

Kompleksowy napęd elektryczny przeznaczony dla jednostek pływających

Marcin Barański, Adam Decner, Tomasz Jarek, Marcin Maciążek, Adam Litwinowicz

1. Wstęp

Transport jest jednym z głównych czynników określających rozwój gospodarczy kraju. Nowoczesna infrastruktura oraz dobrze funkcjonujący system transportowy sprzyjają wzrostowi gospodarczemu silnych ośrodków na te części kraju, które z uwagi na brak dobrej dostępności terytorialnej pozostają obecnie niewykorzystane. Umacnia to spójność społeczną, ekonomiczną oraz przestrzenną kraju. Przyczynia się także do wzmocnienia konkurencyjności gospodarki. Perspektywy oraz kierunki zaprezentowane w Strategii Rozwoju Transportu wyznaczają najważniejsze działania skoordynowane na osiągnięcie nadrzędnego celu, jakim jest usunięcie aktualnie istniejących przeszkód w infrastrukturze transportowej, jej zarządzaniu oraz w funkcjonujących systemach przewozowych. Wśród ważniejszych celów zawarto znaczącą modernizację dróg wodnych w Polsce oraz ułatwienie modernizacji taboru. Transport wodny śródlądowy jest jednym z najtańszych, a jednocześnie najbardziej przyjaznych dla środowiska ze względu między innymi na:

- względnie małe zużycie energii,
- niską emisyjność zanieczyszczeń powietrza,
- względnie niewielkie zanieczyszczenie wód,
- niższe koszty niż w transporcie drogowym.

Analiza działań proekologicznych mających na celu ograniczenie emisji spalin dowodzi, że w nieodległej przyszłości niektóre odcinki dróg wodnych zostaną całkowicie zamknięte dla statków z napędem spalinowym. W krajach europejskich planuje się znaczące ograniczenie emisji spalin, co mocno wpłynie na rodzaj oraz jakość wykorzystywanej

floty w żegludze śródlądowej, a także tej realizowanej na wewnętrznych wodach morskich. Z punktu widzenia eksploatacji armatorzy oczekują na rozwiązania, które zapewnią coraz mniejsze zużycie paliwa oraz usunięcie przeszkód wynikających z przytoczonych już ograniczeń żeglugi. Zatem przemysł stoczniowy musi poszerzyć swoją ofertę o jednostki nowej generacji, które wyposażone będą w silniki elektryczne [1]. Napędy takie wymuszają tworzenie nowych konstrukcji kadłubów oraz stosowanie nowoczesnych technologii wytwarzania i magazynowania energii, bądź też zastosowanie napędu hybrydowego. Napędy takie są już z sukcesami wykorzystywane w trakcji kolejowej oraz drogowej [2, 3]. W komercyjnych napędach statków śródlądowych jak dotąd brak jest znanych, gotowych do wprowadzenia na rynek kompleksowych rozwiązań, choć znane są rozwiązania stosowane w żegludzie morskiej. Istnieje zatem zapotrzebowanie na kompleksowe rozwiązania napędów do zastosowań w elektromobilności wodnej [4, 5]. Za kompletny napęd uważamy tutaj: ładowarkę (która umożliwia zarówno pracę z agregatu prądotwórczego, jak również ładowanie baterii z sieci elektroenergetycznej), zasobnik akumulatorowy, falownik, silnik napędowy, przekładnię, jednostkę sterującą ECU. Zaprojektowany oraz wykonany napęd jest zoptymalizowany pod względem energooszczędności oraz dynamiki pracy.

2. Koncepcja układu napędowego

Na podstawie rozeznania rynku oraz informacji pozyskanych od potencjalnych odbiorców opracowano koncepcję układu napędowego. Dobrano poszczególne podzespoły oraz elementy składowe. Dokonano konfiguracji oraz

Streszczenie: W artykule przedstawiono kompleksowy napęd elektryczny przeznaczony dla jednostek pływających. Przedstawione rozwiązanie składa się z silnika elektrycznego, przekładni mechanicznej, falownika, ładowarki, baterii oraz jednostki sterującej. Koncepcja napędu powstała w oparciu o rozeznanie rynku oraz informacji od potencjalnych odbiorców. Funkcjonalność układu napędowego została przebadana w warunkach laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: napęd elektryczny, napęd do łodzi, elektromobilność, falownik, ładowarka

COMPREHENSIVE ELECTRIC DRIVE DEDICATED TO WATERCRAFTS

Abstract: The comprehensive electric drive dedicated to watercrafts is presented in this article. The presented solution consists of an electric motor, mechanical transmission, inverter, charger, battery and control unit. The drive concept was created basing on market research and information obtained from potential customers. The functionality of the drive system has been tested in laboratory conditions.

