobnika (liczba aktywnych zasobników: $i = 1$; j – przeszukiwanie po charakterystyce zasobnika; k – przeszukiwanie po pozycji zasobnika) - iteracje w postaci oddzielnych charakterystyk dla i, j oraz k .

Przedstawiony poniżej listing algorytmu przeszukania dla przypadku drugiego (#2) zwraca współrzędne indeksów i, j, k oraz odpowiadające im kombinacje parametrów przeszukania dla których osiągnięto minima wartości energii strat (wartości energii rozproszonych w linii (E_l), rezystorach hamowania (E_d)) oraz maksima energii wymienionych z zasobnikami (energii ładowania (E_r), energii wspomaganie (E_s)):

- i – indeks charakterystyki aktywacji przekształtnika hamulca,
- j – indeks charakterystyki zasobnika,
- k – indeks pozycji zasobnika.

W przypadku wystąpienia więcej niż jednej kombinacji spełniającej warunek, listowane są wszystkie z nich.

****Min. energii strat linii wynosi (El)**:** 92.56 MJ

$i=1, j=11, k=1$ % Współrzędne przeszukania

Edump: 3650.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]

x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]

Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]

Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

****Min. energii strat chopperów wynosi (Ed)**:** 384.04 MJ

$i=1, j=11, k=1$ % Współrzędne przeszukania

Edump: 3650.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]

x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]

```

Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]
Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]
**Maks. energii dostarczonej przez zasobnik wynosi (Es)**: 313.17 MJ
    i=1, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania
Edump: 3650.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]
x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]
Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]
Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]
**Maks. energii odzyskanej przez zasobnik wynosi (Er)**: -366.81 MJ
    i=1, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania
Edump: 3650.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]
x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]
Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]
Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

```

Widoczna, zgodna z intuicją, jest zależność dążąca do umieszczenia zasobnika w środku linii. W analizowanym przypadku jest to pozycja x równa 14,5 kilometrowi linii (tj. w okolicach węzła sekcyjnego). Straty w rezystorach hamowania związane są z ze zmianami prędkości, więc zależą wyłącznie od trajektorii linii i synchronizacji wzajemnego ruchu pojazdów. Straty dystrybucji energii z podstacji do pojazdu rosną z dystansem.

Na podstawie przedstawionych wyników można dostrzec, że wykorzystanie zasobnika o odpowiednio dobranej lokalizacji i charakterystyce jest w stanie ograniczyć rozpraszanie energii na elementach stratnych tj. rezystory przekształtników hamowania oraz rezystancja linii. Jest to przesłanka, która pozwala potwierdzić założoną hipotezę o optymalizacyjnym wpływie przytorowych zasobników na poprawę parametrów zasilania linii trakcyjnej (w tym przypadku strat całkowitych). Porównując dane z przypadku pierwszego i drugiego, można zestawić tabelarycznie porównanie (tabela 6-9):

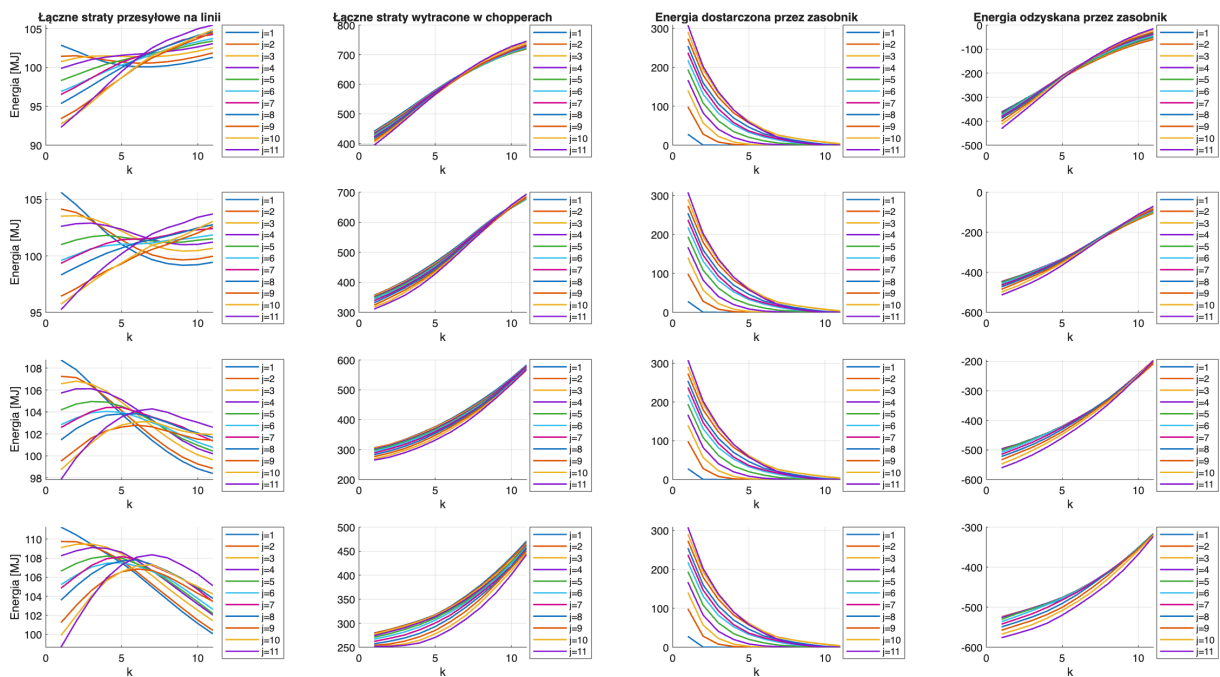
Tabela 6-9 Porównanie przypadków pierwszego (#1) oraz przypadku drugiego (#2).

	Przypadek #1	Przypadek #2 (11)	Różnica
Całkowite straty systemu	844 MJ	477 MJ	367 MJ (-43%)
Energia odzyskana przez zasobnik	-	367 MJ (102 kWh)	-

Dzieląc średnią wartość energii wymienionej z zasobnikiem przez 10 cykli aktywnego hamowania, które wydarzyły się w modelowanym przejeździe (rysunek 6-2), otrzymujemy szacowaną średnią minimalną wielkość energii użytecznej dla jednego zasobnika wynoszącą 10,2 kWh (przy założeniu możliwości całkowitego rozładowania po cyklu ładowania).

Przypadek trzeci

Przypadek trzeci (#3) stanowi połączenie dwóch omówionych poprzednio przypadków ze zmodyfikowanym zakresem przeszukania tj. zwiększoną siatką przeszukania wynoszącą łącznie 924 punkty. Zwiększenie rozmiaru siatki związane jest z dodaniem czterech dodatkowych kroków zmiany nastawy parametru aktywacji przekształtnika hamowania (E_{dump}) w przyjętym zakresie przeszukania. Tabela 6-8 przedstawia pozostałe iterowane parametry wraz z ich zakresem zmienności. Rysunek 6-7 przedstawia wynik zestawień energii rozproszonej i wymienionej w przypadku trzecim w formie charakterystyk. Każdy wiersz na rysunku odpowiada kolejnej wartości przeszukania po zmiennej (E_{dump}). Podobnie jak poprzednio aktywny jest jeden, pierwszy zasobnik.



Rysunek 6-7 Wynik symulacji poszukiwania minimum energii strat dla trzeciego przypadku (#3) tj. trójwymiarowego przeszukania po napięciu aktywacji przekształtników hamowania, charakterystyce zasobnika oraz pozycji zasobnika (liczba aktywnych zasobników: 1; i – przeszukanie po napięciu aktywacji przekształtników hamowania (kolejno w wierszach); j – przeszukanie charakterystyce zasobnika, k – przeszukanie po pozycji zasobnika) - iteracje w postaci oddzielnych charakterystyk dla i, j oraz k .

Przedstawiony poniżej listing algorytmu przeszukania dla przypadku trzeciego (#3) zwraca współrzędne indeksów i , j , k oraz odpowiadające im kombinacje parametrów przeszukania dla których osiągnięto minima wartości energii strat (wartości energii rozproszonych w linii (E_l), rezystorach hamowania (E_d)) oraz maksima energii wymienionych z zasobnikami (energii ładowania (E_r), energii wspomagania (E_s)):

- i – indeks charakterystyki aktywacji przekształtnika hamulca,
- j – indeks charakterystyki zasobnika,
- k – indeks pozycji zasobnika.

W przypadku wystąpienia więcej niż jednej kombinacji spełniającej warunek, listowane są wszystkie z nich.

****Min. energii strat linii wynosi (El)**:** 92.29 MJ

i=1, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania

Edump: 3650.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]

x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]

Esupp: 3395.00. % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]

Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

****Min. energii strat hamulca wynosi (Ed)**:** 251.81 MJ

i=4, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania

Edump: 3900.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]

x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]

Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]

Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

****Maks. energii dostarczonej przez zasobnik wynosi (Es)**:** 313.17 MJ

(1)

i=1, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania

Edump: 3650.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]

x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]

Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]

Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

(2)

i=2, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania

Edump: 3733.33 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego [V]

x: 14.50 % Pozycja zasobnika [km]

Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]

Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

(3)

i=3, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania

Edump: 3816.67 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego

x: 14.50 % Pozycja zasobnika

Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]

Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

(4)

i=4, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania

```

Edump: 3900.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego
x: 14.50 % Pozycja zasobnika
Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]
Echrg: 3605.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]
**Maks. energii odzyskanej przez zasobnik wynosi (Er)**: -499.22 MJ
i=4, j=11, k=1 % Współrzędne przeszukania
Edump: 3900.00 % Napięcie aktywacji przekształtnika hamulca pojazdowego
x: 14.50 % Pozycja zasobnika
Esupp: 3395.00 % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie wsparcia [V]
Echrg: 3605.00. % Napięcie aktywacji zasobnika w trybie rekuperacji [V]

```

Na podstawie danych zawartych w listingu widać, że funkcja minimalizująca wyszukała rozwiązanie podobne do poprzedniego, drugiego przypadku dla minimalizacji strat linii (E_l). W przypadku strat w rezystorach hamowania (E_d) ograniczyła ich działanie górną, graniczną charakterystyką (E_{dump}), co jest słuszne zostawiając przestrzeń dla działania zasobnika na potrzeby wymiany energii z pojazdami (charakterystyka E_{chrg} , $E_{chrg,max}$ została rozciągnięta i utrzymana blisko dolnej granicy zakresu przeszukania). Obecność zasobnika na 14,5 kilometrze ($x_{E,1}$) uzasadniona jest obecnością pobliskich przystanków oraz największymi stratami linii w przypadku dostarczania energii do tego punktu z odległych podstacji. Podsumowanie parametrów i wyników przedstawiono w tabeli 6-10.

