

System napędowy z ładowarką pokładową dla E-COMMERCE

Streszczenie. Zaprezentowano nowoczesny zintegrowany system napędowy, łączący silnik PMSM, falownik i ładowarkę pokładową, dedykowany pojazdom elektrycznym zarówno pasażerskim jak i dostawczym z grupy e-commerce. Zaprojektowany elastyczny napęd o mocy 130 kW, 520 Nm, zasilany z baterii trakcyjnej 700 Vdc, osiąga max 136 km/h. maksymalna integracja komponentów zmniejsza koszt i masę napędu natomiast wykorzystanie algorytmu FOC zapewnia efektywne sterowanie napędem pojazdu o DMC 4250kg, który umożliwia pokonanie 15% wzniesienia.

Abstract. A modern integrated propulsion system has been presented, combining a PMSM motor, an inverter, and an on-board charger, dedicated to both passenger and delivery electric vehicles within the e-commerce group. The flexible drive system, with a power of 130 kW and 520 Nm of torque, powered by a 700 Vdc traction battery, achieves a maximum speed of 136 km/h. Maximum component integration reduces the cost and weight of the drive, while the use of the FOC algorithm ensures efficient vehicle propulsion control for a vehicle with a curb weight of 4250 kg, enabling it to climb a 15% gradient. (**Propulsion System with On-Board Charger for E-COMMERCE**)

Słowa kluczowe: napędy elektryczne, silniki PMSM, sterowanie FOC.

Keywords: electric drives, PMSM motors, FOC control.

Wstęp

W dziedzinie technologii pojazdów elektrycznych, harmonijna integracja kluczowych komponentów, takich jak falowniki, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM) oraz ładowarki pokładowe, stanowi centralny punkt innowacyjności. Ta pełna zgrana integracja nie tylko usprawnia proces produkcji, ale także niesie ze sobą znaczące korzyści w kwestii efektywności, redukcji masy i opłacalności.

W oparciu o te podstawy, konsorcjum postanowiło opracować nowoczesny system napędowy, który może być zastosowany w różnych rodzajach pojazdów elektrycznych. Projekt opiera się na wydajnym silniku PMSM o specjalnym wykonaniu, który umożliwia jego pełną integrację z falownikiem w jednej bryle. Co więcej, część elementów energoelektronicznych oraz uzwojenia silnika zostanie wykorzystana podczas postoju pojazdu do stworzenia obwodu ładowarki pokładowej. To rozwiązanie pozwala na efektywne ładowanie podczas przestoju, co ma kluczowe znaczenie zwłaszcza w kontekście dostaw miejskich.

Ponadto, taki zintegrowany system napędowy ma potencjał do rewolucjonizowania zrównoważonej mobilności w obszarach miejskich, szczególnie w kontekście stref z ograniczeniami emisji. Obecnie coraz więcej miast na całym świecie wprowadza ograniczenia dotyczące emisji spalin i tworzy strefy o niskiej emisji, które promują pojazdy elektryczne. Systemy napędowe tego typu, dostosowane do pojazdów o masie 4250 kg, odgrywają kluczową rolę w osiągnięciu tych celów, przyczyniając się do poprawy jakości powietrza i zmniejszenia wpływu transportu na środowisko naturalne. W niniejszym artykule skupiamy się na projektowaniu i inżynierii tego zintegrowanego systemu napędowego oraz analizujemy jego potencjał w kontekście tworzenia bardziej ekologicznych i przyjaznych dla środowiska obszarów miejskich.

Budowa systemu napędowego

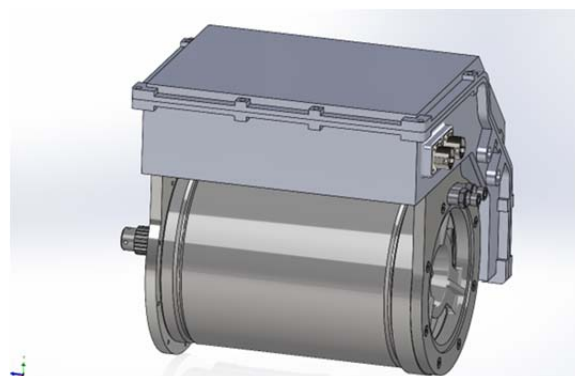
Projekt zintegrowanego napędu elektrycznego do pojazdów opiera się na scaleniu w jedną funkcjonalną jednostkę następujących komponentów: silnika PMSM, trójfazowego falownika, oraz modułu ładowarki pokładowej o maksymalnej mocy 22 kW. Wszystkie podzespoły napędu umieszczone we wspólnej bryle posiadają wspólny układ chłodzenia mieszkanką wody i glikolu.