Keywords: electrical drive, boat drive, electromobility, inverter, charger

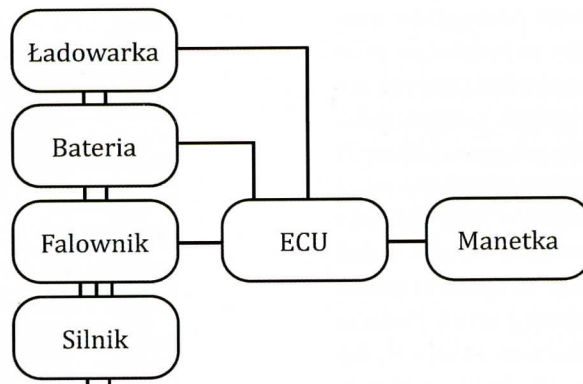
parametryzacji falowników. Opracowano podstawowe scenariusze pracy, zgodnie z którymi skonfigurowano sterownik ECU. Przebadano również funkcjonalność zarówno pojedynczych podzespołów, jak również całego układu napędowego w warunkach laboratoryjnych.

Schemat ideowy układu napędowego przedstawiono na rysunku 1. Układ ten

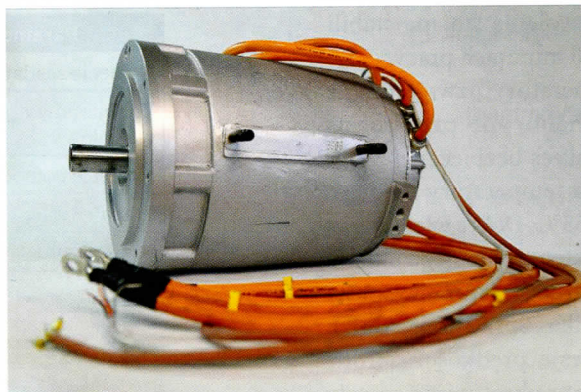
składa się z silnika wraz z przekładnią mechaniczną zasilanego z bateryjnego zasobnika energii elektrycznej poprzez falownik. Dopełnieniem jest dedykowana ładowarka umożliwiająca ładowanie baterii z przybrzeżnej sieci napięcia przemiennego 3×400 V lub agregatu prądotwórczego w przypadku rozwiązania wykorzystującego napęd hybrydowy.

3. Silnik elektryczny

Podstawowym elementem wykonanego układu napędowego dla jednostki pływającej jest 3-fazowy silnik elektryczny z magnesami trwałymi typu SMKwsg132L-6C. Wybór tego typu silnika pozwolił na osiągnięcie wysokiej sprawności (93% w znamionowym punkcie pracy), co w połączeniu z wydajnym wodnym układem chłodzenia skutkuje bardzo korzystnym współczynnikiem gęstości mocy. Opracowany silnik to 6-biegunowa konstrukcja z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika. Silnik przedstawiono na rysunku 2, a jego najważniejsze parametry przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego



Rys. 2. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi SMKwsg132L-6C

W celu weryfikacji parametrów oraz konstrukcji silnika napędowego przeprowadzono szereg badań. Weryfikacji parametrów termicznych maszyny dokonano na podstawie przeprowadzonych prób nagrzewania przy obciążeniu mocą 60 kW dla prędkości $n = 3500$ obr./min oraz $n = 4200$ obr./min. Wyniki badań w postaci wykresów temperatur przedstawiono na rysunkach 3 oraz 4. Podczas prób silnik był chłodzony wodą z wydajnością 8 dm³/min. Dla każdej z wymienionych prób osiągnięto bezpieczne wartości temperatur uzwojenia stojana. Temperatury uzwojenia stojana stabilizują się już po 30 minutach pracy.