Tabela 6-10 Podsumowanie parametrów i wyników dla optymalnego scenariusza $i=4, j=11, k=1$ w analizie przypadku trzeciego (#3).

Nazwa	Symbol	Zakres przeszukania	Jednostka
Próg aktywacji	E_{dump}	3900	V
	E_{supp}	3395	V
	$E_{supp,min}$	3295	V
	E_{chrg}	3605	V
	$E_{chrg,max}$	3705	V
	$x_{E,1}$	14,5	V
	E_l	92	MJ
	E_d	252	MJ
	E_s	313	MJ
	E_r	499	MJ

W przeszukaniu nie ma kryterium ograniczenia pojemności. Założenie jest celowe, pozwala bowiem na wyliczenie spodziewanej energii użytecznej wymienionej z zasobnikiem, która pozwoli zrealizować funkcję celu dla wybranych parametrów. Stosując analogię szacowania minimalnej pojemności użytecznej z poprzednich przykładów (10 aktywnych cykli), pojemność zasobnika dla tego przykładu powinna wynosić 13,9 kWh.

Zestawienie wartości energii odzyskanej (E_r) z tabeli 6-10 względem 844 MJ energii całkowitej strat systemu wyznaczonych w analizie przypadku pierwszego, wynika, że dzięki zastosowaniu przytorowego zasobnika energii ograniczono straty o 60%. Wobec powyższego przeszukanie siatki daje zadowalające i zgodne z intuicją wyniki na potrzeby optymalizacji z już z rzadką siatką punktów. Pozwala wstępnie ocenić lokalizację, optymalną charakterystykę oraz oczekiwaną pojemność zasobnika.

W przypadku bardziej kompleksowej lub gęstszej siatki proces przeszukania znacząco się wydłuża. Wymaga to optymalizacji pod względem liczby wymaganych iteracji. Autor proponuje uzupełnienie rozwiązania poprzez dodanie metody Monte Carlo w celu wstępnej selekcji kandydatów, dopiero następnie za pomocą wcześniej opisanego przeszukania współrzędnych siatki zawęzić wynik dla interesujących obszarów.

Przypadek czwarty

Przypadek czwarty (#4) reprezentuje algorytm przeszukania bazujący na algorytmie Monte Carlo z wykorzystaniem generatora liczb pseudolosowych środowiska MATLAB. Generuje on wszystkie zmienne parametry poprzez ich losowy wybór w określonym zakresie zmienności parametrów. Tabela 6-11 przedstawia listę parametrów, ograniczenia zakresu oraz zależności funkcjonalne między wielkościami (tj. relacja progów aktywacji i dezaktywacji, itp.).

Zasadniczą różnicą przypadku czwartego (#4) względem poprzednio omawianych jest dodanie do przeszukania kombinacji wszystkich czterech zasobników i ich położeń, przy zachowaniu podobnej złożoności obliczeniowej jak dla przypadku trzeciego. Przedstawione jest to symbolicznie na poniższym listingu:

```
N = 1000; % (1), liczba iteracji

lo = 3650; hi = 3850; % Ograniczenie zmienności choppera

VECH_VALS_DUMP = lo + (hi - lo) * rand(1,N); % (2), próg aktywacji choppera

lo = 0.1; hi = 14.9; % Ograniczenia zmienności położenia

ESS_POS_VALS_1 = lo + (hi - lo) * rand(1,N); % (3), pozycja zasobnika 1 między węzłami
ESS_POS_VALS_2 = lo + (hi - lo) * rand(1,N); % (4), pozycja zasobnika 2 między węzłami
ESS_POS_VALS_3 = lo + (hi - lo) * rand(1,N); % (5), pozycja zasobnika 3 między węzłami
ESS_POS_VALS_4 = lo + (hi - lo) * rand(1,N); % (6), pozycja zasobnika 4 między węzłami

lo = 3605; hi = 3900; diff = 20; % Ograniczenia zmienności rekuperacji

ESS_VALS_CHG = lo + (hi - lo - diff) * rand(1,N); % (7), próg aktywacji rekuperacji
ESS_VALS_MAX = ESS_VALS_CHG + diff + ...
    (hi - ESS_VALS_CHG - diff) .* rand(1,N); % (8), maks. charakterystyki rekuperacji

lo = 3200; hi = 3595; diff = 20; % Ograniczenia zmienności wsparcia

ESS_VALS_MIN = lo + (hi - lo - diff) * rand(1,N); % (9), próg minimum wsparcia
ESS_VALS_SUP = ESS_VALS_MIN + diff + ...
```

```
(hi - ESS_VALS_MIN - diff) .* rand(1,N); % (10), próg aktywacji wspomaganie
ESS_ENA = randi([0 1], 4, N); % 11, 12, 13, 14 % (11)-(14), aktywny / nieaktywny zasobnik
```

Tabela 6-11 Parametry przeszukania metodą Monte Carlo

	Zakres przeszukania	Jednostka	Zmienna listingu
E_{supp}	[3220; 3595]	V	ESS_VALS_SUP
$E_{supp,min}$	[3200; 3575], < $E_{supp} - 20$	V	ESS_VALS_MIN
E_{chrg}	[3605; 3880]	V	ESS_VALS_CHG
$E_{chrg,max}$	[3625; 3700], ≥ -20	V	ESS_VALS_MAX
E_{dump}	[3650; 3850]	V	VEH_VALS_DUMP
$x_{E,n}^*$	[0,1; 14,9]	km	ESS_POS_n
$b_{E,n}^{**}$	[prawda; fałsz]		ESS_ENA

* - względem poprzedzającego węzła stałego

** - czy dany zasobnik jest aktywny (min: 0, max: 4)

Tabela 6-13 przedstawia dwudziestu najlepszych spośród tysiąca kandydatów wraz z odpowiadającymi im zestawami parametrów, którzy osiągnęli najbardziej satysfakcjonujące wyniki pod względem ograniczania energii strat w modelowanym systemie. Widocznym jest, że kandydat indeksowany nr 739 znacząco redukuje straty w porównaniu z pierwszym i drugim przypadkiem omawianym w tym rozdziale (patrz porównanie w tabeli 6-12). Różnica wynika głównie z możliwości dodania kolejnego zasobnika. Widać, że pozostałe parametry są zbieżne z poprzednimi przypadkami. Istotnym jest również, że optymalny przypadek wymagał jedynie dwóch z czterech dostępnych zasobników. Ich całkowita użyteczna pojemność powinna wynosić 12,3 kWh każdy. Można także zaobserwować prawie całkowitą eliminację konieczności używania przekształtników hamowania.

Tabela 6-12 Porównanie przypadku #1 oraz najlepszego kandydata z metody Monte Carlo.

	Przypadek #1	Przypadek #4 (dla kandydata 739)	Różnica
Całkowite straty systemu	844 MJ	85,5 MJ	758,5 MJ (-89%)
Energia wymieniona z zasobnikiem	-	885 MJ	-

Tabela 6-13 Zestawienie 20 najlepszych kandydatów pod względem minimalizacji strat w rezystorach pokładowych przekształtników hamowania.

#	E_{dump}	$x_{E,1}$	$x_{E,2}$	$x_{E,3}$	$x_{E,4}$	E_{chrg}	$E_{chrg,max}$	$E_{supp,min}$	E_{supp}	$b_{E,1}$	$b_{E,2}$	$b_{E,3}$	$b_{E,4}$	$E_l[MJ]$	$E_d[MJ]$	$E_s[MJ]$	$E_r[MJ]$
739	3834,5	7,26	13,65	1,88	2,12	3632,2	3681,3	3513,9	3568,0	1	0	1	0	83,7	1,8	375,6	-885,1
117	3777,2	6,79	6,33	5,73	5,42	3609,3	3630,9	3564,9	3592,7	1	0	1	1	62,0	4,6	938,5	-939,6
238	3789,3	3,90	4,86	11,11	11,91	3621,9	3649,9	3243,6	3424,4	1	0	1	0	101,2	5,9	11,6	-880,2
986	3812,9	7,65	7,31	7,04	13,52	3636,1	3703,3	3515,1	3559,6	1	1	1	0	79,5	7,6	376,1	-878,9
246	3848,0	10,04	7,35	3,74	7,22	3641,9	3775,6	3547,3	3587,8	1	1	0	0	71,1	11,9	760,3	-867,0
20	3846,5	7,38	7,79	14,62	0,34	3654,5	3699,5	3397,5	3429,9	1	1	0	1	111,0	12,2	5,9	-829,2

313	3836,2	10,84	7,09	3,00	13,56	3690,1	3716,3	3494,0	3574,2	1	1	1	0	83,4	12,5	371,3	-847,1
298	3824,8	1,44	14,30	1,34	6,42	3605,9	3720,5	3515,3	3554,1	1	1	1	0	95,6	14,0	170,5	-870,2
798	3845,8	8,26	9,11	0,99	11,29	3696,7	3754,7	3572,5	3593,3	1	1	0	0	73,2	16,2	893,9	-854,1
549	3824,2	12,40	8,79	0,17	2,05	3682,5	3706,4	3437,6	3467,0	1	1	0	1	97,6	16,4	62,4	-833,8
419	3806,0	8,69	10,45	6,38	2,55	3660,1	3692,3	3453,9	3485,3	1	0	0	1	91,1	19,7	127,7	-860,2
427	3828,1	11,95	1,11	1,36	3,90	3613,4	3726,8	3319,8	3497,7	1	0	1	0	101,2	19,8	66,8	-845,0
495	3784,7	6,93	8,27	11,44	10,16	3613,9	3711,8	3495,6	3577,5	1	1	0	1	73,0	23,3	514,0	-872,7
687	3837,9	11,95	7,70	7,48	12,87	3621,0	3754,2	3370,0	3392,2	1	0	0	1	104,3	25,1	5,8	-839,2
83	3770,4	0,93	12,69	13,94	10,35	3613,1	3664,9	3393,5	3527,2	1	1	1	1	95,4	26,0	98,2	-859,4
160	3804,4	3,37	2,14	10,58	13,10	3670,7	3693,7	3347,3	3464,7	1	0	0	0	100,7	26,2	26,3	-833,9
148	3794,2	5,93	0,15	4,07	4,07	3620,3	3668,8	3235,7	3442,8	1	1	1	0	102,5	27,6	14,0	-857,8
940	3801,3	7,74	11,69	0,13	12,19	3610,2	3763,9	3315,8	3542,0	1	0	0	1	99,5	29,3	65,3	-837,1
348	3849,9	4,81	12,35	13,82	3,27	3667,0	3788,2	3282,5	3392,8	1	1	1	1	108,1	30,7	2,5	-810,9
701	3837,9	12,68	9,57	7,14	3,90	3620,8	3798,2	3369,0	3484,1	1	1	1	1	97,0	35,7	88,3	-825,8

E_t – energia całkowitych strat w liniach przesyłowych systemu, w MJ.