Model falownika powstał w środowisku programu Solid Works. W trakcie projektowania napędu przykładano szczególny nacisk, aby zapewnić pełną integrację napędu : silnik-falownik-ładowarka pokładowa, z zachowaniem nor-

my IP 67. Tego typu rozwiązanie pozwala na redukcję masy gabarytu oraz kosztów. Masa podzespołów do produkcji samochodów elektrycznych staje się szalenie ważnym aspektem, który determinuje zasięg. Integracja pozwoliła również wyeliminować kosztowne okablowania z silnika do falownika oraz zmniejszyć ilość etapów montażu samochodu wyposażonego w takie rozwiązanie.

Obudowa falownika wpisuje się w obrys korpusu silnika - zostanie wykonana w procesie frezowania z aluminium 7075. Jest to materiał o dobrych własnościach podczas obróbki skrawaniem.

Poniżej przedstawiono proponowaną konstrukcję napędu :

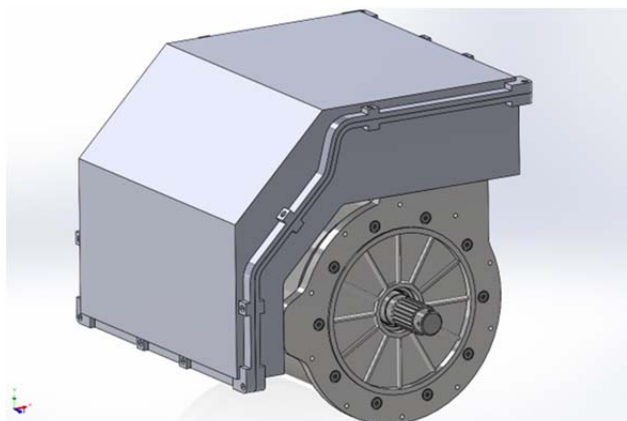


Rys. 1. Model zintegrowanego napędu EV -widok od strony króćców wodnych.

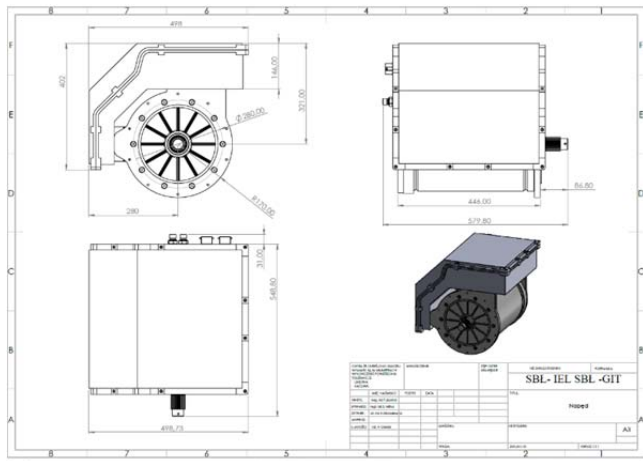
Istotnym aspektem zintegrowanego układu napędowego było stworzenie specjalnego systemu chłodzenia, który obejmuje zarówno falownik, jak i silnik. W obudowie zastosowano radiator wodny, który jest częścią wspólnego obiegu cieczy chłodzącej z silnikiem. W celu usprawnienia systemu chłodzenia, przepływ cieczy jest ukierunkowany w sposób szeregowy, tak aby woda o niższej temperaturze najpierw ochładzała najbardziej wrażliwe na ciepło elementy, takie jak moduły mocy IGBT SiC, zanim zostanie przekierowana do kanałów chłodzących w korpusie silnika. Układ przewodów został zaprojektowany w taki sposób, aby stworzył efektywną barierę termiczną, izolującą oba urządzenia.

Na radiatorze umieszczono moduły mocy połączone z kondensatorami i szynami o odpowiedniej konduktywności (bussbar). Taka konstrukcja szyn DC pozwoliła na minima-

lizację indukcyjności połączeń między kondensatorami a zaworami, co z kolei ograniczyło występowanie przepięć komutacyjnych. Przewody fazowe zostały przeprowadzone przez korpus silnika i bezpośrednio podłączone do zacisków fazowych falownika.



Rys. 2 Model zintegrowanego napędu EV –widok od strony wieloklinu.