Przyrost temperatury uzwojenia dla pierwszego wariantu nie przekroczył 80 K. Daje to zakres bezpiecznej pracy z daną mocą dla temperatury medium chłodzącego do 55°C. Dobre właściwości termiczne są efektem wydajnego układu chłodzenia wodnego oraz wysokiej sprawności silnika. Sprawność silnika w pełnym zakresie prędkości obrotowej oraz momentu obrotowego została przedstawiona graficznie w postaci wykresu konturowego na rysunku 5 [6].

Dla zdecydowanej większości dostępnego obszaru charakterystyki zewnętrznej silnik charakteryzuje się wysoką sprawnością nie mniejszą niż 90%, a dla obszaru mocy znamionowej sprawność silnika sięga 94%. Taka sprawność nie tylko rzutuje na mniejsze temperatury silnika, ale przede wszystkim pozwala efektywnie wykorzystać energię zgromadzoną w bateryjnych zasobnikach i korzystnie wpływa na autonomię jednostki.

4. Falownik

Kluczowym elementem układów napędowych z nowoczesnymi silnikami elektrycznymi są przekształtniki energoelektroniczne, zwane falownikami. Jest to aparatura przetwarzająca napięcie stałe dostarczone z baterii na trójfazowy prąd przemienny wykorzystywany do zasilania silników napędowych. Dzięki zastosowanym algorytmom sterowania można precyzyjnie kontrolować prędkość i moment obrotowy silnika, co przekłada się na oszczędność energii i poprawę wydajności jednostki.

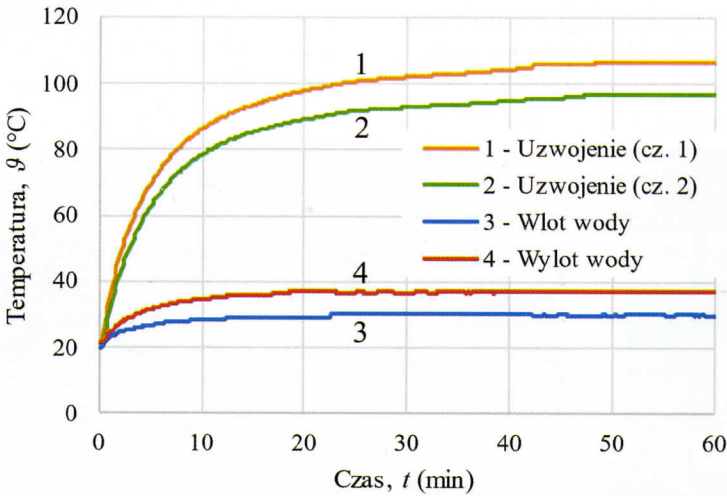
Dla projektowanego układu napędowego dla jednostki pływającej wybrano falownik (kontroler silnika) SKAI 45 A2

Tabela. 1. Parametry silnika napędowego

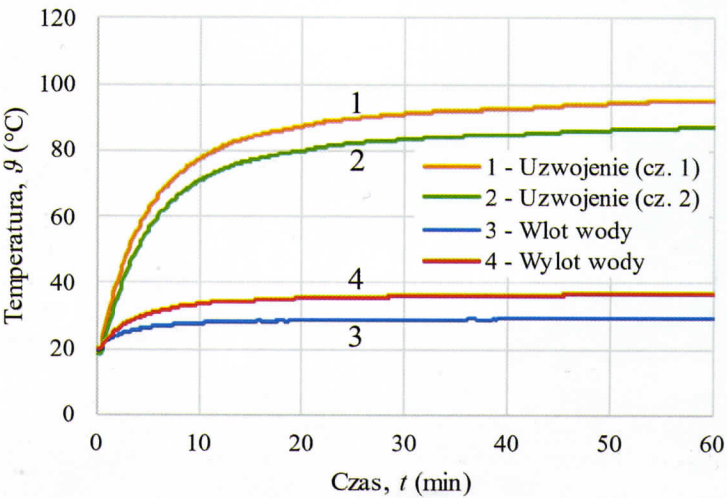
Parametr	Symbol	Wartość
Moc znamionowa	P_N	60 kW
Prędkość obrotowa znamionowa	n_N	3500 obr./min
Prędkość obrotowa maksymalna	n_{max}	7200 obr./min
Moment znamionowy	T_N	137 Nm
Moment maksymalny	T_{max}	300 Nm
Sprawność znamionowa	η	93%
Masa silnika	m	65 kg