E_d – energia całkowitych strat w przekształtnikach hamowania systemu, w MJ.

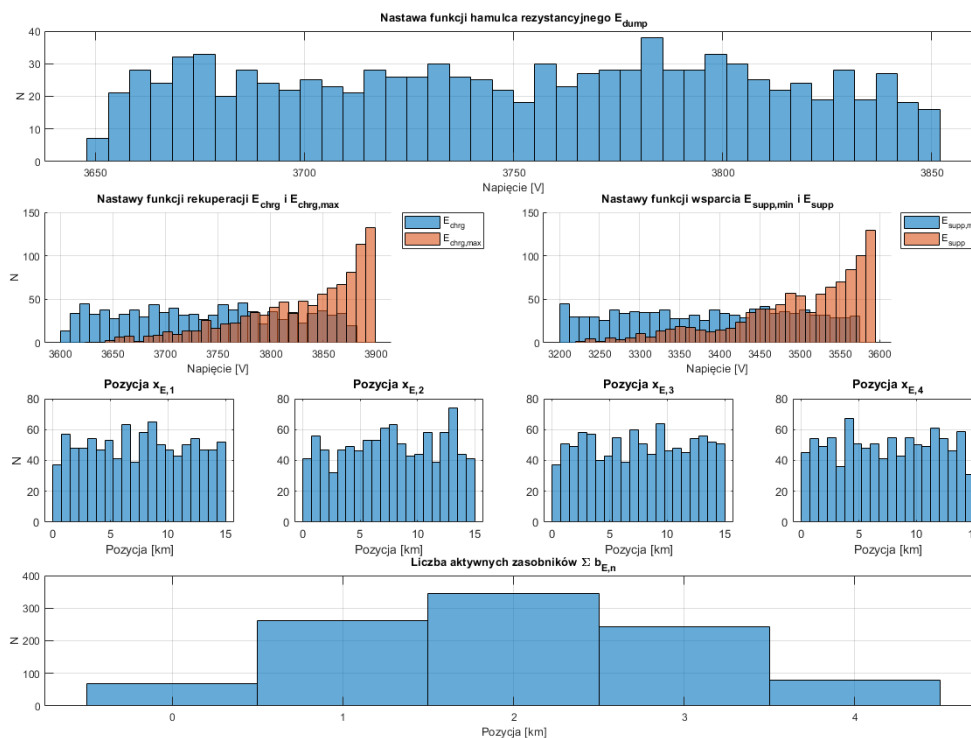
E_s – energia całkowita przekazana z zasobników (funkcja wsparcia) systemu, w MJ.

E_r – energia całkowita przekazana z zasobników (funkcja rekuperacji) systemu, w MJ.

Rysunek 6-8 prezentuje histogramy podsumowujące liczbę wartości mieszczących się w określonych przedziałach, uzyskanych z wykorzystaniem metody Monte Carlo. Algorytm został skonstruowany w taki sposób, aby każdy zestaw parametrów był unikatowy, tj. różnił się co najmniej jedną wartością dla każdego z tysiąca założonych zestawów.

Dla parametrów E_{dump} , E_{chrg} , $E_{supp,min}$ rozkład można uznać za względnie równomierny w przyjętym zakresie przeszukiwania. Z kolei dla parametrów $E_{chrg,max}$ oraz E_{supp} widoczne jest przesunięcie w stronę górnych granic, co wynika z wymuszonego przez algorytm zachowania relacji względem pozostałych progów napięciowych definiujących charakterystykę zasobnika. Dla parametru $b_{E,n}$ największa liczba przypadków dotyczyła dwóch aktywnych zasobników, co wynikało z założenia równego prawdopodobieństwa dla każdej kombinacji. Łącznie daje to sześć kategorii, z których kombinacje z dwoma zasobnikami są najliczniejsze, a więc i najbardziej prawdopodobne.

Można zatem stwierdzić, że w metodzie Monte Carlo parametry wejściowe zostały poprawnie zrównoważone, a rozkłady odpowiadają przyjętym kryteriom równości i zakresom zmienności.



Rysunek 6-8 Zestawienie histogramów podsumowujących dystrybucję parametrów wprowadzanych do algorytmu z metodą Monte Carlo.

Analiza macierzy korelacji Pearsona (tabela 6-14), wyznaczonej dla zmiennych z tabeli 6-11 i wyników uzyskanych w 1000 iteracji, pozwala na sformułowanie kilku kluczowych wniosków. Wartości współczynników mieszczą się w przedziale od -1 do 1, gdzie:

- 1 oznacza pełną korelację dodatnią,
- -1 pełną korelację ujemną,
- 0 brak liniowej korelacji.

Macierz ujawnia m.in. silną korelację pomiędzy parami E_{chrg} , $E_{chrg,max}$, oraz E_{supp} , $E_{supp,min}$, co jest zgodne z konstrukcją modelu, w którym te parametry współdefiniują progi charakterystyki zasobnika. Liczba aktywnych zasobników $\Sigma b_{E,n}$ istotnie wpływa na ograniczanie strat linii (E_l , E_d) oraz na zwiększenie wymiany energii podczas wsparcia (E_s) i rekuperacji (E_r).

Ponadto wyższe progi E_{supp} i $E_{supp,min}$ ograniczają przede wszystkim straty przesyłowe E_l , natomiast parametry E_{chrg} i $E_{chrg,max}$ redukują straty związane z rezystancyjnym hamowaniem pojazdów (E_d). Ma to również miejsce w przypadku zwiększania nastawy zadziałania pokładowego hamulca rezystancyjnego E_{dump} . Warto jednak zaznaczyć, że korelacja dla tego przypadku osiągnęła mniejszą wartość niż oczekiwano.

Brak silnych korelacji pomiędzy większością pozostałych parametrów wejściowych wskazuje, że algorytm nie optymalizuje po zmiennych wzajemnie zależnych, co potwierdza poprawność konstrukcji przeszukiwania.

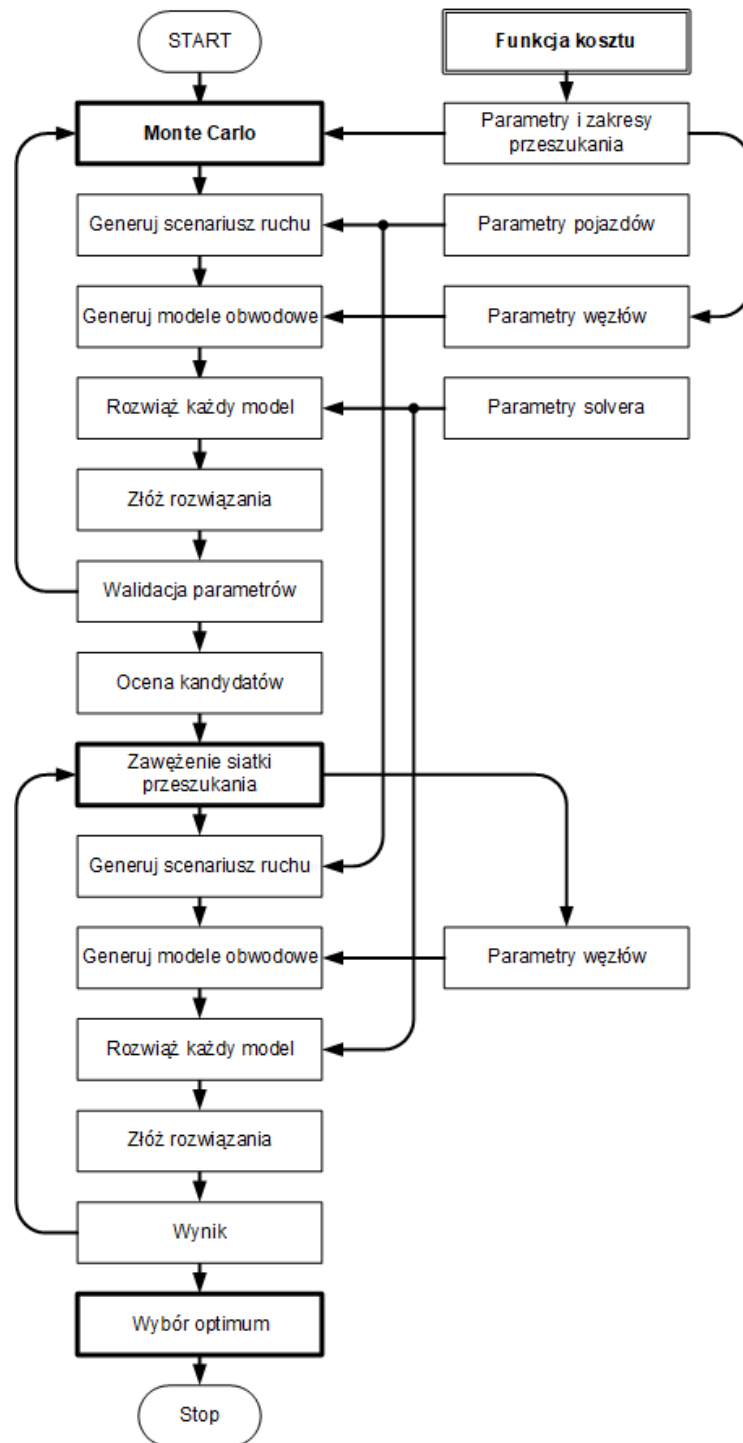
Tabela 6-14 Macierzy korelacji Pearsona dla zmiennych i wyników uzyskanych w metodzie Monte Carlo.