Rys. 3 Dokumentacja techniczna

Nowa koncepcja zostanie poddana testom w laboratoriach Sieci Badawczej Łukasiewicza w celu sprawdzenia zgodności z typowymi krzywymi obciążenia, które odpowiadają warunkom pracy silnika elektrycznego podczas jazdy samochodem. Jednakże wcześniej przeprowadzono obliczenia i symulacje obciążeń, biorąc pod uwagę różne style jazdy i nachylenie terenu przy użyciu oprogramowania inżynierskiego.

Przedstawiony projekt napędu wyróżnia się kompaktową konstrukcją, minimalizacją masy oraz optymalnym wykorzystaniem podzespołów energoelektronicznych i elektronicznych. Te cechy przekładają się na obniżenie kosztów produkcji.

Parametry silnika

Głównym elementem wykonawczym napędu jest silnik PMSM z magnesami trwałymi zagłębionymi w wirniku oraz uzwojeniem wysypywanym w stojanie. Kadłub silnika chłodzony cieczą w układzie zamkniętym chłodnicą z wentylatorem oraz pompą cieczy chłodzącej.

Zakładane jest kołnierzowe mocowanie silnika ze względu na możliwość współpracy silnika z przekładnią mechaniczną obniżającą obroty. Końcówka wału silnika zostanie wykonana w formie wielowypustu znormalizowanego, aby ułatwić połączenie ruchome wału silnika z przekładnią. Mocowanie zespołu silnik-przekładnia będzie realizowane za pomocą podpór tłumiących drgania.

Silnik elektryczny wchodzący w skład napędu jest zasilany z przekształtnika energoelektronicznego. Przekształtnik zapewnia zasilanie prądem 3-fazowym, z symetrycznym układem faz ($3 \times 120^\circ$). W silniku razem z przewodami fazowymi wyprowadzono zacisk punktu środkowego gwiazdy uzwojenia. Umożliwia to wykorzystanie indukcyjności uzwojeń stojana podczas procesu ładowania baterii głównej w trakcie postoju pojazdu.

Prototypowy silnik zaprojektowano o następujących parametrach:

Tabela 1. Parametry projektowanego silnika

Parametr	Wielkość	Jednostki
Moc ciągła/max	130/260	kW
	180/360	KM
Obroty znamionowe/max	2400/6000	1/min
Moment znam./max	520/1200	Nm
Napięcie baterii falownika	700 (620-820)	V
Prędkość maks. pojazdu na wzniesieniu 0% (van/os.)	136	km/h
Prędkość końca strefy $T_s = \text{const}$	77	km/h
Przyspieszenie max	2,25	m/s^2
Zdolność pokonywania wzniesień dla parametrów znam.	15%	

Silnik wykonano z chłodzeniem cieczowym co zapewnia maszynie uzyskiwanie lepszych parametrów pracy. Integracja obwodów chłodzenia silnika i falownika umożliwi zmniejszenie gabarytów i masy układu chłodzenia (jedna pompa, chłodnica, mniej przewodów wodnych, itp.).

Budowa zintegrowanego bloku falownika z ładowarką

Blok falownika z ładowarką jest umieszczony we wspólnej wytrzymałej i odpornej na warunki zewnętrzne obudowie która zapewnia ochronę przed czynnikami atmosferycznymi oraz uszkodzeniami mechanicznymi. Falownik jest odpowiedzialny za przekształcanie prądu stałego dostarczanego z baterii na prąd zmienny, który zasila silnik. Dodatkowo zaprojektowano moduł ładowarki pokładowej, który umożliwia ładowanie baterii pojazdu podczas postoju pojazdu z sieci trójfazowej o mocy do 22 kW.

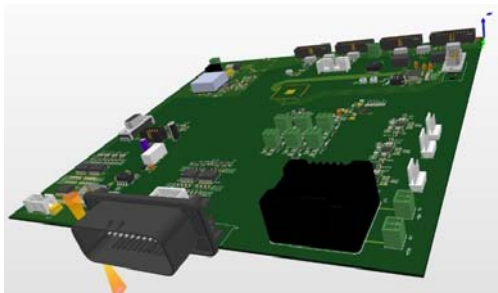
Układ sterowania, który monitoruje i kontroluje pracę falownika, silnika oraz ładowarki wykorzystuje algorytm sterowania FOC (Field-Oriented Control), aby zapewnić precyzyjną kontrolę nad pracą silnika. Zintegrowany moduł wyposażono w zabezpieczenia, które chronią cały system przed uszkodzeniem, przegrzaniem lub przeciążeniem prądowym a także udarami - układ wstępnego ładowania. Zintegrowany moduł wyposażono w interfejsy komunikacyjne, CAN (Controller Area Network) i RS485, które umożliwiają komunikację z innymi systemami pojazdu, takimi jak VCU lub systemy bezpieczeństwa.