Tabela. 2. Podstawowe parametry falownika

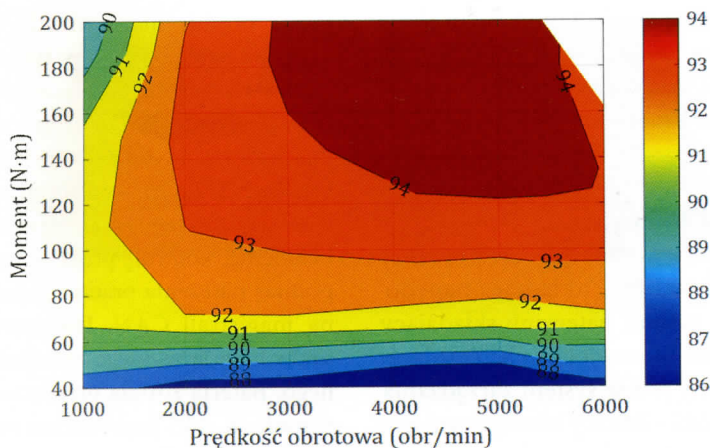
Parametr	Symbol	Wartość
Napięcie zasilania DC	U_{DC}	800 V
Znamionowy prąd wyjściowy	I_N	300 A _{RMS}
Napięcie pomocnicze	U_{max}	12 / 24 V
Waga	m	13,9 kg
Stopień ochrony	-	IP67



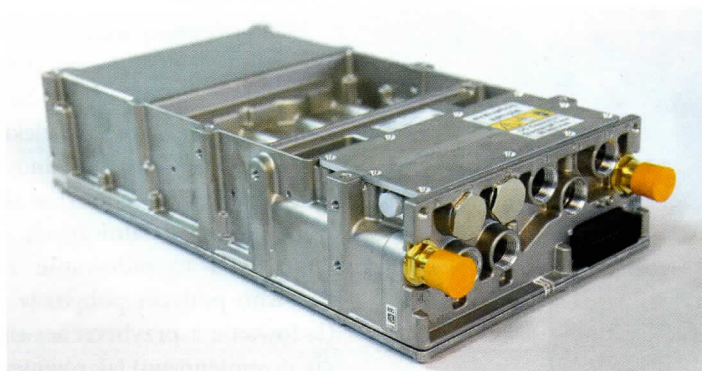
Rys. 3. Temperatury uzwojenia silnika podczas próby nagrzewania dla $P_m = 60$ kW, $n = 3500$ obr./min



Rys. 4. Temperatury uzwojenia silnika podczas próby nagrzewania dla $P_m = 60$ kW, $n = 4200$ obr./min



Rys. 5. Mapa sprawności silnika



Rys. 6. Falownik SKAI 45 A2 GD12-WQI

GD12-WQI (rys. 6), którego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 2. Przekształtnik ma 2-poziomową topologię opartą na 6 tranzystorach IGBT wykonanych w technologii spiekanej. Całość została zamknięta w kompaktowej obudowie zapewniającej stopień ochrony IP67. Przekształtnik współpracuje z czujnikiem pozycji kątowej silnika (absolutnym), a komunikacja ze sterownikiem odbywa się dzięki magistrali CAN.

4. Falownik

Kluczowym elementem układów napędowych z nowoczesnymi silnikami elektrycznymi są przekształtniki energoelektroniczne, zwane falownikami. Jest to aparatura przetwarzająca napięcie stałe dostarczone z baterii na trójfazowy prąd przemienny wykorzystywany do zasilania silników napędowych. Dzięki zastosowanym algorytmom sterowania można precyzyjnie kontrolować prędkość i moment obrotowy silnika, co przekłada się na oszczędność energii i poprawę wydajności jednostki.