	E_{klump}	x_{E1}	x_{E2}	x_{E3}	x_{E4}	E_{chrg}	$E_{chrgmax}$	$E_{suppmtn}$	E_{suppp}	Σb_{En}	E_l	E_d	E_s	E_r
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1,00	0,00	0,04	-0,04	-0,02	0,04	0,02	0,04	0,05	0,02	-0,07	-0,19	0,08	-0,17
2	0,00	1,00	-0,05	0,02	-0,02	-0,04	-0,01	-0,01	0,01	0,00	-0,01	0,01	0,03	0,02
3	0,04	-0,05	1,00	0,00	0,02	-0,02	0,04	-0,01	0,01	0,04	-0,01	0,01	-0,02	0,00
4	-0,04	0,02	0,00	1,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,01	0,00	-0,04	0,05	0,06	-0,01	0,07
5	-0,02	-0,02	0,02	0,00	1,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	-0,01	0,00	-0,03	-0,01
6	0,04	-0,04	-0,02	-0,01	0,01	1,00	0,64	-0,03	0,01	-0,06	-0,05	0,40	-0,01	0,39
7	0,02	-0,01	0,04	-0,02	0,01	0,64	1,00	-0,02	0,03	-0,01	-0,02	0,32	-0,01	0,32
8	0,04	-0,01	-0,01	-0,01	0,02	-0,03	-0,02	1,00	0,66	0,01	-0,33	-0,01	0,45	-0,01
9	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,66	1,00	0,01	-0,36	-0,03	0,45	-0,03
10	0,02	0,00	0,04	-0,04	0,01	-0,06	-0,01	0,01	0,01	1,00	-0,39	-0,43	0,26	-0,44
11	-0,07	-0,01	-0,01	0,05	-0,01	-0,05	-0,02	-0,33	-0,36	-0,39	1,00	0,55	-0,88	0,58
12	-0,19	0,01	0,01	0,06	0,00	0,40	0,32	-0,01	-0,03	-0,43	0,55	1,00	-0,44	1,00
13	0,08	0,03	-0,02	-0,01	-0,03	-0,01	-0,01	0,45	0,45	0,26	-0,88	-0,44	1,00	-0,46
14	-0,17	0,02	0,00	0,07	-0,01	0,39	0,32	-0,01	-0,03	-0,44	0,58	1,00	-0,46	1,00

Podsumowując, metoda Monte Carlo umożliwiła identyfikację najlepszych kandydatów (np. jak w tabeli 6-13). Kolejnym krokiem była analiza korelacji Pearsona, która pozwoliła:

- ocenić zależności pomiędzy parametrami wejściowymi a wynikami,
- wskazać możliwość eliminacji nadmiarowych zmiennych,
- zidentyfikować kierunki dalszych zmian parametrów.

W oparciu o te wyniki zaproponowano przeprowadzenie analizy deterministycznej w zawężonym zakresie metodą przeszukiwania siatki, aby potwierdzić uzyskane wnioski. Sekwencję działań poglądowo przedstawiono na rysunku 6-9. Należy przypomnieć, iż proponowany proces można stosować dla funkcji kosztu uwzględniających inne dostępne dane wyjściowe solwera, co omówiono w rozdziale 6.1.



Rysunek 6-9 Poglądowy diagram sekwencji działań w procesie optymalizacji.

7. Analiza komercyjnej realizacji systemu

Modele matematyczne i numeryczne przedstawione w rozdziałach 5 i 6 zostały wykorzystane do analizy rzeczywistej realizacji komercyjnego systemu przytorowego zasobnika energii opartego na modułach superkondensatorowych. Projekt ten został zrealizowany dla klienta podmiotu zatrudniającego autora, a przyjęta topologia systemu oraz parametry pracy odpowiadają rzeczywistym założeniom wdrożonej instalacji w systemach kolei 3000 V DC.

Podstawą funkcjonowania większej części przetwornic DC/DC wysokiej mocy są algorytmy sterowania typu feed-forward, których teoretyczne podstawy omówiono w rozdziale 4. Zastosowanie tego podejścia umożliwiło zachowanie wysokiej stabilności pracy układu oraz zapewniało optymalną wymianę energii w stanach dynamicznych, szczególnie w sytuacjach szybkich zmian zapotrzebowania mocy przez system trakcyjny.

Ze względu na formalne ograniczenia wynikające z charakteru komercyjnego projektu oraz powiązanych z nim prac wdrożeniowych, autor nie może przedstawić pełnych szczegółów technicznych implementacji ani parametrów pracy całego systemu. Niemniej jednak, przedstawione w niniejszym rozdziale analizy i wnioski mają charakter reprezentatywny i ukazują praktyczne znaczenie zastosowanych modeli oraz metod sterowania. Pokazują także faktyczny udział autora w procesie projektowania, modelowania i wdrażania rozwiązań, które znalazły zastosowanie w rzeczywistym środowisku eksploatacyjnym.

Dodatkowym potwierdzeniem zasadności prowadzonych badań jest fakt, że znalazły już zastosowanie w praktyce. W 2022 roku we Forlì (Włochy) uruchomiono instalację przytorowego zasobnika energii opartego na superkondensatorach, zintegrowaną ze stacją zasilania linii kolejowej relacji Bologna–Rimini. Była to pierwsza w Europie realizacja tego typu dla sieci trakcyjnej 3000 V DC, co podkreśla pionierski charakter projektu i wskazuje na realny potencjał technologii superkondensatorowych w systemach transportu szynowego [60]. Autor odpowiadał za techniczną część wspomnianej realizacji w obszarze związanym z zagadnieniami energoelektronicznymi oraz magazynami energii. Rysunek 7-1 przedstawia konwerter DC/DC wraz z superkondensatorowym magazynem energii w formie wózka oraz podstawowe parametry eksploatacyjne.

Na podstawie obserwacji autora oraz analizy rozkładów jazdy stwierdzono, że linia ta obsługuje mieszany ruch pasażersko-towarowy, w którym występuje kombinacja lokalnych pojazdów typu EMU oraz dalekobieżnych składów dużych prędkości, takich jak ICE. Typowa prędkość serwisowa wynosi około 120 km/h. W godzinach szczytu odstęp pomiędzy kolejnymi pociągami (headway) potrafi wynosić zaledwie 5 minut, natomiast poza szczytem mieści się zwykle w przedziale 15–30 minut. Linia jest eksploatowana w trybie całodobowym, przy czym w godzinach nocnych dominują pociągi towarowe.



Technical data	Enviline ESS 750	Enviline ESS 1500	Enviline ESS 3000
Nominal voltage	750 VDC	1500 VDC	3000 VDC
Rated system voltage	900 VDC	1800 VDC	3600 VDC
Rated system power	1.35 / 2.7 MW	2.6 / 5.2 MW	2.1 MW
Rated system current	1800 / 3600 ADC	1740 / 3480 ADC	580 ADC
Converter width	2000 / 3000 mm	2200 / 3200 mm	2200 mm
Converter depth	1600 mm	1600 mm	1600 mm
Converter height	2300 mm	2300 mm	2300 mm
Converter weight	2500 / 4000 kg	2700 / 4400 kg	4000 kg
Duty cycle class	I-X / IEC 62924:2017*	I-X / IEC 62924:2017*	I-X / IEC 62924:2017*
Earthing	acc. to IEC 61992-7-1 / IEEE 1653.6	acc. to IEC 61992-7-1 / IEEE 1653.6	acc. to IEC 61992-7-1 / IEEE 1653.6
Installation	Indoor / Container	Indoor / Container	Indoor / Container
Operating temperature	up to 40°C*	up to 40°C*	up to 40°C*
Degree of protection	NEMA 2 / IP 21*	NEMA 2 / IP 21*	NEMA 2 / IP 21*
Remote access	TCP/IP / RS485 (Modbus) / DNP 3*	TCP/IP / RS485 (Modbus) / DNP 3*	TCP/IP / RS485 (Modbus) / DNP* 3*
SCADA output	4 contacts*	4 contacts*	4 contacts*
Standards and tests	IEC 62924:2017	IEC 62924:2017	IEC 62924:2017
Energy Storage (EDLC)			
Rated energy up to	25.3 kWh / 91.2 MJ	33.8 kWh / 121.6 MJ	33.8 kWh / 121.6 MJ
Rated energy per panel	2.1 kWh / 7.6 MJ	2.1 kWh / 7.6 MJ	4.2 kWh / 15.2 MJ
Panel dimension (WxDxH)	600x1600x2300 mm	600x1600x2300 mm	1200x1600x2300 mm
Panel weight	1100 kg	1100 kg	2200 kg
Energy Storage (Li-ion battery)**			
Rated energy	100 kWh – 2500 kWh	100 kWh – 2500 kWh	100 kWh – 2500 kWh

Rysunek 7-1 Eviline ESS – Energy Storage System (źródło: abb.com)

W ramach prac realizowanych z udziałem autora przeprowadzono testowy przejazd na obiekcie komercyjnym w celu weryfikacji współpracy przytorowego zasobnika energii w warunkach kontrolowanych. Sekcja zasilana była równolegle z dwóch sąsiadujących podstacji (w tym jednej z prostownikiem aktywnym), pojedynczego zasobnika superkondensatorowego – zgodnie z konfiguracją przyjętą w modelu z rozdziału 5 – oraz jednego pojazdu trakcyjnego.

Dane pomiarowe, przedstawione na rysunku 7-2, pochodziły z rejestratora pokładowego pojazdu klasy ETR 421/521/621 Rock [82]. Rejestracja odbywała się z krokiem czasowym 1 s, a pozycja była wyznaczana na podstawie sygnału GPS. Napięcie i prąd na odbieraku rejestrowano jako wartości całkowite. Ze względu na brak informacji o dokładności aparatury pomiarowej, dane należy traktować jako pogładowe.

Analiza wskazuje, że pojazd wjechał na badaną sekcję z prędkością ok. 160 km/h i po 115 s zatrzymał się na pozycji 3,3 km (średnie opóźnienie wynosiło $0,55 \text{ m/s}^2$). Po 75-sekundowym postoju ruszył, osiągając ponownie prędkość 160 km/h w czasie 330 s (średnie przyspieszenie wynosiło $0,32 \text{ m/s}^2$). W 440 s rozpoczął hamowanie, zatrzymując się po 550 s w punkcie 14,5 km, gdzie postój trwał 125 s. Kolejny odcinek zakończył się zatrzymaniem na pozycji 22,6 km (czas 940 s). Ostatnia faza obejmowała przyspieszenie do prędkości maksymalnej i zatrzymanie na końcu sekcji z opóźnieniem szczytowym ok. $2,22 \text{ m/s}^2$.

Podsumowując przebieg jazdy:

- Przystanki: 3,3 km; 14,5 km; 22,6 km
- Czasy postojów: 75 s; 125 s; 250 s
- Prędkość maksymalna: 160 km/h
- Średnie przyspieszenie: $0,32 \text{ m/s}^2$
- Średnie opóźnienie: $0,55 \text{ m/s}^2$

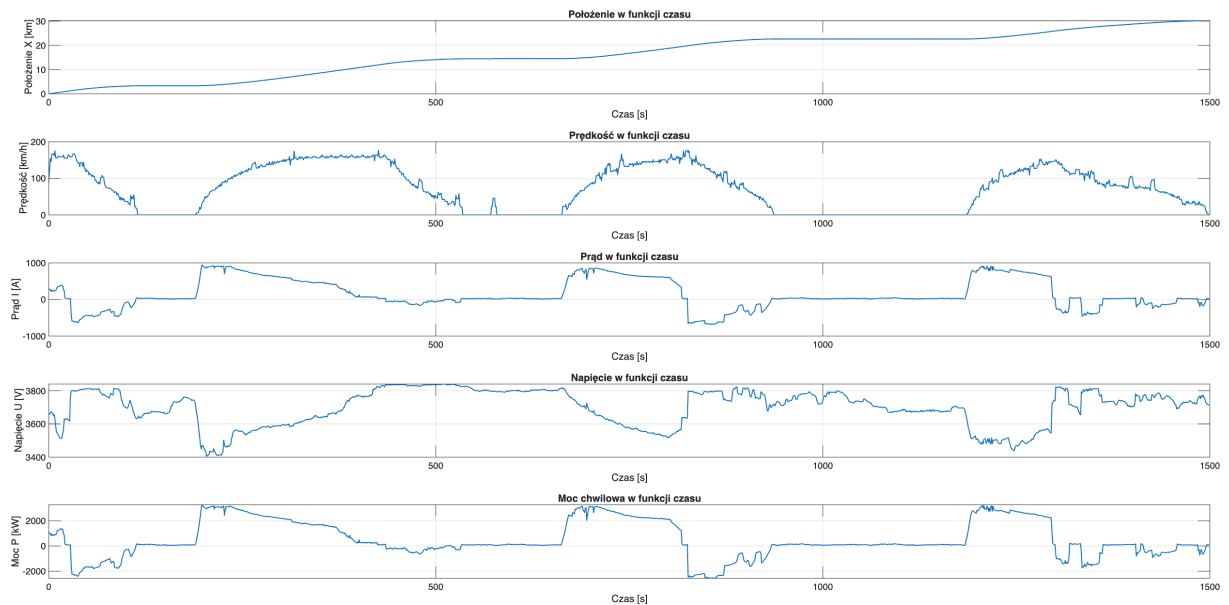
Dla dalszych obliczeń przyjęto parametry pojazdu zgodnie z [82]: masa 250 t, moc maksymalna 3 MW.

Rysunek 7-3 pokazuje wizualnie zadowalającą korelację pomiędzy przejazdem teoretycznym a rzeczywistym, przy czym wymagana była pewna korekta parametrów jezdnych (model nie zakładał parametryzacji przyspieszenia w czasie dla przejazdu teoretycznego).

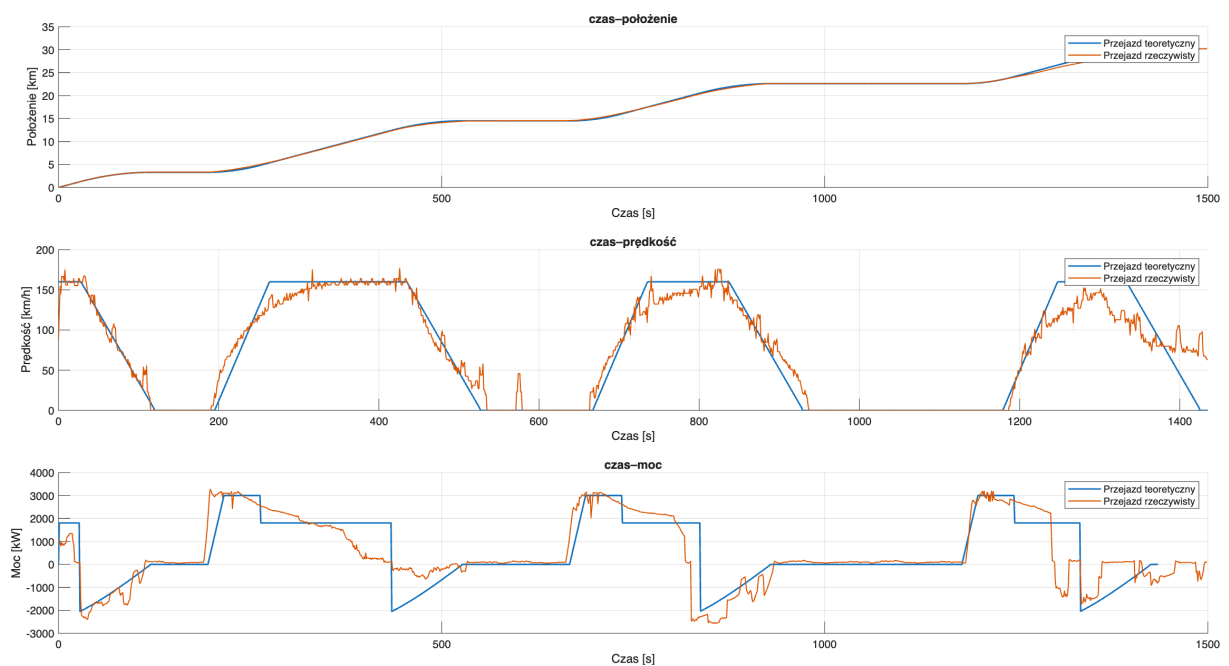
Dobór odpowiednich parametrów pojazdu może odgrywać krytyczną rolę w analizach, stąd po wykonaniu opracowania pojawiła się potrzeba identyfikacji parametrów pojazdu modelowego na podstawie rzeczywistego przejazdu, co zostało ujęte jako przyszły zakres prac (potwierdzono to w analizie odwzorowania mocy przedstawionej w tabeli 7-2).

W tabeli 7-1 przedstawiono zestaw współczynników odwzorowania drogi. Uzyskane wskaźniki błędu wskazują na bardzo wysoką zgodność trajektorii modelowej z pomiarową. Średnie błędy są marginalne, a współczynniki R^2 i NSE bliskie jedności potwierdzają poprawne odwzorowanie zarówno przebiegu, jak i zmienności.

Tabela 7-2 przedstawia w analogiczny sposób zestaw współczynników odwzorowania mocy. Uzyskane wskaźniki błędów wskazują na przeciętny poziom dopasowania mocy modelowanej z pomiarową. Przyczyną tego był brak szczegółowych danych dla lepszego dopasowania modelu pojazdu. Mimo to, w przeciwieństwie do wartości chwilowych, model dobrze odwzorował bilans energii całkowitej, co jest dobrym wskaźnikiem w przypadku określania pojemności użytecznej zasobnika.



Rysunek 7-2 Wizualizacja danych pomiarowych z rejestratora pokładowego.



Rysunek 7-3 Porównanie przejazdu teoretycznego z rzeczywistym po wprowadzeniu danych [82] do modelu.

Tabela 7-1 Zestaw współczynników odwzorowania drogi.

Wskaźnik	Symbol	Wartość	Podsumowanie
Średni błąd bezwzględny	MAE	0,1733	Średnia różnica między trajektorią pomiarową a modelową wynosi ok. 170 m.
Średni błąd kwadratowy	MSE	0,0981	Wskaźnik uwzględniający duże odchylenia, wartość potwierdza brak istotnych odstępstw.
Pierwiastek średniego błędu kwadratowego	RMSE	0,3133	Typowy błąd chwilowy wynosi ok. 310 m.
Błąd względny	RE	0,0175	Całkowity błąd odwzorowania wynosi ok. 1,8% długości przejazdu.
Współczynnik korelacji Pearsona	ρ	0,9996	Wysoka zgodność kształtu przebiegów pomiarowych i modelowych.
Współczynnik determinacji	R^2	0,9986	Model wyjaśnia 99,86% zmienności sygnału (poziom bardzo dobry).

Tabela 7-2 Zestaw współczynników odwzorowania mocy.

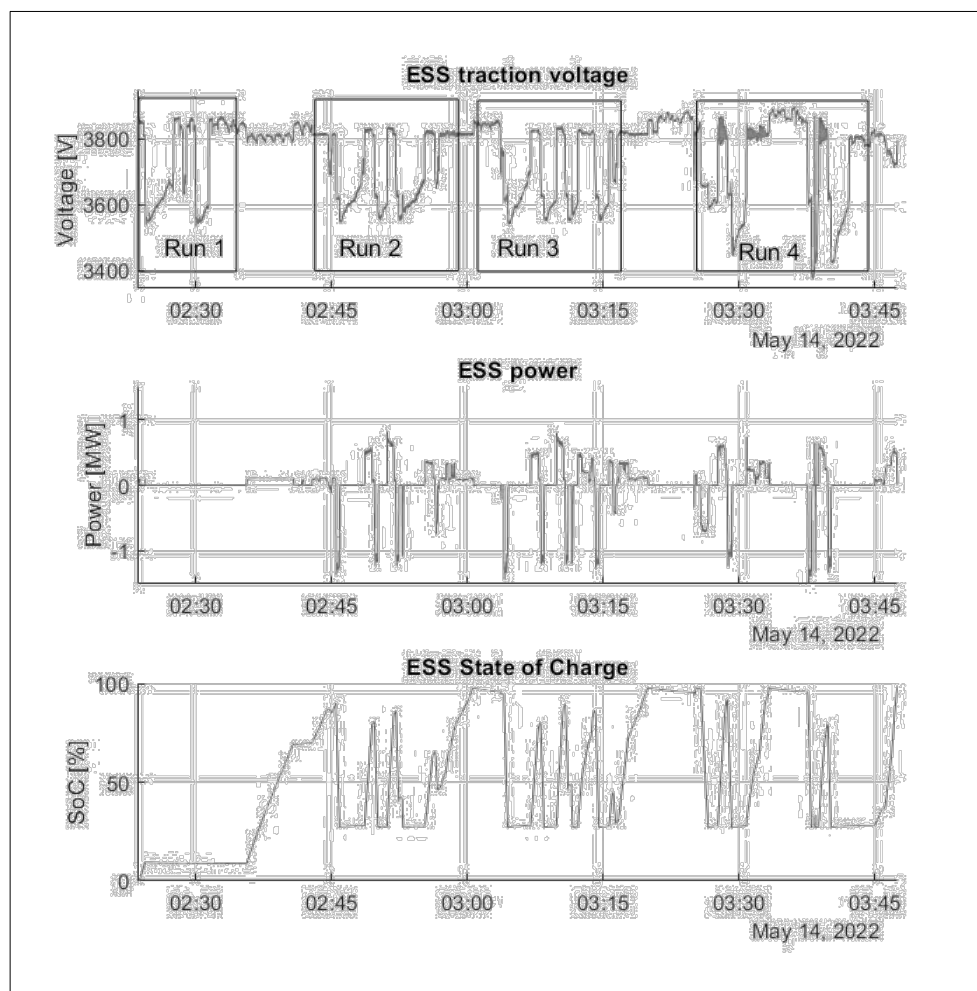
Wskaźnik	Symbol	Wartość	Podsumowanie
Średni błąd bezwzględny	MAE	512,9	Średnia różnica między mocą modelowaną a pomiarową wynosi ok. 513 kW.
Średni błąd kwadratowy	MSE	$6,95 \cdot 10^5$	Wysoka wartość wskazuje, że występują znaczące odchylenia, zwłaszcza w momentach szczytowych obciążeń.
Pierwiastek średniego błędu kwadratowego	RMSE	833,7	Typowy błąd chwilowy sięga 834 kW.
Błąd względny	RE	0,5383	Całkowity błąd odwzorowania stanowi ponad połowę wartości odniesienia, co potwierdza umiarkowaną jakość odwzorowania mocy chwilowej.
Współczynnik korelacji Pearsona	ρ	0,8295	Zależność liniowa między mocą modelowaną a pomiarową jest dobrze zauważalna.
Współczynnik determinacji	R^2	0,6676	Model wyjaśnia 67% zmienności pomiarów mocy (poziom umiarkowany).
Błąd energii całkowitej	ΔE_{energy}	2,64 %	Całkowita energia obliczona z modelu różni się od energii zmierzonej jedynie o 2,6% , co jest wynikiem bardzo dobrym.
Błąd mocy szczytowej	ΔE_{peak}	-8,39 %	Moc maksymalna w modelu była o 8,4% niższa niż w pomiarze.

Niestety ze względu na brak odpowiedniej synchronizacji pomiarów pojazdu, nie udało się autorowi dokonać stosownego porównania dla zasobnika. Ze względu na specyficzne warunki testów jego powtórzenie na funkcjonującej infrastrukturze było niemożliwe.

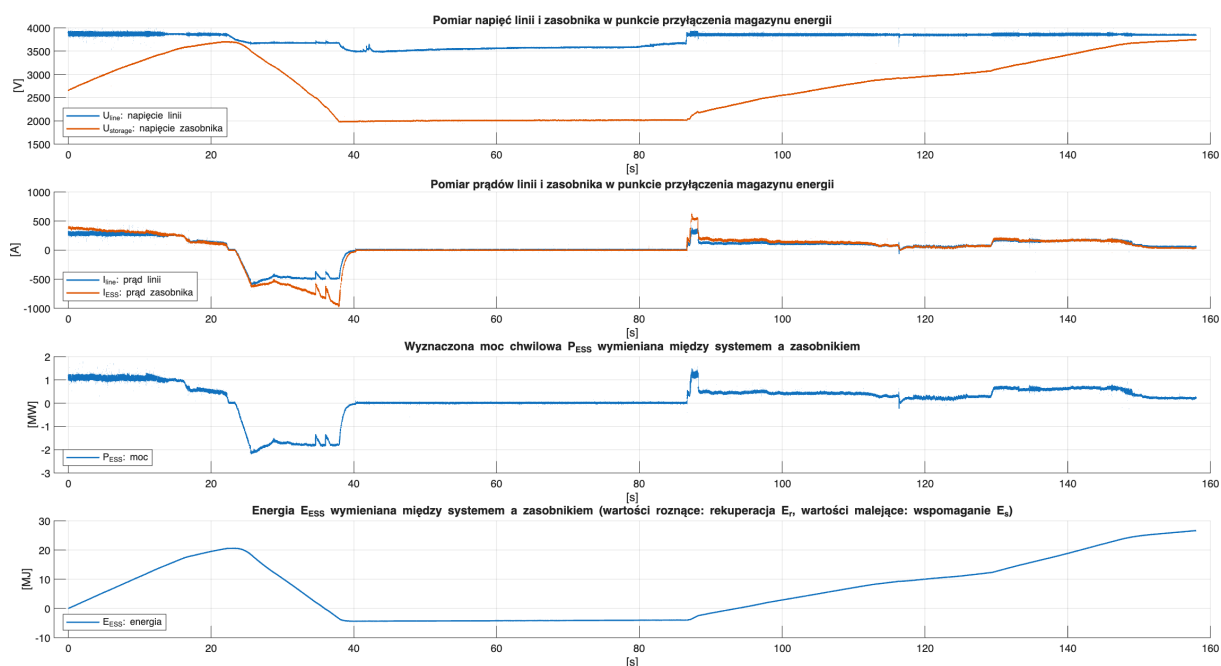
Rysunek 7-4 przedstawia rzeczywiste dane pomiarowe zarejestrowane przez superkondensatorowy zasobnik o pojemności magazynu 10 kWh oraz mocy maksymalnej 2 MW dla systemu trakcji 3000 V DC (bitmapa rejestratora wbudowanego w kontroler urządzenia). Rysunek 7-5 przedstawia dane zaimportowane z oscyloskopu wykorzystującego różnicowe sondy napięciowe oraz sondy prądowe do pomiaru napięć i prądów zarówno po stronie linii zasilającej (indeks line) jak i magazynu superkondensatorowego (indeks ESS). Pomiarzy potwierdziły poprawność działania

konwertera w odpowiedzi na zmienne napięcie w punkcie przyłączenia, zgodnie z wyznaczoną charakterystyką.

Układ prawidłowo zrealizował funkcję rekuperacji (ładowania) w sytuacji hamowania pojazdu testowego i wsparcia w przypadku przyspieszania podczas testów z taborem. Na rysunku 7-5 widoczne jest to jako przekazanie do magazynu superkondensatorowego energii 20,2 MJ (5,6 kWh) w ciągu pierwszych 23 sekund rejestracji przy napięciu linii powyżej 3900 V. W tym czasie zasobnik naładował się z napięcia 2650 V do napięcia 3700 V. Następnie pojazd przyspieszył, powodując spadek napięcia linii poniżej wartości 3670 V, co aktywowało funkcję wsparcia i przekazanie do systemu energii 29,4 MJ (8,2 kWh). Układ zablokował dalsze wsparcie po rozładowaniu magazynu do napięcia minimalnego 2000 V. Następnie w 87 sekundzie rozpoczęło się drugie, dłuższe, hamowanie powodujące naładowanie zasobnika do napięcia 3740 V, co odpowiada przyrostowi energii 30,3 MJ (8,4 kWh). Biorąc pod uwagę maksymalne napięcie pracy zasobnika wynoszące 3950 V, układ był jeszcze w stanie zgromadzić dodatkowe 1,6 kWh zanim został zablokowany po osiągnięciu pojemności maksymalnej zasobnika.



Rysunek 7-4 Zarejestrowany przebieg pracy zasobnika superkondensatorowego w trakcie testów z pojazdem (przybliżone odniesienie do Rysunku 7-2 wskazuje obszar zaznaczony Run 2) – bitmapa ekranu kontrolera magazynu.



Rysunek 7-5 Zarejestrowany przebieg pracy zasobnika superkondensatorowego w trakcie testów z pojazdem (przybliżone odniesienie do Rysunku 7-4, obszar Run 2) – pomiary oscyloskopowe.

Wyniki badań symulacyjnych znalazły bezpośrednie odniesienie w rzeczywistych projektach, takich jak opisane powyżej wdrożenie systemów podmiotu zatrudniającego. Przedstawione w artykule branżowym [83], którego auto jest współautorem, analizy dotyczyły odcinka dla podobnego przypadku w systemie sieci 1500 V DC, gdzie obserwowano znaczne spadki napięć (nawet do poziomu 1000 V). Symulacje różnych wariantów rozmieszczenia ESS wykazały:

- możliwość ograniczenia spadków napięcia poniżej wartości krytycznych dzięki zastosowaniu dwóch lub trzech magazynów energii,
- zależność wymaganej pojemności od ustawień progów napięciowych sterowania,
- wpływ strategii ładowania na dostępność magazynu podczas kolejnych cykli pracy.

Wyniki potwierdziły, że optymalizacja progów pracy ESS pozwala ograniczyć niezbędną pojemność przy zachowaniu stabilności napięcia. Badania dowiodły, że ESS mogą stanowić realną alternatywę dla budowy nowych podstacji zasilających, oferując niższy koszt całkowity wdrożenia.

8. Wnioski

Na obecnym etapie implementacja optymalizacji parametrycznej ma charakter zrealizowanego wdrożenia i stanowi narzędzie użyteczne w praktyce inżynierskiej. Pozwala na stosunkowo szybkie i skuteczne określenie parametrów systemu dla potrzeb projektowych oraz oceny efektywności inwestycji (tj. dane wejściowe do wyceny i symulacji przetargowych).

Przeprowadzone analizy i symulacje wykazały, że:

- odpowiednio dobrane progi zadziałania ESS pozwalają istotnie ograniczyć straty energii w liniach trakcyjnych,
- minimalizacja spadków napięcia poprawia jakość zasilania pojazdów i ogranicza przeciążenia podstacji,
- możliwe jest znaczące zmniejszenie wymaganej pojemności zasobników przy zachowaniu stabilności napięcia,
- właściwe rozmieszczenie ESS (np. jeden magazyn na odcinek lub maksymalnie dwa na sekcję) zapewnia dodatkowe korzyści eksploatacyjne,
- zastosowanie optymalizacji parametrycznej pozwala na praktyczne wykorzystanie wyników w procesie projektowania systemów trakcyjnych z ESS,
- wyniki symulacyjne są porównywalne z danymi pomiarowymi z rzeczywistego obiektu, co potwierdza poprawność przyjętego modelu,
- autorski solver zintegrowany z modelem ruchu pozwala odwzorować zachowanie systemu trakcyjnego i wspierać proces projektowania ESS,
- metody optymalizacji (przeszukanie siatki i Monte Carlo) umożliwiają identyfikację nastaw zapewniających kompromis między parametrami technicznymi,
- testy komercyjne dowodzą przydatności modeli w ocenie realnych przebiegów.

Doświadczenia wdrożeniowe (m. in. opisany w rozdziale 7 przykład implementacji zasobnika ABB Enviline ESS) potwierdzają potencjał rynkowy i praktyczną opłacalność rozwiązań, co wzmacnia końcowe wnioski dysertacji.

W rozdziale 6 na modelowanym przykładzie wskazano korelację wykorzystania zasobnika o odpowiednio dobranej lokalizacji i charakterystyce jako elementu infrastruktury kolejowej będącego w stanie znacząco ograniczyć rozpraszanie energii na elementach stratnych tj. rezystory przekształtnika hamowania oraz rezystancja linii. Jest to w zgodności z założoną hipotezą o optymalizacyjnym wpływie przytorowych zasobników na poprawę parametrów zasilania linii trakcyjnej.

Modele matematyczne i numeryczne przedstawione w rozdziałach 5 i 6 zostały wykorzystane do analizy rzeczywistej realizacji komercyjnego systemu przytorowego zasobnika energii opartego na modułach superkondensatorowych. Projekt ten został zrealizowany dla klienta podmiotu zatrudniającego autora, a przyjęta topologia systemu oraz parametry pracy odpowiadają rzeczywistym założeniom wdrożonej instalacji w systemach kolei 3000 V DC. Co dowodzi wdrożeniowego charakteru pracy.

Podstawą funkcjonowania większej części przetwornic DC/DC wysokiej mocy są algorytmy sterowania typu feed-forward, których teoretyczne podstawy omówiono w rozdziale 4. Zastosowanie tego podejścia umożliwiło zachowanie stabilności pracy układu oraz zapewniało optymalną wymianę energii w stanach dynamicznych, szczególnie w sytuacjach szybkich zmian zapotrzebowania mocy przez system trakcyjny.

Działalność wdrożeniowa doktoranta była bezpośrednio związana z praktycznym wykorzystaniem wyników badań naukowych w projektach przemysłowych realizowanych przez podmiot zatrudniający.

Na obiekcie komercyjnym zrealizowano testowy przejazd pojazdu klasy ETR 421/521/621 Rock [82], [83] na sekcji zasilanej przez dwie podstacje (w tym jedną z prostownikiem aktywnym) oraz pojedynczego zasobnika superkondensatorowego. Dane pomiarowe (napięcie, prąd, trajektorie GPS, prędkości) posłużyły do walidacji autorskiego solvera oraz algorytmów optymalizacyjnych.

Doktorant był zaangażowany w opracowanie i wdrożenie typoszeregu systemów energoelektronicznych zasilających trakcję 3000 V DC, 1500 V DC oraz 750 V DC. Jako inżynier systemu odpowiadał m.in. za:

- definiowanie wymagań projektowych i architektury sterowania,
- analizy wydajnościowe oparte na własnych modelach,
- nadzór nad dokumentacją projektową i testową,
- udział w testach fabrycznych oraz testach uruchomieniowo-walidacyjnych na obiektach rzeczywistych, zakończonych akceptacją klienta.

Wyniki badań i opracowane algorytmy znalazły praktyczne zastosowanie w:

- wspieraniu decyzji inwestycyjnych (porównania scenariuszy rozmieszczenia ESS),
- poprawie stabilności napięciowej i niezawodności sieci trakcyjnych,
- redukcji kosztów infrastrukturalnych dzięki efektywniejszemu wykorzystaniu ESS,
- wdrażaniu nowych technologii energoelektronicznych w infrastrukturze kolejowej.

8.1. Kierunki dalszych badań

Dalsze badania ukierunkowane będą na rozwój metod optymalizacji w kierunku bardziej złożonych podejść numerycznych, obejmujących m.in. metody stochastyczne (rozwińnięcie globalnego Monte Carlo ze szczegółowym przeszukaniem kandydatów, algorytmy ewolucyjne), programowanie dynamiczne oraz techniki uczenia maszynowego, takie jak sieci rekurencyjne NARX. Pozwoli to na uwzględnienie większej liczby zmiennych decyzyjnych, złożonych kryteriów oraz ograniczeń wielokryterialnych, otwierając drogę do inteligentnego sterowania zasilaniem w systemach trakcyjnych.

W procesie dotychczasowych symulacji zauważono, że w stanach granicznych solver wykazuje tendencję do oscylowania na wybranych wartościach, co wymagało dostrajania jego parametrów bądź wykluczania błędnych rozwiązań. Wskazuje to na potrzebę dalszego rozwoju funkcjonalności solvera, w tym mechanizmów stabilizacji

wyników oraz adaptacyjnego zarządzania kryteriami zbieżności. Kierunek rozwoju powinien obejmować również rozszerzenie parametryzacji i optymalizacji o kryteria ekonomiczne, takie jak koszty infrastrukturalne czy nakłady inwestycyjne związane z rozmieszczeniem i charakterystykami magazynów energii.

Dodatkowo planowane jest rozwinięcie algorytmów o moduły umożliwiające identyfikację parametrów pojazdów na podstawie danych pomiarowych pochodzących z rzeczywistych obiektów trakcyjnych. Umożliwi to np. zastosowanie sieci NARX do automatycznej estymacji charakterystyk trakcyjnych pojazdów, co w istotny sposób zwiększy realizm symulacji oraz praktyczną przydatność opracowanych narzędzi w procesach projektowych i wdrożeniowych.

9. Bibliografia

- [1] M. Popescu i A. Bitoleanu, „A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems”, *Energies*, t. 12, nr 6, s. 1092, mar. 2019, doi: 10.3390/en12061092.
- [2] P. Simiyu i I. E. Davidson, „MVDC Railway Traction Power Systems; State-of-the Art, Opportunities, and Challenges”, *Energies*, t. 14, nr 14, s. 4156, lip. 2021, doi: 10.3390/en14144156.
- [3] K. Karwowski *et al.*, Red., *Energetyka transportu zelektryfikowanego: poradnik inżyniera*, Wydanie III. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2020.
- [4] A. Monticelli, *State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach*. w Kluwer international series in engineering and computer science. Springer US, 1999.
- [5] J. W. NILSSON i S. Riedel, *Electric Circuits*. Pearson Education, 2022.
- [6] R. C. Dorf i J. A. Svoboda, *Introduction to Electric Circuits*. John Wiley & Sons, 2010.
- [7] G. Strang, *Linear Algebra and Its Applications*. Thomson, Brooks/Cole, 2006.
- [8] L. O. Chua, C. A. Desoer, i E. S. Kuh, *Linear and Nonlinear Circuits*. w Electrical & electronic engineering. McGraw-Hill, 1987.
- [9] A. C. Szatkowski i J. Cichosz, *Metody numeryczne: podstawy teoretyczne*, Wyd. 3. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2010.
- [10] L. N. Trefethen i D. Bau, *Numerical Linear Algebra*. w Other Titles in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.
- [11] W. H. Press, *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*. w Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 2007.
- [12] A. Macura, *Teoria obwodów*, Wydanie czwarte. Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, 1997.
- [13] O. Dutta, M. Saleh, M. Khodaparastan, i A. Mohamed, „A Dual-Stage Modeling and Optimization Framework for Wayside Energy Storage in Electric Rail Transit Systems”, *Energies*, t. 13, nr 7, s. 1614, kwi. 2020, doi: 10.3390/en13071614.
- [14] F. Zhou, Z. Tang, X. Zhang, L. Chou, i D. Tan, „An Energy Storage System for Regulating the Maximum Demand of Traction Substations”, *Energies*, t. 18, nr 1, s. 131, grudz. 2024, doi: 10.3390/en18010131.
- [15] H. Alnuman, D. Gladwin, i M. Foster, „Electrical Modelling of a DC Railway System with Multiple Trains”, *Energies*, t. 11, nr 11, s. 3211, lis. 2018, doi: 10.3390/en11113211.

- [16] P. Arboleya, I. El-Sayed, B. Mohamed, i C. Mayet, „Modeling, Simulation and Analysis of On-Board Hybrid Energy Storage Systems for Railway Applications”, *Energies*, t. 12, nr 11, s. 2199, cze. 2019, doi: 10.3390/en12112199.
- [17] H. Alnuman, „Modelling a DC Electric Railway System and Determining the Optimal Location of Wayside Energy Storage Systems for Enhancing Energy Efficiency and Energy Management”, *Energies*, t. 17, nr 12, s. 2825, cze. 2024, doi: 10.3390/en17122825.
- [18] *IEEE Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Energy Storage Technologies in Stationary Applications*. doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9063725.
- [19] H. Johal, D. Manz, K. O’Brien, i J. Kern, „Grid integration of energy storage”, w *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA: IEEE, lip. 2011, s. 1–2. doi: 10.1109/PES.2011.6039591.
- [20] R. Borah, F. R. Hughson, J. Johnston, i T. Nann, „On battery materials and methods”, *Mater. Today Adv.*, t. 6, s. 100046, cze. 2020, doi: 10.1016/j.mtadv.2019.100046.
- [21] *Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 1: Performance testing*, IEC 62660-1.
- [22] M. Lewandowski, M. Orzylowski, i M. Wieczorek, „Application of supercapacitors in electric traction storage systems”, *MATEC Web Conf.*, t. 180, s. 02002, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201818002002.
- [23] F. Van Mulders, J.-M. Timmermans, Z. McCaffrey, J. Van Mierlo, i P. Van Den Bossche, „Supercapacitor Enhanced Battery Traction Systems – Concept Evaluation”, *World Electr. Veh. J.*, t. 2, nr 2, s. 120–133, cze. 2008, doi: 10.3390/wevj2020120.
- [24] N. Mohan i S. Raju, *Power electronics, a first course: simulations and laboratory implementations*, Second edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2023.
- [25] M. K. Kazimierzuk, *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. Chichester, U.K: Wiley, 2008. doi: 10.1002/9780470694640.
- [26] S. Maniktala, *Switching power supplies A to Z*. Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2006.
- [27] H. Tunia i R. Barlik, *Teoria przekształtników*, Wyd. 2 popr. i Uzupełn. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [28] S. P. Boyd i L. Vandenberghe, *Convex optimization*, Version 29. Cambridge New York Melbourne New Delhi Singapore: Cambridge University Press, 2023.

- [29] J. Kennedy i R. Eberhart, „Particle swarm optimization”, w *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia: IEEE, 1995, s. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [30] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, i T. Meyarivan, „A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, t. 6, nr 2, s. 182–197, kwi. 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [31] D E Raeside, „Monte Carlo principles and applications”, *Phys. Med. Biol.*, t. 21, nr 2, s. 181–197, mar. 1976, doi: 10.1088/0031-9155/21/2/001.
- [32] B. Shahriari, K. Swersky, Z. Wang, R. P. Adams, i N. De Freitas, „Taking the Human Out of the Loop: A Review of Bayesian Optimization”, *Proc. IEEE*, t. 104, nr 1, s. 148–175, sty. 2016, doi: 10.1109/JPROC.2015.2494218.
- [33] *OpenTrack*. Dostęp: 19 września 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.opentrack.ch>
- [34] *Sitras Sidy*. Dostęp: 19 września 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/digital-solutions-software/infrastructure/rail-electrification/sidytrac.html>
- [35] *RailSys*. Dostęp: 19 września 2025. [Online]. Dostępne na: <https://rmcon-int.de/en/railsys-suite-en/>
- [36] P. Wei *et al.*, „Progress in Energy Storage Technologies and Methods for Renewable Energy Systems Application”, *Appl. Sci.*, t. 13, nr 9, s. 5626, maj 2023, doi: 10.3390/app13095626.
- [37] R. Hemmati i H. Saboori, „Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, t. 65, s. 11–23, lis. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.06.029.
- [38] T. S. Babu, K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandramurthy, S. B. Sani, S. Chemud, i R. M. Lajim, „A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects”, *IEEE Access*, t. 8, s. 148702–148721, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015919.
- [39] P. V. Radu i Z. Drazek, „Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport”, *MATEC Web Conf.*, t. 180, s. 04001, 2018, doi: 10.1051/mateccconf/201818004001.
- [40] S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava, i P. Famouri, „Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics”, *Energies*, t. 17, nr 5, s. 1250, mar. 2024, doi: 10.3390/en17051250.
- [41] K. Dissanayake i D. Kularatna-Abeywardana, „A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications”, *J. Energy Storage*, t. 96, s. 112563, sie. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112563.

- [42] K. Woźniak, B. Kurc, Ł. Rymaniak, N. Szymlet, P. Pielecha, i J. Sobczak, „High-Capacity Energy Storage Devices Designed for Use in Railway Applications”, *Energies*, t. 17, nr 23, s. 5904, lis. 2024, doi: 10.3390/en17235904.
- [43] W. Jefimowski, A. Nikitenko, Z. Drążek, i M. Wieczorek, „Stationary supercapacitor energy storage operation algorithm based on neural network learning system”, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, s. 733–738, lip. 2020, doi: 10.24425/bpasts.2020.134176.
- [44] T. Sutikno, W. Arsadiando, A. Wangsupphaphol, A. Yudhana, i M. Facta, „A Review of Recent Advances on Hybrid Energy Storage System for Solar Photovoltaics Power Generation”, *IEEE Access*, t. 10, s. 42346–42364, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165798.
- [45] A. Urooj i A. Nasir, „Review of Hybrid Energy Storage Systems for Hybrid Electric Vehicles”, *World Electr. Veh. J.*, t. 15, nr 8, s. 342, lip. 2024, doi: 10.3390/wevj15080342.
- [46] X. Li i A. Palazzolo, „A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities”, *J. Energy Storage*, t. 46, s. 103576, luty 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103576.
- [47] K. Xu, Y. Guo, G. Lei, i J. Zhu, „A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies”, *Energies*, t. 16, nr 18, s. 6462, wrz. 2023, doi: 10.3390/en16186462.
- [48] S. Zhao, Q. Feng, H. Yang, i Y. Zhang, „Control strategy of hybrid energy storage in regenerative braking energy of high-speed railway”, *Energy Rep.*, t. 8, s. 1330–1338, kwi. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.230.
- [49] R. M. Schupbach i J. C. Balda, „Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles”, w *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, Madison, WI, USA: IEEE, 2003, s. 1369–1374. doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210630.
- [50] F. A. Himmelstoss, „Analysis and comparison of half-bridge bidirectional DC-DC converters”, w *Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference - PESC'94*, Taipei, Taiwan: IEEE, 1994, s. 922–928. doi: 10.1109/PESC.1994.373789.
- [51] M. Lewandowski, M. Orzylowski, i M. Wieczorek, „Application of supercapacitors in electric traction storage systems”, *MATEC Web Conf.*, t. 180, s. 02002, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201818002002.
- [52] L. Callegaro, M. Ciobotaru, D. J. Pagano, E. Turano, i J. E. Fletcher, „A Simple Smooth Transition Technique for the Noninverting Buck–Boost Converter”, *IEEE Trans. Power Electron.*, t. 33, nr 6, s. 4906–4915, cze. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2731974.
- [53] L. Callegaro, M. Ciobotaru, V. G. Agelidis, i E. Turano, „A solution for the gain discontinuity issue of the non-inverting buck-boost converter”, w *IECON 2016 - 42nd*

- Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy: IEEE, paź. 2016, s. 1245–1250. doi: 10.1109/IECON.2016.7793335.
- [54] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, i M. P. Vecchi, „Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, t. 220, nr 4598, s. 671–680, maj 1983, doi: 10.1126/science.220.4598.671.
- [55] R. H. Myers, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 1st ed. w New York Academy of Sciences Series. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016.
- [56] K. Qu i J. Yuan, „Optimization research on hybrid energy storage system of high-speed railway”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, t. 15, nr 20, s. 2835–2846, paź. 2021, doi: 10.1049/gtd2.12217.
- [57] J. W. Dixon i M. E. Ortuzar, „Ultracapacitors + DC-DC converters in regenerative braking system”, *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, t. 17, nr 8, s. 16–21, sie. 2002, doi: 10.1109/MAES.2002.1028079.
- [58] A. Rufer, D. Hotellier, i P. Barrade, „A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, t. 19, nr 2, s. 629–636, kwi. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.824408.
- [59] R. Lamedica *et al.*, „Application of battery auxiliary substations in 3kV railway systems”, w *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Naples, Italy: IEEE, paź. 2015, s. 1–6. doi: 10.1109/AEIT.2015.7415249.
- [60] „Recuperare l’energia prodotta dai treni in frenata: è a Forlì il primo impianto tecnologico «green» in Europa”, s. <https://www.forlitolitoday.it/cronaca/primo-impianto-recupero-energia-frenata-treni-ferrovia-3kvcc.html>.
- [61] B. Zakeri i S. Syri, „Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, t. 42, s. 569–596, luty 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.011.
- [62] G. De Carne *et al.*, „The role of energy storage systems for a secure energy supply: A comprehensive review of system needs and technology solutions”, *Electr. Power Syst. Res.*, t. 236, s. 110963, lis. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110963.
- [63] *Electrical energy storage (EES) systems*, IEC 62933.
- [64] *Energy Storage System (ESS) Requirements*, UL 9540 (+A).
- [65] *Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*, IEEE 1547.
- [66] *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells + and for batteries made from them + for use in portable applications - Part 2: Lithium systems*, IEC 62133-2.

- [67] *Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications*, IEC 62619.
- [68] *Underwriters Laboratories standard for lithium batteries, addressing safety aspects, including electrical, mechanical, thermal, and environmental considerations*, UL 1642.
- [69] S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava, i P. Famouri, „Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics”, *Energies*, t. 17, nr 5, s. 1250, mar. 2024, doi: 10.3390/en17051250.
- [70] *Railway applications – Supply voltages of traction systems*, IEC 60850.
- [71] *Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles – Test methods for electrical characteristics*, IEC 62576.
- [72] *Fixed electric double-layer capacitors for use in electric and electronic equipment – Part 1: Generic specification*, IEC 62391.
- [73] X. Wang, Y. Luo, B. Qin, J. Peng, Y. Zhou, i Z. Sun, „Ultracapacitor Energy Storage Systems based on Dynamic Setting and Coordinated Control for Urban Trains”, *IFAC-Pap.*, t. 53, nr 2, s. 14954–14959, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1987.
- [74] K. Woźniak, B. Kurc, Ł. Rymaniak, N. Szymlet, P. Pielecha, i J. Sobczak, „High-Capacity Energy Storage Devices Designed for Use in Railway Applications”, *Energies*, t. 17, nr 23, s. 5904, lis. 2024, doi: 10.3390/en17235904.
- [75] F. Naseri, S. Karimi, E. Farjah, i E. Schaltz, „Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, t. 155, s. 111913, mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111913.
- [76] „ABB traction rectifiers Diode rectifiers for DC traction substations”. ABB. Dostęp: 19 września 2025. [Online]. Dostępne na: https://library.e.abb.com/public/2c94715f41cc5e11c12577a0004872b6/ABB%20traction%20rectifiers_4128PL219-W2-en_09-2010.pdf
- [77] B. Wu i M. Narimani, *High-power converters and AC drives*, Second edition. w IEEE Press series on power engineering, no. 59. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017.
- [78] G. Lin, Y. Li, i Z. Zhang, „A Review of Control Strategies for Four-Switch Buck–Boost Converters”, *World Electr. Veh. J.*, t. 16, nr 6, s. 315, cze. 2025, doi: 10.3390/wevj16060315.
- [79] M. Khodaparastan i A. Mohamed, „Modeling and Simulation of Regenerative Braking Energy in DC Electric Rail Systems”, 2018, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.1808.04032.
- [80] *LT Spice*. Dostęp: 19 września 2025. [Online]. Dostępne na: <https://ltwiki.org>

- [81] C. E. Rasmussen i C. K. I. Williams, *Gaussian processes for machine learning*, 3. print. w Adaptive computation and machine learning. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2008.
- [82] „ETR 421 / 521 / 621 Rock”. Dostęp: 19 września 2025. [Online]. Dostępne na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Caravaggio_\(train\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Caravaggio_(train))
- [83] R. Jenni, P. Antoniewicz, R. Jacukowicz, „eb expenses”, *Smart Energy Manag. Syst. – Static Energy Storage Devices Comb. Rectifier Substation*, nr 6, s. 239, 2020.