Podstawowy tor prądowy napędu składa się z modułów mocy, wykorzystujących półmostki IGBT+SiC, a także przetworników pomiarowych prądów i napięcia (pomiar prądów fazowych oraz prąd i napięcie DC linku). Najważniejszym elementem systemu sterowania i kontroli napędu jest główna płyta sterująca. Dzięki takiemu rozwiązaniu, cały układ napędowy jest efektywnie zintegrowany i gotowy do pracy w pojeździe elektrycznym.

Płyta sterowania to kompleksowe urządzenie z wieloma kluczowymi komponentami. W jej centrum znajduje się zaawansowany mikrokontroler TMS320F28379DPTPQ z rodziny TMS320 C2000 od Texas Instruments, stworzony do sterowania silnikami elektrycznymi i układami zasilania.

Bazujący na architekturze Real-Time Microcontroller procesor, idealnie nadaje się do przetwarzania sygnałów analogowych, szczególnie w systemach sterowania silnikami. Osiąga częstotliwość taktowania sięgającą kilku setek megaherców, co umożliwia błyskawiczne obliczenia. Po-

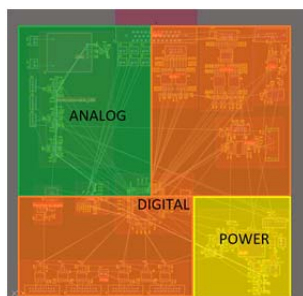
nadto, obsługuje różne źródła danych, co jest niezbędne w regulacji i sterowaniu (obsługa wielu wejść i wyjść analogowych oraz cyfrowych).



Rys. 4. Widok 3D płyty sterowania zintegrowanego napędu.

Procesor ma wbudowane przetworniki ADC i DAC, ułatwiające pomiar sygnałów analogowych i generowanie precyzyjnych sygnałów sterujących. Obsługuje różne protokoły komunikacji, takie jak UART, SPI, I2C, CAN, co ułatwia interakcję z innymi urządzeniami w systemie. Mikrokontroler stosowany jest szczególnie w aplikacjach związanych z napędami i pojazdami elektrycznymi, dzięki swojej wszechstronności i niskiemu zużyciu energii.

Główna płyta sterująca zawiera układy zasilania, dostarczające energię dla różnych komponentów, w tym przetworników pomiarowych LEM (+/- 15 V), driverów modułów mocy (+15V), przetwornik resolver-to-digital oraz innych elementów elektroniki. Architektura płyty została podzielona na obszary spełniające różne funkcje w układzie sterowania:



Rys. 5. Podział płyty sterowania na obszary o różnych funkcjach.

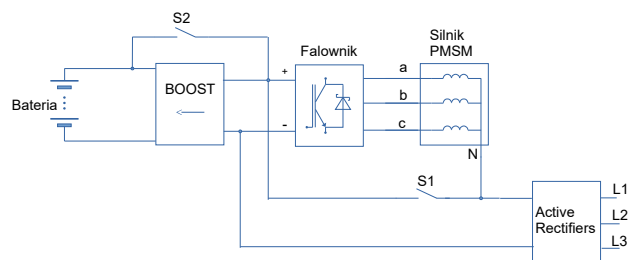
Część analogowa zawiera przekładniki prądowe i napięciowe firmy LEM oraz układy kondycjonowania ich sygnałów. Część cyfrowa generuje sygnały PWM i zawiera moduły komunikacji RS485 i CAN. Wejścia i wyjścia cyfrowe o napięciu 24V są precyzyjnie sterowane przez procesor.

Płyta sterowania odpowiada również za zarządzanie ładowarką, komunikując się z BMS (Battery Management System) baterii trakcyjnej. W tym celu wykorzystywane są układy pomiarowe prądów i napięć oraz przekaźniki, które sterują różnymi stanami pracy systemu. Dodatkowo, moduł synchronizujący system Vehicle-to-Grid (V2G) z siecią umożliwia efektywną interakcję między pojazdem elektrycznym a siecią energetyczną.

Układ sterowania silnikiem i ładowarką pokładową

Silniki PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motors) posiadają liczne zalety, jednak jedną z ich wad jest bardziej skomplikowana metoda sterowania. W opisanym rozwiązaniu układ sterowania jest jeszcze bardziej rozbudowany, gdyż wprowadza dodatkowe moduły odpowiedzialne za proces ładowania baterii pojazdu podczas postoju.

Kontrola poprawnej pracy przekształtnika, który korzysta z tranzystorów IGBT z przeciwrównoległymi diodami zwrotnymi, jest realizowana za pomocą zaawansowanej metody sterowania wektorowego FOC (Field-Oriented Control) co w przypadku silników PMSM, charakteryzuje się wyższą efektywnością i precyzją ich pracy.



Rys. 6. Schemat blokowy zintegrowanego systemu falownika i ładowarki pokładowej napędu iPOWER.

Połączenie trójfazowej ładowarki z falownikiem zasilanym z baterii trakcyjnej o napięciu 700 V DC wprowadza pewne wyzwania, ponieważ standardowe napięcie sieciowe wynosi 3x400 V AC, co po wyprostowaniu daje napięcie około 565 V DC. To napięcie jest zbyt niskie, aby efektywnie naładować baterię trakcyjną. Dlatego też, aby skutecznie naładować baterię o napięciu 700 V DC, konieczne jest podniesienie napięcia ładowania.

Zaprojektowany w ten sposób zintegrowany układ falownika i ładowarki pokładowej umożliwia pracę w następujących konfiguracjach:

- 1. Ładowanie w czasie postoju (Przełączniki S1 i S2 Wyłączone):** W tym trybie ładowarka wykorzystuje indukcyjności uzwojeń silnika oraz wybrane diody modułów falownika. Dodatkowo, zastosowany jest układ podwyższający napięcie, służący do filtrowania i stabilizacji prądu ładowania akumulatora. Dzięki temu napięcie na baterii zostaje podniesione do wymaganego poziomu 700 V DC.
- 2. Oddawanie Energii do Sieci (Przełączniki S1 i S2 Zamknięte):** W tym przypadku energia zgromadzona w baterii trakcyjnej kierowana jest do modułu prostownika aktywnego, gdzie jest przekształcana w prąd przemienny o parametrach 3x400 V AC i 50 Hz, zgodnie z wymaganiami sieci.

Ten innowacyjny układ umożliwia elastyczne zarządzanie energią, umożliwiając zarówno ładowanie baterii, jak i oddawanie energii do sieci, co jest kluczowe w zastosowaniach związanych z nowoczesnymi pojazdami elektrycznymi wyposażonymi w funkcję V2G.

Metodyka doboru parametrów regulatorów w układzie sterowania FOC dla silnika PMSM

W celu realizacji precyzyjnego sterowania prędkością i momentem obrotowym silnika PMSM, zastosowano technikę sterowania polem wektorowym (FOC), a do regulacji parametrów układu wykorzystano regulatory proporcjonalno-całkujące (PI).

W analizowanym układzie sterowania silnikiem PMSM wykorzystano trzy regulatory PI. Dwa z nich są odpowiedzialne za regulację prądów q i d , które są składowymi prądu w układzie współrzędnych statora. Trzeci regulator PI odpowiada za kontrolę prędkości obrotowej silnika. W celu uzyskania optymalnej wydajności układu, kluczowe jest odpowiednie dobranie parametrów regulatora PI.

Pierwszym krokiem w procesie doboru parametrów regulatora PI jest ustalenie wzmocnienia proporcjonalnego (K_p). Wartość tego parametru ma bezpośredni wpływ na szybkość reakcji regulatora na błędy. W przypadku zbyt ni-

skiego K_p , układ może wykazywać opóźnioną reakcję, natomiast zbyt wysokie wartości mogą prowadzić do nadmiernej przeregulowania i destabilizacji układu.

Następnie, kluczowym parametrem jest czas całkowania (T_i). Parametr ten decyduje o zdolności regulatora do eliminowania błędów ustalonych. Dostosowanie wartości T_i umożliwia skuteczne regulowanie błędów przy jednoczesnym unikaniu nadmiernej przeregulowania.

Tabela 2. Parametry testowanego przekształtnika

Napięcie w DC-linku V_{dc}	800 V
Częstotliwość łączeniowa f_{sw}	20 kHz
Wzmocnienie przekształtnika k_p	$K_p=V_{dc}$
Opóźnienie wysterowania T_p	$T_p=1/f_{sw}$
Częstotliwość próbkowania czujników f_{sam}	10 kHz

W celu przeprowadzenia testów, zdecydowano się nie skalować czujników, a pomiary przeprowadzono na ich fizycznych wartościach. Parametry czujników prądu i prędkości zostały ustawione na wartość $k_i=k_w=1$. Opóźnienia czujników prądu i prędkości przyjęto jako $T_i=T_w=0$.

Regulatory prądu w osi d i q zostały dostosowane do pracy z zablokowanym wirnikiem silnika ($n=const.=0$). Opóźnienie w sterowaniu przekształtnikiem zostało przybliżone za pomocą członu inercyjnego o stałej czasowej T_p . W takich warunkach, obiekt regulacji można opisać następującą transmitancją:

$$G_i(s) = \frac{\frac{k_p}{R_s} k_i}{(T_p s + 1)(T_e s + 1)}$$

Gdzie: $T_p=1/f_{sw} = 0,05ms$ – opóźnienie przekształtnika; $T_e = L_d/R_s = 1,44ms$ – dla regulacji prądu w osi d ; $T_e = L_q/R_s = 4,45ms$ – dla regulacji prądu w osi q

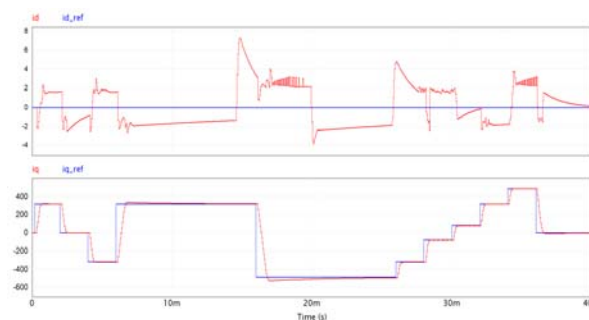
Obiekt regulacji da się przedstawić jako kaskadę członów inercyjnych z jedną dominującą stałą czasową, co umożliwia dobór nastaw regulatorów zgodnie z kryteriami Kesslera. Nastawy regulatorów prądu dobrano z kryterium modułowego optimum.

Obiekt regulacji jest reprezentowany jako kaskada członów inercyjnych z jednym dominującym parametrem czasowym. To pozwala na dostosowanie parametrów regulatorów zgodnie z kryterium Kesslera. Nastawy regulatorów prądu zostały dobrane, wykorzystując kryterium optymalizacji modułowej.

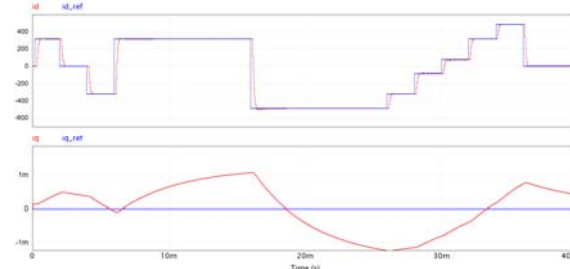
Tabela 3. Parametry regulatorów prądu

Sym-bol	Nastawy	Nazwa
K_{id}	L_d	Wzmocnienie regulatora id
	$\frac{2kp * ki * Tp}{Rs}$	
KI_{id}	$\frac{2kp * ki * Tp}{Rs}$	Wzmocnienie w członie całkującym regulatora id
T_{id}	$\frac{K_{id}}{KI_{id}}$	Stała czasowa członu całkującego regulatora id
	$\frac{Lq}{Rs}$	
K_{iq}	$\frac{2kp * ki * Tp}{Rs}$	Wzmocnienie regulatora iq
	$\frac{2kp * ki * Tp}{Rs}$	
KI_{iq}	$\frac{2kp * ki * Tp}{Rs}$	Wzmocnienie w członie całkującym regulatora iq
T_{iq}	$\frac{K_{iq}}{KI_{iq}}$	Stała czasowa członu całkującego regulatora iq
	$\frac{Lq}{Rs}$	

Poniższe rysunki 5 i 6 przedstawiają model symulacyjny do testowania regulacji prądu, oraz wyniki testów działania regulatorów: wymuszenie $id=0$ oraz iq zmienne z przedziału $\langle -I_{max}, I_{max} \rangle$ i na odwrót, tj. $iq=0$, $id \langle -I_{max}, I_{max} \rangle$.

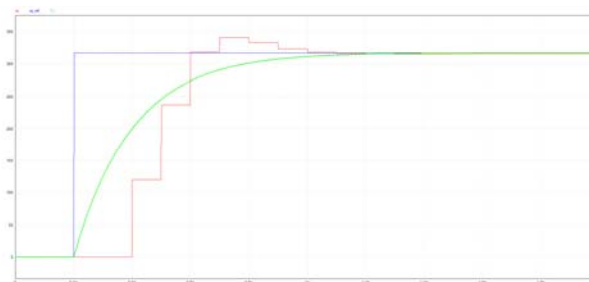


Rys. 7. Test zmiennych wymuszeń regulatora iq przy stałym wymuszeniu $id=0$. Oznaczenie osi wykresu: oś x , czas w [s], oś y wartość prądu w [A]



Rys. 8. Test zmiennych wymuszeń regulatora id przy stałym wymuszeniu $iq=0$. Oznaczenie osi wykresu: oś x , czas w [s], oś y wartość prądu w [A]

Obiektem sterowania jest część mechaniczna silnika w kaskadzie z częścią prądową wraz z regulatorem iq . Regulatora prądu wraz z modelem równania prądowego nie da się przedstawić jako iloczyn członów inercyjnych. Aby umożliwić zastosowanie kryteriów Kesslera zastosowano aproksymację części prądowej członem inercyjnym o stałej czasowej $T_x = 3ms$ (rysunek poniżej – odpowiedź skokowa na wymuszenie I_n układu sterowania prądu oraz członu aproksymującego).



Rys. 7. Odpowiedź na wymuszenie prądu znamionowego w osi q wraz z odpowiedzią aproksymującego członu inercyjnego o stałej czasowej $T_x=3ms$. Oznaczenie osi wykresu: oś x , czas w [s], oś y wartość prądu w [A]

Tak aproksymowany układ daje się przedstawić jako następująca transmitancja:

$$G_w(s) = \frac{3P * Ke_{SI} * k_w}{2B * k_i} \frac{1}{(T_x s + 1)(T_t s + 1)}$$

gdzie: $T_x=3ms$ – dobrane symulacyjnie; $T_t=J/B=238s$

Iloczyn członów inercyjnych z jedną dominującą stałą czasową – możliwe zastosowanie kryteriów Kesslera. Nastawy regulatora prędkości będą z kryterium symetrycznego optimum.

Tabela 4. Parametry regulatora prędkości

Symbol	Nastawy	Nazwa
K _w	$J * ki$	Wzmocnienie regulatora prędkości
	$3 \frac{P}{2} Ke_{SI} * kw *$	
KI _w	$J * ki$	Wzmocnienie w członie całkującym regulatora prędkości
	$12 \frac{P}{2} Ke_{SI} * kw *$	
T _w	$\frac{K_w}{KI_w}$	Stała czasowa członu całkującego regulatora prędkości

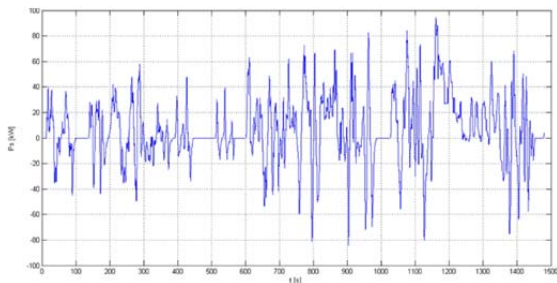
Po wstępnym doborze parametrów K_p i T_i, konieczne jest przeprowadzenie testów na rzeczywistym obiekcie lub za pomocą symulacji. Ocena wydajności regulatora obejmuje monitorowanie reakcji układu na zmiany prędkości i momentu obrotowego, analizę błędów śledzenia oraz innych wskaźników efektywności.

Projektowany układ sterowania PMSM uwzględnia istotne aspekty zabezpieczeń. Ograniczenia prądowe i napięciowe zostały włączone, aby chronić silnik przed potencjalnymi uszkodzeniami i przeciążeniami.

Dobór parametrów regulatora PI w układzie sterowania silnikiem PMSM to proces wymagający iteracji, precyzji oraz cierpliwości. Wartości wzmocnienia proporcjonalnego (K_p) i czasu całkowania (T_i) mają kluczowe znaczenie dla osiągnięcia stabilnego i efektywnego sterowania. Przeprowadzanie testów w kontrolowanych warunkach oraz regularna analiza spełniania założonych celów sterowania stanowią istotne elementy procesu projektowego.

Wyniki obliczeń trakcyjnych

Wykonano obliczenia symulacyjne mające za zadanie weryfikację założeń dotyczących doboru parametrów silnika. Do testów zastosowano procedurę (profil) WLTP dla pojazdów kategorii N2. Przebieg mocy na wale silnika przedstawiono na Rys.9.



Rys.9. Przebieg mocy silnika w cyklu WLTP.

Moc maksymalna w cyklu nie przekracza wartości 90 kW co może sugerować przewymiarowanie silnika. W drugim cyklu badań symulacyjnych wykonano obliczenia przy ruszaniu pojazdu na 4 wybranych nachyleniach trasy: 0%, 5%, 11% i 20% z założonym przyspieszeniem 0.5 m/s² do prędkości 13.88 m/s (50 km/h) przy wprowadzeniu ograniczeń momentu rozruchowego wynikających z charakterystyk silnika napędowego. Dla nachylenia 5% nie widać znaczącej różnicy w dynamice pojazdu. Natomiast dla większych nachyleń widać spadek wartości przyspieszenia i co za tym idzie wydłużenie czasu osiągnięcia prędkości zadanej. Spowodowane jest to pracą w strefie ze stałą mocą przy zmniejszającym się momencie napędowym. Można przyjąć, że wartość 8-9% jest wartością maksymalną na jaką może wjechać pojazd z przyspieszeniem 0.5 m/s² przy ograniczeniu momentu do wartości znamionowej.

Próba wjazdu na wzniesieni 20% z ograniczeniem momentu do 842 Nm pozwoliła uzyskać zakładaną prędkość po czasie 63s z przyspieszeniem 0.25-0.15 m/s² i z przecroczeniem mocy znamionowej w czasie ok 10s do wartości 130 kW w czasie ok 10 s.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Artykuł omawia nowoczesny system napędowy z silnikiem PMSM, zintegrowanym falownikiem oraz ładowarką pokładową dla pojazdów elektrycznych. Wraz z rozwojem e-commerce oraz wprowadzeniem stref zielonych w miastach, wzrasta zapotrzebowanie na lekkie bez emisyjne pojazdy dostawcze, co powoduje zwiększenie zapotrzebowania na pojazdy dostawcze elektryczne. Konsorcjum postanowiło zaprojektować system napędowy, który może być używany w szerokim zakresie pojazdów elektrycznych, zmniejszając koszty produkcji takiego napędu.

Proponowane parametry dla takiego systemu napędowego to odpowiednio 130/260 kW i 520/1200 Nm przy zasilaniu bateryjnym 700 Vdc oraz maksymalną prędkością pojazdu wynoszącą 136 km/h.

Projekt ma na celu stworzenie elastycznego rozwiązania, które może być stosowane zarówno w pojazdach pasażerskich, jak i lekkich dostawczych pojazdach elektrycznych, z możliwością stosowania mechanicznych przekładni o niższym przełożeniu ok 4.

W projekcie zastosowano szeroko pojętą integrację obejmującą połączenie w jedną bryłę silnika i falownika, a poza tym część elementów energoelektronicznych i uzwojenia silnika zostaną wykorzystane podczas postoju pojazdu do stworzenia obwodu ładowarki pokładowej.

Do sterowania silnikiem zostanie zaimplementowany algorytm FOC (field oriented control), pozwalający na bardzo precyzyjne sterowanie silnikiem PMSM.

Ze wstępnych obliczeń wynika, że napęd będzie zdolny do pokonywania wzniesień do 15% dla maksymalnej DMC do 4250 kg

Projekt realizowany jest w ramach wewnętrznego projektu w Sieci Badawczej Łukasiewicz, pod tytułem „Nowoczesny układ napędowy do pojazdów osobowych współpracujący z ładowarką pokładową”. (akronim iPOWER).

Autorzy: dr inż. Dariusz Świerczyński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: dariusz.swierczynski@iel.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Artur Moradewicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: artur.moradewicz@iel.lukasiewicz.gov.pl;

LITERATURA

- [1] Świerczyński D., Jasiński A., i inni, Napęd sześciofazowy z silnikiem PMSM dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 53 (2023), nr 1, 262-269
- [2] Dąbała K., Kaźmierkowski M.P., Converter-Fed Electric Vehicle (Car) Drives – A Critical Review, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2019), nr 9, 1-12
- [3] Cisek M., Jarzębowski L., Synchronizacja komutacji tranzystorów z położeniem kątowym wirnika silnika w napędzie IPMSM z blokowym sterowaniem falownikiem, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 10, 136-140
- [4] Absar S., Taha W., Emadi A., Efficiency Evaluation of Six-Phase VSI and NSI for 400V and 800V Electric Vehicle Powertrains, IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (2021), 1 -6