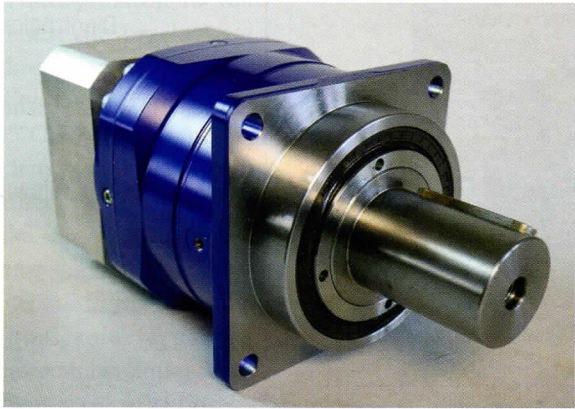
Dla projektowanego układu napędowego dla jednostki pływającej wybrano falownik (kontroler silnika) SKAI 45 A2 GD12-WQI (rys. 6), którego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 2. Przekształtnik ma 2-poziomową topologię opartą na 6 tranzystorach IGBT wykonanych w technologii spiekanej. Całość została zamknięta w kompaktowej obudowie zapewniającej stopień ochrony IP67. Przekształtnik współpracuje z czujnikiem pozycji kątowej silnika (absolutnym), a komunikacja ze sterownikiem odbywa się dzięki magistrali CAN.

Falownik został sparametryzowany oraz skonfigurowany do pracy z silnikiem SMKwsg132L-6C. Falownik wymaga chłodzenia wodnego.

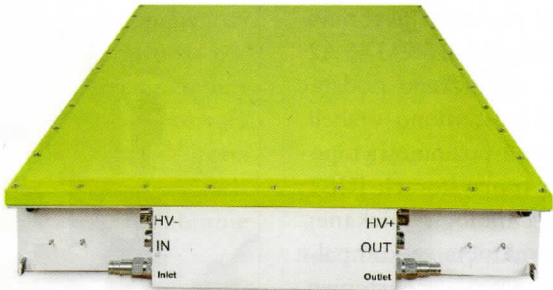
5. Przekładnia mechaniczna

Po konsultacjach przedprojektowych z potencjalnymi odbiorcami zdecydowano się na rozwiązanie oparte na zestawie napędowym silnik – przekładnia. Podjęto taką decyzję, gdyż zastosowanie układu bezprzekładniowego,

który umożliwiałby pracę z mocą 45 kW oraz prędkością obrotową w zakresie 500÷1200 obr./min byłoby bardzo trudne [7]. Wymagałoby to wykonania konstrukcji silnika o zdecydowanie większych gabarytach aniżeli w przypadku zastosowania silnika o wyższej prędkości obrotowej i przekładni mechanicznej. Dla opracowywanego napędu wybrano przekładnię planetarną z przełożeniem 5:1 przedstawioną na rysunku 7. Jej podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 3. Konstrukcja przekładni nie wymaga stosowania chłodzenia dla pracy przy parametrach znamionowych.



Rys. 7. Przekładnia mechaniczna



Rys. 8. Bateria trakcyjna

Producent zapewnia minimalnym okresie pracy równy 30000 godzin, podczas którego niewymagana jest wymiana środka smarowego. Bezobsługowość przekładni stanowi jej bardzo ważną cechę.

6. Bateria trakcyjna

Zasobnikiem energii elektrycznej w opracowanym układzie napędowym jest system baterijny składający się z ogniw litowo-jonowych. Zasobnik wyposażony jest w system zarządzania baterią (BMS – Battery Management System). System ten odpowiada za utrzymanie ogniw bateryjnych w wyznaczonych

przez producenta limitach temperatur oraz napięć. Praca w tym zakresie pozwala zapewnić bezpieczeństwo podczas eksploatacji. Do tego celu służy dedykowany moduł nadzorujący baterię. Odpowiada on za bezpieczeństwo, ustalanie parametrów dynamicznych baterii, balancing, kontrolę procesu ładowania, pomiar natężenia prądu i komunikację na magistrali CAN. Do prawidłowej pracy bateria wymaga chłodzenia wodnego. Bateria została przedstawiona na rysunku 8, a jej podstawowe parametry zebrano w tabeli 4.

7. Ładowarka

Ważną funkcją układu napędowego dla jednostki pływającej jest możliwość ładowania zainstalowanej baterii trakcyjnej. W odróżnieniu od elektrycznych pojazdów kołowych, na jednostce pływającej ładowarka wchodzi w skład komponentów zainstalowanych na statku. Umożliwia to ładowanie zasobnika zarówno podczas pobytu w przystani (ładowanie z przybrzeżnej sieci napięcia przemiennej) jak również podczas normalnej pracy jednostki (w przypadku napędu hybrydowego). Dla opracowanego napędu wybrano ładowarkę z rynku krajowego, która jest przekształtnikiem energoelektronicznym AC/DC o mocy 50 kW z wewnętrzną izolacją. Ładowarkę przedstawiono na rysunku 9, natomiast podstawowe parametry urządzenia umieszczono w tabeli 5.

Innowatorska konstrukcja przekształtnika umożliwiła zmniejszenie jego gabarytów. Było to możliwe dzięki zastosowaniu wysokoczęstotliwościowego transformatora separacyjnego, który zastąpił duże i ciężkie transformatory

Tabela. 3. Podstawowe parametry przekładni mechanicznej

Parametr	Symbol	Wartość
Przełożenie	i	5
Maksymalny moment wyjściowy	T_{max}	2000 Nm
Znamionowy moment wyjściowy	T_n	1141 Nm
Maksymalna prędkość wejściowa	n_{max}	6000 obr./min
Znamionowa prędkość wejściowa	n_n	3500 obr./min
Waga	m	56 kg
Sprawność przy pracy znamionowej	η	98,5%

Tabela. 4. Podstawowe parametry baterii trakcyjnej

Parametr	Symbol	Wartość
Energia nominalna	E	34 kWh
Napięcie maksymalne pracy	$UDC(max)$	375 V
Napięcie nominalne pracy	$UDC(nom)$	333 V
Napięcie minimalne pracy	$UDC(min)$	270 V
Maksymalny ciągły prąd rozładowania	I	150 A
Maksymalny chwilowy prąd rozładowania	$I(max)$	200 A
Stopień ochrony	-	IP66



Rys. 9. Ładowarka



Rys. 10. Sterownik ECU

o częstotliwości sieciowej 50 Hz. Nowością jest również zastosowanie nowoczesnych tranzystorów wykonanych w technologii SiC, co przekłada się na wysoką sprawność urządzenia. Ładowarka na potrzeby napędu została zmodyfikowana przez producenta zgodnie z określonymi wymaganiami – dodano funkcjonalność sterowania ładowarką bazującą na protokole komunikacyjnym CAN. Dzięki temu ładowarka może komunikować się z jednostką sterującą ECU, odbierać komendy sterujące oraz przysyłać informacje o aktualnym stanie pracy.

8. Jednostka sterująca ECU

Centralną częścią układu napędowego jest sterownik ECU (Electronic Control Unit). Jego zadaniem jest zapewnienie komunikacji pomiędzy wszystkimi sterowanymi komponentami układu. Jako komputer pokładowy wybrano TTC540 CD przedstawiony na rys 10.

Zbudowany na bazie mikrokontrolera Texas Instruments TMS570

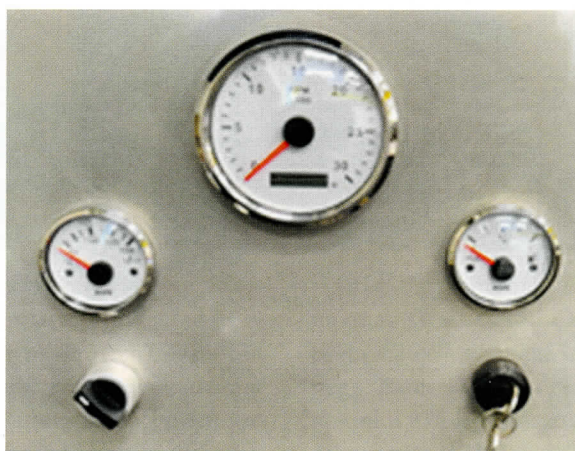


Rys. 11. Manetka cyfrowa

przystosowany jest on do zastosowań w elektromobilności. Spełnia wytyczne bezpieczeństwa funkcjonalnego, jest zgodny z normą IEC 61508 SIL2. Umożliwia pracę w szerokim zakresie temperatur: od -40 do 85°C. Ma wbudowane 3 MB pamięci programu, 256 kB pamięci o dostępie swobodnym, zegar czasu rzeczywistego oraz liczne interfejsy komunikacyjne: Sterownik ECU obsługuje następujące komponenty: układ nadzorujący pracę baterii, pokładową ładowarkę baterii trakcyjnej, energoelektroniczny falownik silnika trakcyjnego oraz tablicę wskaźników i manetkę. Sterownik umożliwia również sterowanie pracą pomp w układzie chłodzenia napędów elektrycznych.

9. Urządzenia peryferyjne

W ramach opracowanego napędu dokonano również selekcji i parametryzacji urządzeń peryferyjnych służących zarówno do zadawania prędkości obrotowej, jak również otrzymywania informacji zwrotnych dotyczących m.in. takich parametrów jak: prędkość obrotowa, informacja z czujników temperatury, poziom naładowania baterii itp. Do zadawania prędkości obrotowej silnika została wyselekcjonowana manetka cyfrowa. Natomiast do wyświetlania informacji wykorzystywane są klasyczne zegary analogowe. Urządzenia przedstawiono na rysunkach 11 oraz 12.



Rys. 12. Wskaźniki analogowe

10. Podsumowanie

W ramach realizacji pracy przeprowadzono szereg prac konstruktorskich i rozwojowych. Opracowany i wykonany napęd dla jednostki pływającej to kompleksowe rozwiązanie i jest odpowiedzią na aktualne zapotrzebowanie rynkowe – brak analogicznych produktów co najmniej na rynku krajowym.

Ładowarki będące elementem napędu nie tylko umożliwiają ładowanie baterii korzystając z przybrzeżnej sieci napięcia przemienne, ale również współpracę z agregatami prądotwórczymi zainstalowanymi na jednostce. Znacząco zwiększa to autonomię statku. Praca z baterijnego zasobnika energii cechuje się zerową emisją zanieczyszczeń w miejscu eksploatacji oraz znaczącym obniżeniem hałasu. Zastosowanie przekładni mechanicznej znacząco zredukowało masę i gabaryty jednostki napędowej. Warto podkreślić, że opracowany produkt może być łatwo skalowalny i dostosowany do innych jednostek pływających (np. poprzez zmianę liczby napędów, zwiększenie pojemności zasobnika energii lub zmianę prędkości obrotowej).

Literatura

- [1] Z. Goryca: Elektryczny, niskonapięciowy układ napędowy łodzi, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*, 76/2007.
- [2] E. Król, T. Wolnik: Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych – właściwości układu zasilania ograniczające parametry silnika, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe* Nr 2/2021.
- [3] R. Rossa, E. Król: Regulacja prędkości

obrotowej w napędzie elektrycznym e-Kit dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych. *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*, 4(97)/2012.

- [4] T. Freire, D.M. Sousa, J.C. Branco: Aspects of modeling an electric boat propulsion system, *IEEE Xplore* 2010.
- [5] C.S. Postiglione, D.A.F. Collier, B.S. Dupczak, M.L. Heldwein, A.J. Perin: Propulsion system for an all electric passenger boat employing permanent magnet synchronous motors and modern power electronics, *IEEE Xplore* 2012.
- [6] R. Rossa: Napęd elektryczny Ekit – kształtowanie charakterystyk elektromechanicznych wybranymi zabiegami konstrukcyjnymi, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2021.
- [7] T. Wolnik, E. Król: Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych – czy moc znamionowa silnika decyduje o jego gabarycie i masie?, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe* Nr 2/2019.

artykuł recenzowany

dr inż. Marcin Barański,
dr inż. Adam Decner,
mgr inż. Tomasz Jarek,
dr hab. inż. Marcin Maciążek,
mgr inż. Adam Litwinowicz
Sieć Badawcza Łukasiewicz
– Górnośląski Instytut Technologiczny,
Centrum Napędów i Maszyn
Elektrycznych,
ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec