

**ANALIZA, SYNTEZA I OPTYMALIZACJA
UKŁADÓW ELEKTRYCZNYCH**

**ANALYSIS, SYNTHESIS AND OPTIMIZATION
ELECTRICAL SYSTEMS**

Monografia naukowa pod redakcją
Dariusza Grabowskiego

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Gliwice 2023

REDAKTOR MONOGRAFII: Dr hab. Dariusz GRABOWSKI, prof. PŚ

RECENZENCI: Prof. dr hab. inż. Marian ŁUKANISZYN

Dr hab. inż. Adrian Nocoń, prof. PŚ

REDAKCJA TECHNICZNA: Grażyna WEGIERA

Kolegium redakcyjne

REDAKTOR NACZELNY – Dr hab. inż. Barbara KULESZ, prof. PŚ

REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Adam GAŁUSZKA, prof. PŚ

SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Monika MOSZCZYŃSKA-GŁOWACKA

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

DOI. 10.34918/85349

e-ISBN 978-83-7880-897-8

© Copyright by

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

Gliwice 2023

Wydawnictwo
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice,
tel. (32) 237 18 48, (32) 237 17 26
<https://wydawnictwopolitechniki.pl/>

Spis treści

Wstęp.....	5
Krzysztof Sztymelski, Grzegorz Ziolo Rzeczywisty spadek pojemności akumulatora litowego NMC przy rozładowaniu w niskich temperaturach	6
Wojciech Klein, Krzysztof Sztymelski, Olaf Dudek, Rafał Kloska Wydajność energetyczna robotów mobilnych podczas realizacji zadań logistycznych ...	14
Janusz Pochmara, Aleksandra Świetlicka, Krzysztof Kolanowski, Kornelia Girejko, Jakub Jankowski, Wymagania stawiane robotom w procesie sterowania ich ruchem przy pomocy wydawania komend głosowych	24
Piotr Holajn Zdalny monitoring parametrów instalacji grzewczej domu jednorodzinnego	34
Krzysztof Sztymelski, Adam Pilśniak, Marcin Fice, Bartłomiej Gąsior, Piotr Janota, Michał Sorek, Dawid Namysło Projekt i realizacja symulatora źródła OZE z cyfrowo sterowaną charakterystyką prądowo-napięciową	42
Andrzej Jurkiewicz, Marcin Fice Sterowanie generatorem indukcyjnym mikrobiogazowni w trybie on/off-grid.....	50
Janusz Kolodziej, Rafał Gabor, Marcin Kowol, Marian Łukaniszyn Analiza pola magnetycznego w przekładni magnetycznej o strumieniu osiowym.....	60

Contents

Foreword	5
Krzysztof Sztymelski, Grzegorz Ziolo The real capacity drop of the NMC type lithium battery when discharge at low temperatures	6
Janusz Wojciech Klein, Krzysztof Sztymelski, Olaf Dudek, Rafał Kloska Energy efficiency of mobile robots during logistics tasks	14
Janusz Pochmara, Aleksandra Świetlicka, Krzysztof Kolanowski, Kornelia Girejko, Jakub Jankowski, Requirements for robots in the process of control based on the human voice.....	24
Piotr Holajn Remote monitoring of the heating installation parameters of a single-family house	34
Krzysztof Sztymelski, Adam Pilśniak, Marcin Fice, Bartłomiej Gąsior, Piotr Janota, Michał Sorek, Dawid Namysło Design and implementation of a renewable-source simulator with digitally controlled current-voltage characteristics	42
Andrzej Jurkiewicz, Marcin Fice Control of the induction generator for a microbiogas plant In the on/off-grid mode	50
Kolodziej, Rafał Gabor, Marcin Kowol, Marian Łukaniszyn Magnetic field analysis of the magnetic gear with axial flux	60

Wstęp

W skład monografii wchodzi siedem artykułów przedstawiających najnowsze wyniki badań realizowanych przez zespoły badawcze z Politechniki Opolskiej, Politechniki Poznańskiej oraz Politechniki Śląskiej. Badania były w dużej mierze realizowane przy współpracy z partnerami z przemysłu (eGmina, Infrastruktura, Energetyka Sp. z o.o. oraz Etisoft Smart Solutions), a w przypadku dwóch artykułów w badania byli zaangażowani także studenci. Można zatem uznać, że w niniejszej monografii udało się połączyć młodzieńczą pasję z doświadczeniem oraz teorię z praktyką.

Monografię rozpoczyna artykuł dotyczący analizy wydajności akumulatorowych magazynów energii o niewielkich wymiarach w przypadku aplikacji we współczesnej robotyce mobilnej w pomieszczeniach o temperaturze poniżej -20°C . W drugim artykule przedstawiono istotną, z punktu widzenia projektowania systemów intralogistycznych, analizę zużycia energii dla zadań logistycznych realizowanych przez roboty mobilne. Kolejna praca zawiera propozycję innowacyjnego systemu sterowania głosowego robotem przemysłowym z wykorzystaniem komend w języku polskim. Grupę artykułów poświęconych robotyce i sterowaniu zamyka publikacja przedstawiająca rozbudowany układ zdalnej kontroli i monitoringu systemu ogrzewania. W następnym artykule można zapoznać się z projektem i budową symulatora fotowoltaicznego źródła odnawialnego. Przedostatni artykuł dotyczący mikrobiogazowni przedstawia projekt dopasowania generatora spalinowego z prądnicą indukcyjną do pracy w trybach on-grid i off-grid. Monografię zamyka artykuł poświęcony analizie przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym.

Mam nadzieję, że wyniki badań zaprezentowane w monografii wzbudzą zainteresowanie czytelników, stając się pomocą i inspiracją do rozwoju kolejnych innowacyjnych rozwiązań wykorzystywanych w praktyce.

Dariusz Grabowski

Krzysztof SZTYMELSKI¹, Grzegorz ZIOŁO²

¹Politechnika Śląska, ²Etisoft Smart Solutions Sp. z o. o.

THE REAL CAPACITY DROP OF THE NMC TYPE LITHIUM BATTERY WHEN DISCHARGE AT LOW TEMPERATURES

RZECZYWISTY SPADEK POJEMNOŚCI AKUMULATORA LITOWEGO NMC PRZY ROZŁADOWANIU W NISKICH TEMPERATURACH

Streszczenie. Współczesna robotyka mobilna wymaga zastosowania niewielkich lecz wydajnych akumulatorowych magazynów energii. Na dzień dzisiejszy komercyjne ogniwa odwracalne 18650, wykonane w technologii NMC, cechuje jeden z najwyższych współczynników gęstości energii (w stosunku do gabarytu i masy ogniwa). Robotyzacja pomieszczeń, gdzie środowiskowo praca ludzi jest bardzo trudna, jest istotna dla potencjalnych inwestorów w tego typu rozwiązania. Jednym z takich miejsc są wielkogabarytowe mroźnie przemysłowe, stanowiące magazyny dla przemysłu spożywczego lub medycznego. W pomieszczeniach takich temperatura jest niższa niż -20°C. Obsługa mroźni przez roboty mobilne typu AGV lub AMR to rozwiązanie globalnie bardzo innowacyjne. W artykule przedstawiono rzeczywiste wyniki badań porównawczych rozładowania akumulatorowego magazynu energii przeznaczonego dla pojazdów AGV/AMR wykonanego w technologii NMC, w temperaturze pokojowej, w stosunku do rozładowania w temperaturze poniżej -20°C.

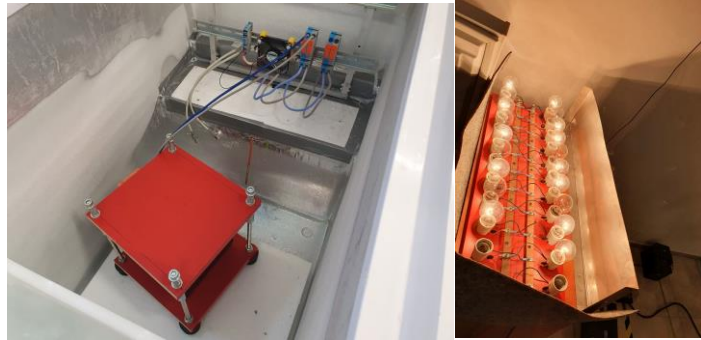
Słowa kluczowe: robotyka mobilna, ogniwa odwracalne, akumulatory litowe, Pb, LFP, NMC, praca akumulatorów w ujemnych temperaturach.

Wstęp

Pojazdy AGV lub AMR stają się obecnie istotnym elementem Przemysłu 4.0. Istota zastosowania tego typu rozwiązań jest bardzo różna. Robotykę taką można spotkać tam, gdzie zautomatyzowany proces intralogistyczny należy przeprowadzać szybciej niż klasycznie (z wykorzystaniem pracowników) lub w miejscach gdzie praca ludzi jest niebezpieczna lub bardzo trudna np. przez czynniki zewnętrzne w otoczeniu magazynu. Wspólnym mianownikiem tego typu rozwiązań jest konieczność akumulatorowego zasilania pojazdów. Najczęstszym miejscem pracy pojazdów AGV są magazyny wielkopowierzchniowe. Dla przemysłu spożywczego magazyny takie niejednokrotnie wymagają bardzo niskich temperatur (chłodnie lub mroźnie przemysłowe). Z uwagi na fakt obniżonej sprawności i niemal całkowity brak możliwości ładowania nowoczesnych akumulatorów o wysokiej gęstości energii w ujemnych temperaturach, rozwiązań bazujących na pojazdach AGV, nie ma obecnie w ofertach producentów tego typu sprzętu. Jednocześnie niemal automatyczny pomysł podgrzewania akumulatora korzystając z energii w nim zgromadzonej na tyle ogranicza czas pracy pojazdu między kolejnymi ładowaniami, że rozsądnym pomysłem staje się rozpatrzenie innych możliwości rozwiązania takiego problemu inżynierskiego.

Badania wstępne

Początkowo dla oszacowania strat energii możliwej do odzyskania z rozładowywanego akumulatora, w niskich temperaturach, postanowiono zarejestrować maksymalny czas rozładowania akumulatora obciążonego rezystancyjnie za pomocą odpowiednio połączonych żarówek rys. 1.



Rys. 1. Badania początkowe

Celem ograniczenia prądu początkowego związanego z małą rezystancją zimnych włókien żarówek, w szereg z każdą z nich został włączony termistor typu NTC. Badania zakładały porównanie czasu rozładowania w cieple i zimnie do odcięcia akumulatora przez zabezpieczenie BMS. Zarejestrowano jedynie o 8% krótszy czas rozładowania w zimnie w stosunku do ogrzanego akumulatora. Problem spadku pojemności energii wydawał się więc nieistotny w dalszych etapach prac projektowych pojazdu AGV przeznaczonego dla mroźni przemysłowych.

Kolejnym etapem był test czasu pracy robota wykonującego identyczne przejazdy w warunkach normalnych oraz w rzeczywistej mroźni przemysłowej rys. 2



Rys. 2. Testy w rzeczywistej mroźni przemysłowej

Pewnym zaskoczeniem w badaniach w mroźni okazało się skrócenie czasu pracy pojazdu AGV aż o 40% w stosunku do przejazdów w warunkach normalnych. Tak dużej straty energii nie można było tłumaczyć jedynie zmniejszeniem sprawności elektrycznej wszystkich komponentów robota z wyjątkiem akumulatora. Metodologia badań wstępnych musiała zawierać istotny błąd. Problemem okazał się rezystancyjny odbiornik zastosowany w początkowych badaniach. Odbiornik tego typu reaguje na zmniejszające się napięcie akumulatora obniżeniem prądu, zgodnie z prawem Ohma, a w konsekwencji nieadekwatnym wydłużeniem pracy aż do odcięcia przez układ BMS. W pojeździe AGV zarówno układy mechatroniczne jak i zastosowana za przetwornicą elektronika, utrzymuje stały poziom mocy uzupełniając energią wywołaną zmniejszającym się napięciem poprzez zwiększenie prądu pobieranego z akumulatora. Badania laboratoryjne należało więc powtórzyć zapewniając jednakowe warunki rozładowania w warunkach normalny oraz przy obniżonej temperaturze [1], [2].

Stanowisko badawcze

Projekt zakłada ładowanie akumulatora w optymalnej i zalecanej przez producenta stosowanych ogniw, temperaturze ok. 20°C, a następnie pracę robota AGV (wiązącą się z rozładowaniem akumulatora) bez zastosowania wymuszonego podgrzewania w temperaturze mniejszej niż -20°C. Aby ocenić stratę energii związanej z rozładowaniem w temperaturach ujemnych w stosunku do energii oddanej w temperaturach dodatnich zbudowano na bazie zamrażalarki przemysłowej stanowisko badawcze rys. 3.



Rys. 3. Stanowisko badawcze

Wewnątrz zamrażalnika wykonano akumulator zimna w postaci pojemnika z 50 l wody, oraz izolowane termicznie przepusty kablowe. Dla ograniczenia spadków napięć w czasie rozładowania akumulatora wykonane zostało przewodowanie miedziane w izolacji silikonowej o przekrojach żył 6 mm², a dla wyrównania temperatury wewnętrznej zamrażalnika zastosowano wentylator. Realizacja taka pozwoliła odwzorować warunki panujące w mroźni bez konieczności realizacji pomiarów w kosztownej komorze klimatycznej.

Badania właściwe

Zakres badań dotyczył sprawdzenia rzeczywistego spadku pojemności akumulatorów w temperaturze poniżej -20°C w stosunku do pojemności uzyskiwanej w trakcie rozładowania w temperaturze określanej jako pokojowa.

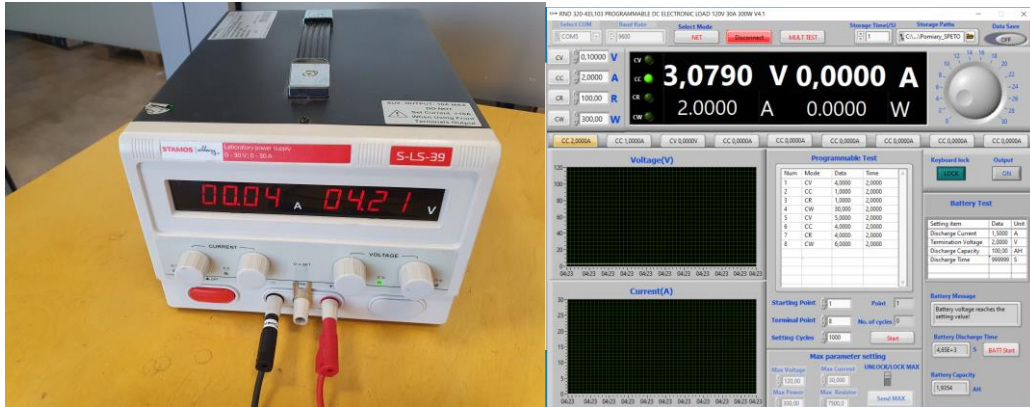
Plan testów zakładał precyzyjne rejestrowanie napięcia i prądu rozładowania:

- pojedynczego ogniwa LG 18650HG2 o pojemności nominalnej 3 Ah w temperaturze ok. 20°C oraz mniejszej niż -20°C
- akumulatorowego magazynu energii bazującego na ww. ogniwach, o pojemności nominalnej 42 Ah (7s14p). Akumulator ten wyposażony był w dedykowany układ BMS.

Jako obciążenie rozładowujące postanowiono wykorzystać programowalne obciążenie elektroniczne RND 320-KEL103, do ładowania posłużył zasilacz laboratoryjny z ogranicznikiem prądowym. Dla rejestracji napięcia i prądu w badaniach wykorzystano oscyloskop przemysłowy Fluke 124B, w założonej jako wystarczająca, jednosekundowej, rozdzielczości pomiaru. Dla ujednoczenia oceny ładowanie akumulatora i ogniwa odbywało się tym samym prądem i do takiego samego napięcia, zarówno przed rozładowaniem w dodatniej jak i w ujemnej temperaturze. Ładowanie i rozładowanie w obu przypadkach nie przekraczało wartości wskazywanych przez producenta ogniw oraz układu BMS akumulatora.

W przypadku badania akumulatora poziom ładowania i rozładowania ograniczany jest dedykowanym układem BMS. Pojedyncze ogniwo LG 18650HG2 (identyczne z jakich zbudowano akumulator) nie jest jednak fabrycznie zabezpieczane układem elektronicznym i należy w badaniach zadbać o odpowiednie poziomy osiąganego napięcia ładowania

i rozładowania, przy zakładanych prądach, tak aby ogniwo nie uległo przeładowaniu (napięcie powyżej 4,2 V) lub nie uległo dogłębnemu rozładowaniu (napięcie poniżej 2 V). Są to poziomy po przekroczeniu których, ogniwo wg producenta ulega nieodwracalnemu uszkodzeniu. Ryzyko przeładowania ogniwa zostało wyeliminowane poprzez odpowiednie ustawienie napięcia w zasilaczu laboratoryjnym, natomiast ryzyko dogłębnego rozładowania ogniwa wyeliminowano oprogramowaniem elektronicznego obciążenia rys. 4.



Rys. 4. Ochrona przed przeładowaniem i dogłębnym rozładowaniem ogniwa

Zdjęcia z przeprowadzonych badań pokazano na rys. 5.

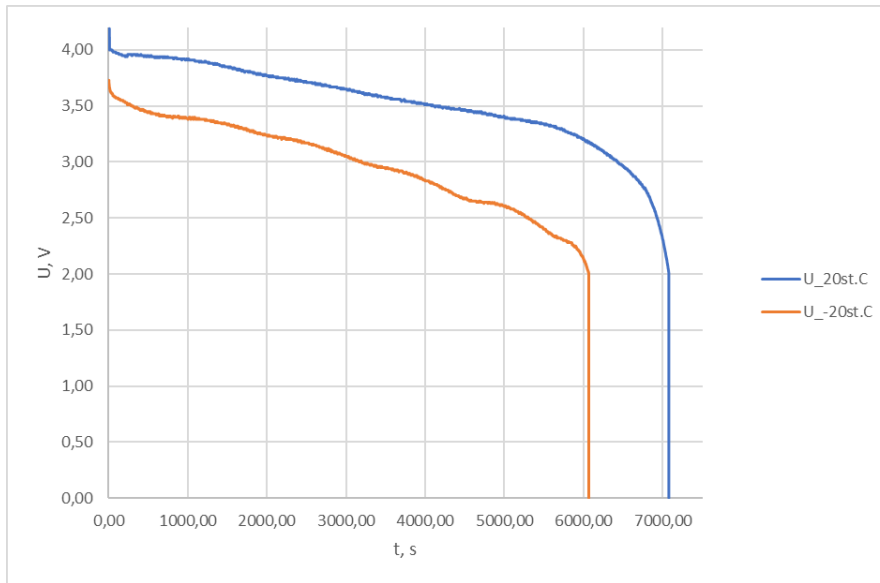


Rys. 5. Badania w założonych temperaturach

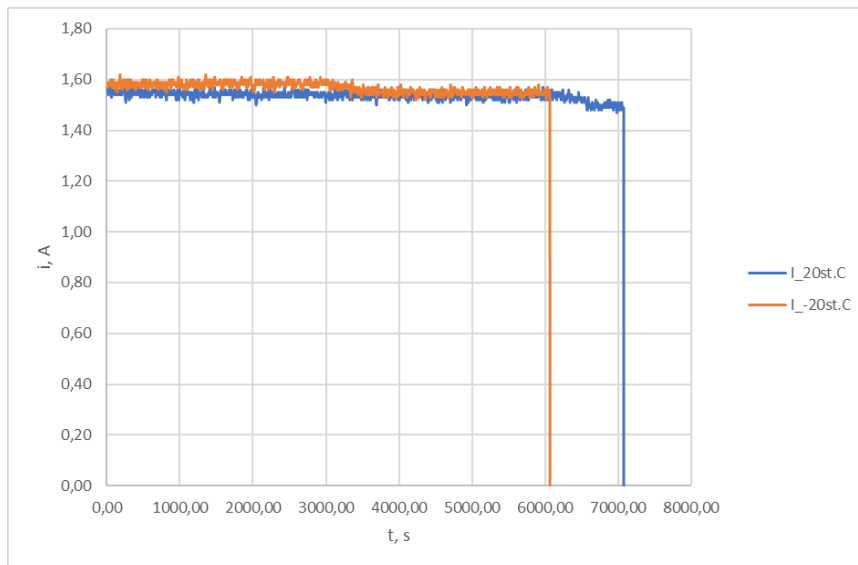
Zarejestrowane charakterystyki

W ramach badań zarejestrowano na oscyloskopie przemysłowym charakterystyki prądu i napięcia w trakcie rozładowania pojedynczego ogniwa LG 18650HG2 oraz zbudowanego na bazie 98 tego typu ogniw (7s14p, 14 ogniw połączonych równolegle dla podniesienia pojemności, połączonych w 7 szeregów dla podniesienia napięcia nominalnego), akumulatora wyposażonego w dedykowany układ BMS. Rejestracja odbywała się zarówno w temperaturze rozładowania porównywalnej z temperaturą pokojową (ok. 20°C), jak i w temperaturze poniżej -20°C. Zarejestrowane przebiegi (rys. od 6 do 9) są przebiegami wolnozmiennymi, a wynik klasycznego mnożenia pozwala na skuteczną ocenę odzyskiwanej energii z naładowanego pojedynczego ogniwa i z bazującego na takich ogniwach akumulatora.

Badanie ogniwa LG 18650HG2

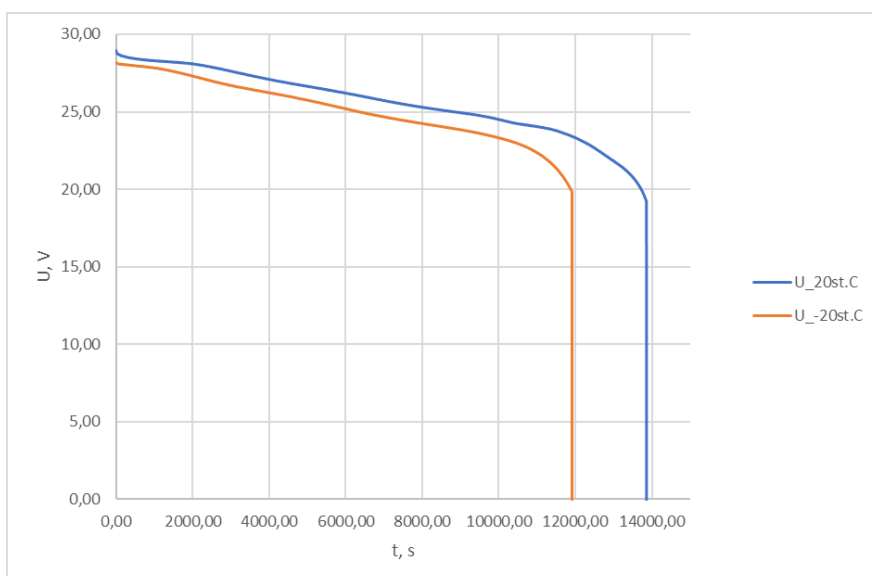


Rys. 6. Napięcie rozładowania ogniwa w funkcji czasu

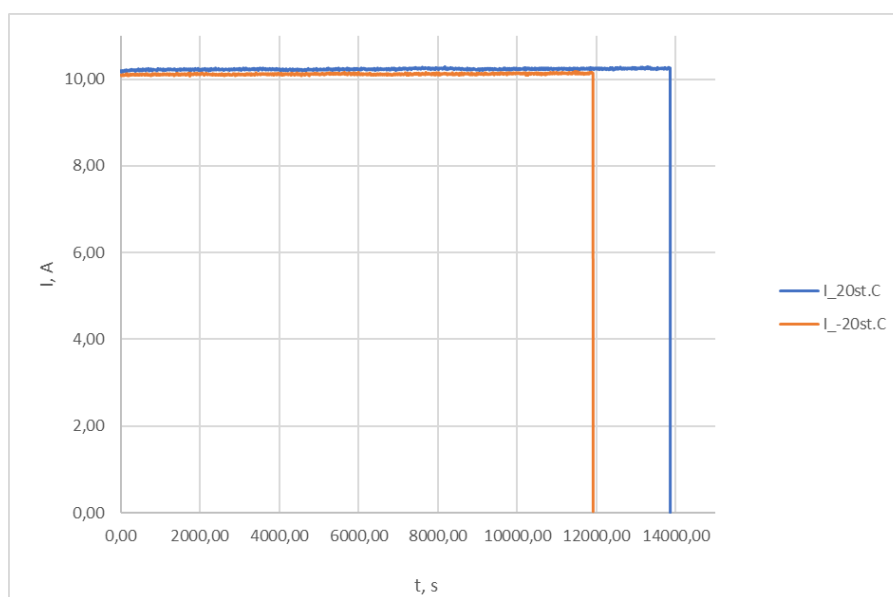


Rys. 7. Prąd rozładowania ogniwa w funkcji czasu

Badanie akumulatora



Rys. 8. Napięcie rozładowania akumulatora w funkcji czasu



Rys. 9. Prąd rozładowania akumulatora w funkcji czasu

Analiza odzyskiwanej energii

Na charakterystykach przedstawionych na rys. od 6 do 8 pokazano jedynie prądowe i napięciowe charakterystyki rozładowania ogniwa oraz akumulatora w funkcji czasu. W pomiarach wykorzystano dwukanałowy oscyloskop przemysłowy rejestrujący przebiegi równoległe z tym samym interwałem czasu. Przebiegi te są przebiegami wolnozmiennymi, a rozładowanie odbywało się stałym prądem. W tabeli 1 przedstawiono podsumowanie uzyskanych wyników wyrażone w Ah. Według tabeli tej utrata możliwej do odzyskania energii zarówno z ogniwa jak i z akumulatora oscyluje na poziomie 15% i nie wydaje się być istotna.

Tabela 1. Porównanie rozładowywanego ogniwa oraz akumulatora wyrażona w Ah

	nominał	20°C	<-20°C	strata
OGNIWO	3 Ah	3 Ah	2,6 Ah	13,3%
AKUMULATOR	42 Ah	39,4 Ah	33,5 Ah	15,0%

Pojemność akumulatora wyrażona w Ah nie jest wynikiem adekwatnym. Charakterystyki napięcia rozładowania w funkcji czasu, pomimo tego, że są to napięcia quasi stałe, wykazują, jak to pokazano na rys. 6 oraz 8, znaczny wpływ ujemnych temperatur zarówno w ogniwie, jak w akumulatorowym magazynie energii zbudowanym z takich ogniw. Analizując dane, dokonano przeliczenia napięcia i prądu na moc chwilową, a znane czasy pomiaru pozwoliły na przeliczenie uzyskanych wartości na energię wyrażoną w Wh. Wyniki porównawcze przedstawione zostały w Tabeli 2.

Tabela 2. Porównanie rozładowywanego ogniwa oraz akumulatora wyrażona w Wh

	nominał	20°C	<-20°C	strata
OGNIWO	10,8 Wh	10,6 Wh	7,9 Wh	25,5%
AKUMULATOR	1058,4 Wh	1008,9 Wh	842,6 Wh	16,5%

Wnioski

Pomimo silnego przyzwyczajenia do wyrażania pojemności ogniw i akumulatorów w Ah jedynie pojemność energii wyrażona nominalnie w Wh jest adekwatnym współczynnikiem określającym rzeczywistą pojemność akumulatora w każdych warunkach eksploatacyjnych.

Maksymalna strata pojemności dla pojedynczego ogniwa w temperaturach poniżej - 20°C wynosi niecałe 26%, w przypadku pakietu ogniw rozbudowanego o układ BMS, strata ta nie przekracza jednak 17% (układ BMS ogranicza napięcia pojedynczych ogniw zarówno w górnej jak i w dolnej granicy, co korzystnie i zauważalnie wpływa na pojemność energii i trwałość akumulatora).

Energia elektryczna (pobierana z akumulatora) niezbędna do utrzymania temperatury na poziomie optymalnej temperatury pokojowej jest wielokrotnie wyższa od strat pojemności energii związanej z pracą w temperaturach poniżej -20°C - dlatego podgrzewanie akumulatorów rozładowywanych w niskich temperaturach jest energetycznie nieopłacalne.

Literatura

1. Linden D., Reddy T. B.: *Handbook Of Batteries*. McGraw-Hill Professional, 3rd edition New York 2001.
2. Czerwiński A.: *Akumulatory, baterie, ogniwa*. WKŁ, Warszawa 2005.

Abstract. Modern mobile robotics require the use of small but efficient battery energy stores. As of today, commercial 18650 reversible cells in NMC technology, they are characterized by one of the highest energy density coefficients (in relation to the size and weight of the cell). The robotization of spaces in which the work of people in the environment is very difficult is important for potential investors in this type of solutions. One of such places are large-scale industrial freezers, which are warehouses for the food and medical industry. The temperature in such rooms is lower than -20°C. Handling such warehouses by mobile robots, such as AGV or AMR, is a very innovative solution on a global scale.

The article presents the actual results of comparative tests of discharging the battery energy reservoir of AGV / AMR vehicles made in the NMC technology, at room temperature compared to a discharge below -20°C.



Rzeczpospolita
Polska



Śląskie.

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



Prace badawcze zostały sfinansowane ze środków Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014-2020 (Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego) w ramach projektu pt. „System intralogistyczny do obsługi chłodni wielkopowierzchniowych działający w oparciu o roboty mobilne charakteryzujące się niską zewnętrzną emisją ciepła (system LOTIS)” o numerze WND-RPSL.01.02.00-24-0AA7/20-006

Dr inż. Krzysztof Sztymelski
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki i Informatyki
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice

E-mail: ksztymelski@polsl.pl

Mgr inż. Grzegorz Ziolo
Etisoft Smart Solutions Sp. z o. o.
Dział Budowy Maszyn
ul. Szara 21
44-100 Gliwice

E-mail: gziolo@ess.etisoft.pl

ENERGY EFFICIENCY OF MOBILE ROBOTS DURING LOGISTICS TASKS

WYDAJNOŚĆ ENERGETYCZNA ROBOTÓW MOBILNYCH PODCZAS REALIZACJI ZADAŃ LOGISTYCZNYCH

Streszczenie. Przemysł 4.0 to idea automatyzacji procesów produkcyjnych [1]. Jednym z wielu wyzwań tej idei jest automatyzacja zadań intralogistycznych w zakładach produkcyjnych lub magazynach. W tym celu coraz to częściej stosuje się autonomiczne roboty mobilne typu AMR (Autonomus Mobile Robot) [2]. Roboty posiadają napędy elektryczne najczęściej zasilane ogniwami wykonanymi w technologii litowo-jonowej. Akumulatory te charakteryzują się dużymi gęstościami energii oraz trwałością. Nie mniej podczas wykonywania zadań logistycznych w trybie ciągłym przez roboty mobilne wymagane jest ich ładowanie. Czas na ładowanie akumulatorów z punktu widzenia procesu produkcyjnego jest czasem straconym. Dlatego ważnym aspektem projektowania systemów intralogistycznych opartych na robotyce mobilnej jest odpowiednie zarządzanie wydajnością energetyczną robotów a także całych procesów intralogistycznych [3]. W artykule przedstawiono oraz omówiono charakterystyki zużycia energii dla różnych zadań logistycznych wykonywanych przez roboty mobilne zaprojektowanych w ramach projektu HEPIS (High Efficiency and Performance Intralogistics System).

Słowa kluczowe: robotyka mobilna, zużycie energii, akumulatory litowe, elektryczne układy napędowe

Wstęp

Systemy intralogistyczne bazujące na robotyce mobilnej coraz to częściej wykorzystywane są w procesach produkcyjnych. Główną ich zaletą jest ich elastyczność w stosunku do transportu ciągłego takiego jak przenośniki taśmowe czy też systemy rolotokowe. Z drugiej strony ich główną wadą jest ograniczona wydajność procesowa wynikająca z potrzeby uzupełnienia energii elektrycznej w akumulatorach robotów mobilnych. Dlatego też niezwykle ważnym aspektem przy projektowaniu systemów intralogistycznych bazujących na robotyce mobilnej jest wiedza na temat zużycia energii elektrycznej przez roboty mobilne podczas wykonywania cząstkowych zadań logistycznych. Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie charakterystyk energetycznych dla robotów mobilnych wytworzonych w ramach projektu HEPIS.

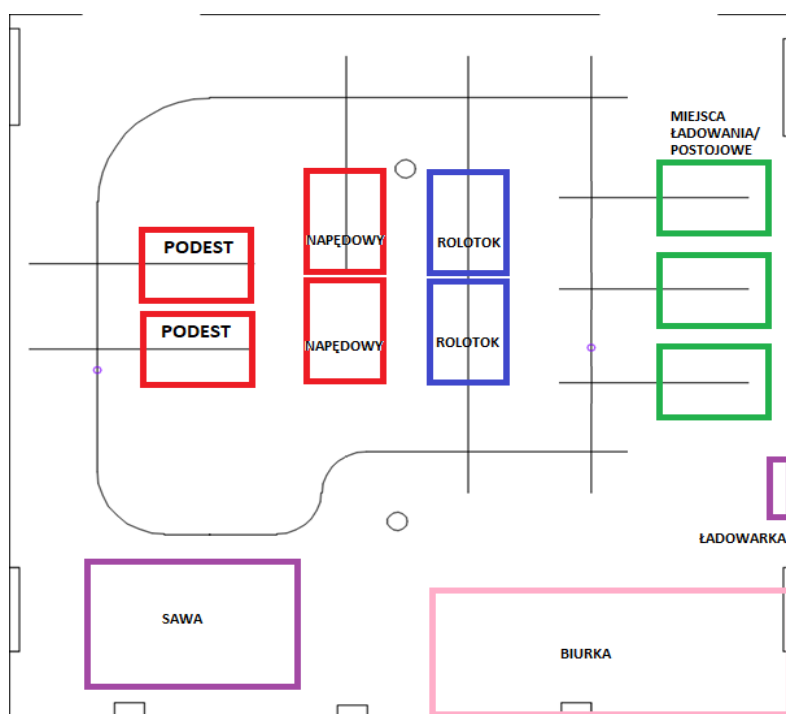
Zakres badań

Zakres badań dotyczył wyznaczenia charakterystyk pobieranej przez robota energii elektrycznej w dziedzinie czasu dla typowych zadań intralogistycznych przy różnych parametrach wykonywanych zadań. Proces transportowy podzielono na pomniejszych zadania z których wyróżniono i poddano badaniom następujące przypadki:

- Dokowanie bez obciążenia docelowego (paleta 25 kg)
- Dokowanie z obciążeniem docelowym (paleta 600 kg)
- Jazda na wprost bez obciążenia docelowego (paleta 25 kg)
- Jazda na wprost z obciążeniem docelowym (paleta 600 kg)

- Jazda po łuku bez obciążenia docelowego (paleta 25 kg)
- Jazda po łuku z obciążeniem docelowym (paleta 600 kg)
- Dokowanie do stacji SAWA (System Automatycznej Wymiany Akumulatorów).

Badania zostały przeprowadzone w laboratorium firmy Etisoft Smart Solutions. W laboratorium stworzono poligon symulujący nieskomplikowany proces logistyczny, którego poszczególne etapy zostały przebadane. Do akwizycji danych wykorzystano moduł BMS (Battery Management System) wyposażony w obwody pomiarowe prądu roboczego robota oraz napięć na poszczególnych ogniwach baterii.



Rys. 1 Plan laboratorium badawczego

Testy robota podczas jazdy na wprost zakładały zmianę masy przewożonego ładunku w dwóch przypadkach, pełnego obciążenia pojazdu masą 600 kg oraz braku obciążenia czyli pustej palety o masie około 25 kg. Dodatkowo poddano badaniu przypadki poruszania się z różną prędkością w zakresie od 0,1 m/s do 0,8 m/s. Podobnie wykonano badania podczas ruchu robota po łuku, w tym przypadku maksymalna prędkość geometrycznego środka osi kół robota mieściła się w zakresie od 0,1 m/s do 0,2 m/s. Ze względu na wymiary poligonu, w trakcie badania wykonano 10 przejazdów w danej konfiguracji masa–prędkość w celu wyciągnięcia średniej. Mimo, że każdy z przejazdów wykonywany jest w identycznych warunkach należy pamiętać, że układ sterowania objęty jest pętlą sterowania z regulatorem PID co wprowadza pewną losowość w trakcie przejazdów. Misje złożone, takie jak dokowanie realizowane są ze zmienną prędkością ze względu na autonomię pojazdu podczas ich wykonywania i wynikają z zastosowanego algorytmu niskopoziomowego, zatem ich analiza porównawcza opierać się będzie na całościowym zużyciu energii. W skład misji dokowania wchodzi: obrót robota na ścieżce głównej, praca podnośnika oraz wjazd lub wyjazd z doku. Kolejność tych zadań zależy od tego, czy misja ma za zadanie pobrać czy odłożyć ładunek na miejsce odkładcze.

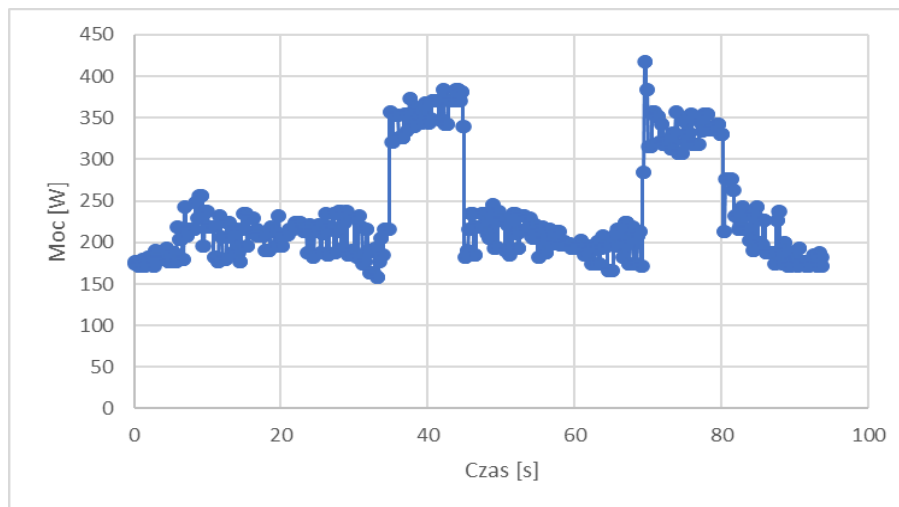
Wyniki badań

Dokowanie AMR – obciążenie 25 kg

Test dokowania polegał na pobraniu pustej palety z miejsca odkładczego. Robot stojąc na ścieżce głównej obraca się prostopadle do niej, podjeżdża pod paletę, unosi podnośnik palet, wyjeżdża na ścieżkę główną, opuszcza podnośnik i obraca się w kierunku jazdy, równoległe do ścieżki nawigacyjnej.

Tabela 1. Uzyskane średnie wartości podczas dokowania bez obciążenia

Czas [s]	Energia [Wh]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
93,84	6,14	417,53	235,85



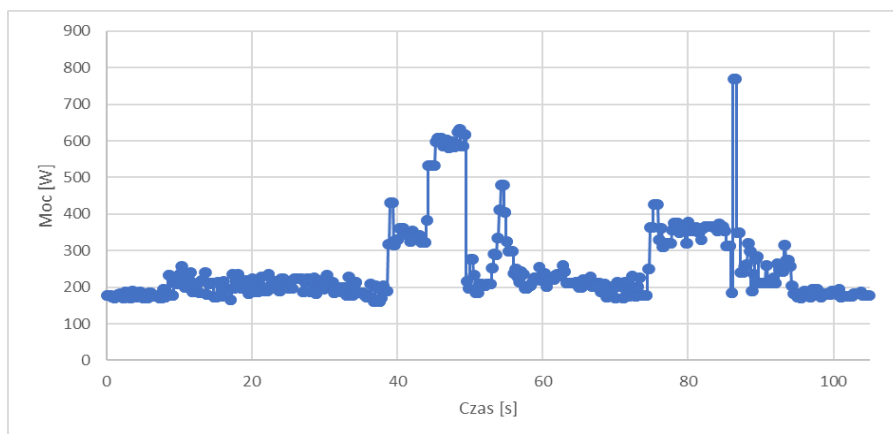
Rys. 2. Charakterystyka poboru mocy w czasie

Dokowanie AMR – obciążenie 600 kg

Test dokowania polegał na pobraniu palety z ładunkiem 600 kg z miejsca odkładczego. Robot stojąc na ścieżce głównej obraca się prostopadle do niej, podjeżdża pod paletę, unosi podnośnik palet, wyjeżdża na ścieżkę główną, opuszcza podnośnik i obraca się w kierunku jazdy, równoległe do ścieżki nawigacyjnej.

Tabela 2. Uzyskane średnie wartości podczas dokowania z obciążeniem

Czas [s]	Energia [Wh]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
105,79	7,44	768,80	253,26



Rys.3. Charakterystyka poboru mocy w czasie



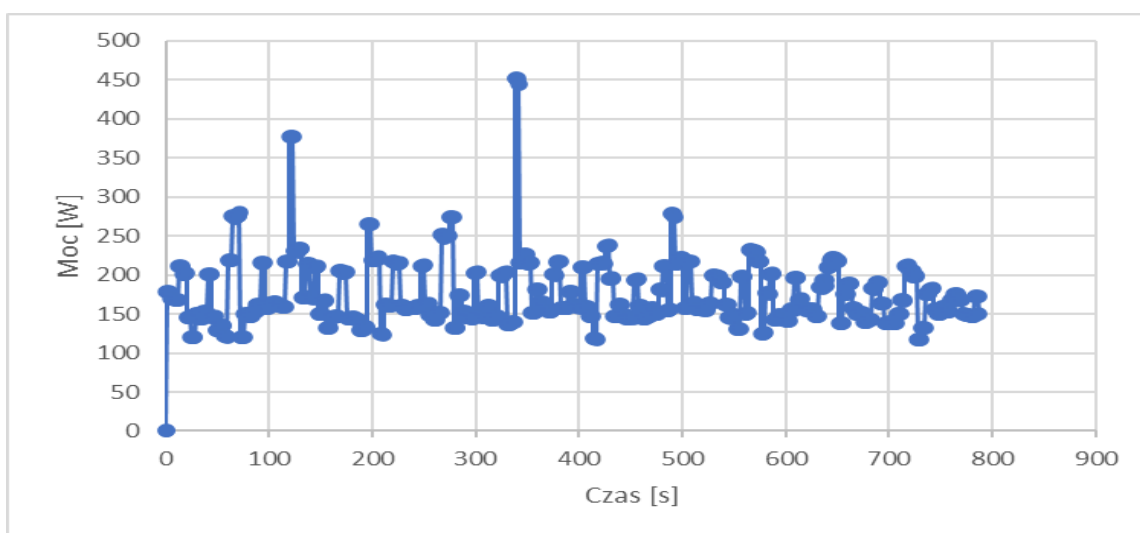
Rys. 4. Przebieg testu dokowania pod podest płaski

Jazda na wprost – obciążenie 25 kg

Test jazdy na wprost rozpoczyna się od przyśpieszenia robota będącego w spoczynku do prędkości docelowej a następnie hamowaniu. Test zakłada zbadanie poboru mocy podczas ruchu jednostajnego prostoliniowego bez obciążenia docelowego.

Tabela 3. Uzyskane wyniki dla jazdy z różnymi prędkościami

Prędkość [m/s]	Czas [s]	Energia [Wh]	Zużycie energii jed. [Wh/m]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
0,1	786,95	38,51	0,42	451,36	174,61
0,3	372,14	25,86	0,3	540,73	113,64
0,5	299,73	22,09	0,24	804,86	262,52
0,8	247,12	18,65	0,2	851,83	268,59



Rys. 5. Charakterystyka poboru mocy w czasie dla prędkości 0,1 m/s



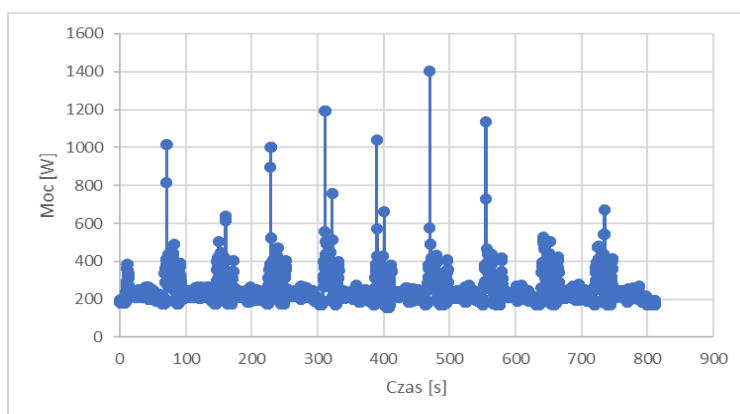
Rys. 6. Przebieg testu jazda na wprost

Jazda na wprost – obciążenie 600 kg

Test jazdy na wprost rozpoczyna się od przyśpieszenia robota będącego w spoczynku do prędkości docelowej a następnie hamowaniu. Test zakłada zbadanie poboru mocy podczas ruchu jednostajnego prostoliniowego z obciążeniem docelowym 600 kg.

Tabela 4. Uzyskane wyniki dla jazdy z różnymi prędkościami

Prędkość [m/s]	Czas [s]	Energia [Wh]	Zużycie energii jed. [Wh/m]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
0,10	812,28	55,35	0,61	1401,57	245,29
0,30	508,62	38,80	0,43	1736,77	274,67
0,50	417,71	35,59	0,40	1667,95	306,70
0,80	393,66	35,22	0,39	1764,22	322,02



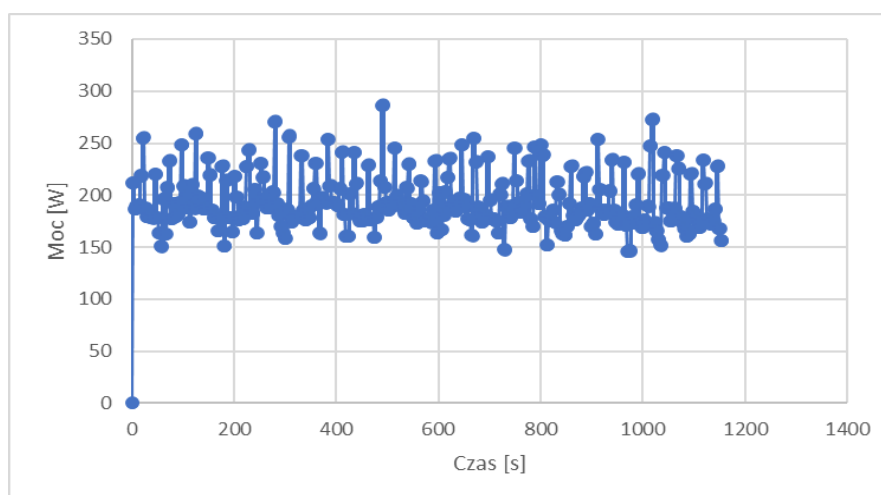
Rys. 7. Charakterystyka poboru mocy w czasie dla prędkości 0,1 m/s

Jazda po łuku – obciążenie 25 kg

Test jazdy po łuku rozpoczyna się od przyspieszenia robota będącego w spoczynku do prędkości docelowej, przejeździe po łuku a następnie hamowaniu. Test przeprowadzono na robocie bez obciążenia.

Tabela 5. Wyniki pomiarów dla ruchu z różnymi prędkościami

Prędkość [m/s]	Czas [s]	Energia [Wh]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
0,10	57,76	1,73	273,87	191,08
0,20	32,50	1,76	420,51	193,89



Rys. 8. Charakterystyka poboru mocy w czasie dla prędkości 0,1 m/s



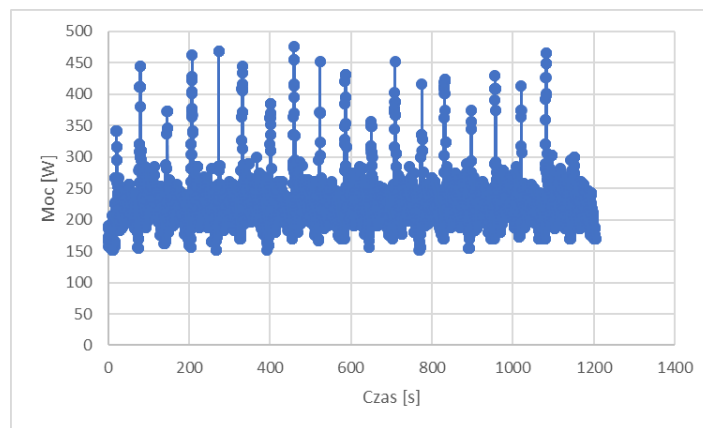
Rys. 9. Przebieg testu jazdy po łuku

Jazda po łuku – obciążenie 600 kg

Test jazdy po łuku rozpoczyna się od przyspieszenia robota będącego w spoczynku do prędkości docelowej, przejeździe po łuku a następnie hamowaniu. Test przeprowadzono na robocie z pełnym obciążeniem 600 kg.

Tabela 6. Wyniki pomiarów dla ruchu z różnymi prędkościami

Prędkość [m/s]	Czas [s]	Energia [Wh]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
0,10	60,22	3,80	475,25	227,14
0,20	36,65	2,47	772,02	242,88



Rys. 10. Charakterystyka poboru mocy w czasie dla prędkości 0,1 m/s

Dokowanie w stacji SAWA

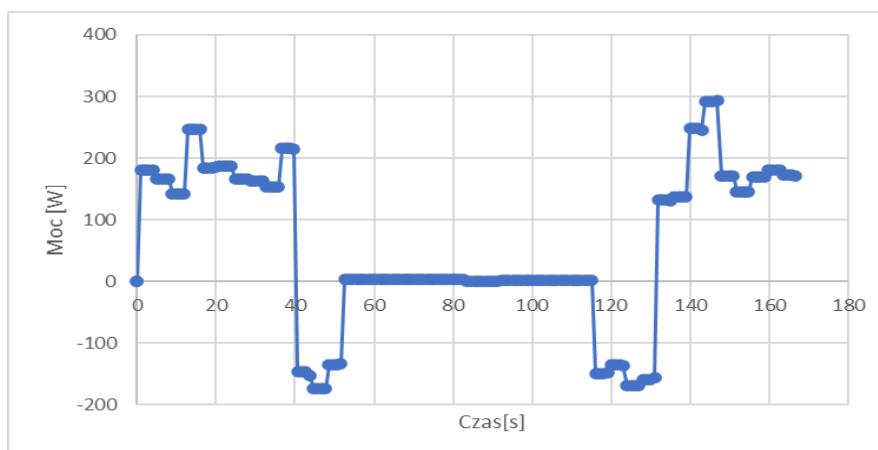
Celem testu było sprawdzenie wydajności energetycznej modelu systemu oraz kompatybilności elektromechanicznej robota z stacją SAWA (System Automatycznej Wymiany Akumulatorów). Test polegał na wyznaczeniu poboru mocy podczas wielokrotnego dokowania w stacji SAWA. Test rozpoczyna się od obrotu w miejscu i zjazdu z głównej ścieżki nawigacyjnej do stacji SAWA oraz spozycjonowania robota. Następnie następuje załączenia sytemu podtrzymania napięcia oraz wymiana akumulatora. Po tej operacji następuje wyjazd ze stacji wymiany oraz obrót na głównej ścieżce nawigacyjnej.



Rys. 11. Przebieg testu dokowanie SAWA

Tabela 7. Wynik badania procesu wymiany baterii

Czas wymiany [s]	Energii [Wh]	Moc maks. [W]	Moc średnia [W]
166,73	5,03	294,31	57,05



Rys. 12. Charakterystyka mocy dokowania w SAWA

Wnioski

Przeprowadzone badania dostarczyły wiedzy na temat zapotrzebowania na energię poszczególnych etapów misji intralogistycznych wykonywanych przez roboty mobilne.

Uzyskane wykresy pozwoliły zauważyć jak zmienia się charakter obciążenia mierzony z zacisków akumulatora w zależności od typu pokonywanej trasy. Jazda robota po łuku wymusza znacznie większą aktywność układu regulacji w celu utrzymania właściwej pozycji względem ścieżki prowadzącej. Konieczność kompensacji błędu położenia przez napęd robota

objawia się znacznie większą ilością impulsów w poborze mocy w porównaniu do jazdy na wprost przy tym samym obciążeniu i prędkości.

Projektując wiązki i dobierając komponenty pojazdu założono, że w trakcie pracy będą występowały chwilowe impulsy zwiększonego poboru energii. Takie przeciążenia widoczne są na wszystkich przedstawionych wykresach i występują one w trakcie zmiany prędkości silników napędowych jak i podnośnika. Informacja o ich amplitudach pozwoliła na przeprowadzenie procesu optymalizacji konstrukcji pojazdu w szczególności w kontekście połączeń elektrycznych, złącz i urządzeń.

Sprawność energetyczna pojazdu robota mobilnego podczas poruszania się z niską prędkością jest niska. Spowodowane jest to stałym zużyciem energii elektrycznej w robocie przez odbiorniki takie jak jednostka sterująca, układ bezpieczeństwa, moduł komunikacji czy układy sensoryczne. Robot poruszający się po łuku nie może pokonywać go ze względów bezpieczeństwa oraz ograniczonych zdolności pętli regulacji z pełną prędkością. Informacje te prowadzą to wniosku, że planując przebieg trasy robota należy unikać niepotrzebnych skrętów i mijanek.

Misje logistyczne takie jak dokowanie, w ujęciu energetycznym są mało wrażliwe na zmiany obciążenia. Średnie zużycie energii różni się w małym stopniu w zależności od zmiany wagi przewożonego ładunku.

Osobliwą misją poddaną badaniu na tle pozostałych jest dokowanie SAWA. Wjazd i wyjazd z maszyny są identyczne jak dla misji dokowania. W trakcie misji SAWA w robocie zostaje wymieniony automatycznie zasobnik energii. Obsługa tego procesu wymaga chwilowej zmiany sposobu zasilania robota z bateryjnego na podtrzymujący z wykorzystaniem styków umieszczonych pod pojazdem. Na wykresie można zauważyć okresy czasu, w których bateria pracuje odbiornikowo. Jest to czas, w którym robot zasilany jest już za pomocą styków podtrzymujących, a robot nie odłączył jeszcze stycznika akumulatora przez co akumulator zostaje przez moment ładowany wewnątrz pojazdu.

Otrzymane dane są nieocenioną pomocą w procesie planowania oraz projektowania logistyki wewnątrzzakładowej, której podstawę stanowią roboty autonomiczne. Znajomość ilości potrzebnej energii oraz możliwości jej agregacji w akumulatorach jest istotną kwestią etapu szacowania wymaganej liczby robotów oraz prowadzenia i długości ścieżek co bezpośrednio przekłada się na wydajność całego systemu intralogistycznego.

Abstract. Industry 4.0 is the idea of automating production processes. One of the many challenges of this idea is the automation of intralogistics tasks in production plants or warehouses. For this purpose, autonomous AMR (Autonomus Mobile Robot) type mobile robots are increasingly used. The robots have electric drives, most often powered by cells made in lithium-ion technology. These batteries are characterized by high energy densities and durability. Nevertheless, when mobile robots perform logistics tasks in a continuous mode, their charging is required. From the point of view of the production process, time to charge the batteries is wasted time. Therefore, an important aspect of designing intralogistic systems based on mobile robotics is the appropriate management of the energy efficiency of robots as well as entire intralogistics processes. The article presents and discusses the characteristics of energy consumption for various logistics tasks performed by mobile robots designed as part of the HEPIS (High Efficiency and Performance Intralogistics System) project.

Literatura

1. Qin J., Liu Y., Grosvenor R., *A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond*, *Procedia CIRP*, 52 (2016) 173–178.

2. Fragapane G., Koster R. De, Sgarbossa F., Strandhagen J.O., *Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda*, European J. Oper. Res. 2021.
3. Moris J., *What is Intralogistics?*, *Invata Intralogistics Website*, 2013. [Online] Dostępny pod: <http://www.invata.com/what-is-intralogistics/>. Dostęp: 16.06.2022



Prace badawcze zostały sfinansowane ze środków Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Śląskiego na lata 2014-2020 (Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego) w ramach projektu pt. „Opracowanie wysokowydajnego systemu intralogistycznego bazującego na rodzinie mobilnych robotów transportowych typu AMR (system HEPIS)” o numerze WND-RPSL.01.02.00-24-0459/19-009

Dr inż. Wojciech Klein, Dr inż. Krzysztof Sztymelski
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 2a
44-100 Gliwice
E-mail: wojciech.klein@polsl.pl, krzysztof.sztymelski@polsl.pl

Dr inż. Olaf Dudek, Mgr inż. Rafał Kloska
Etisoft Smart Solutions Sp. z o. o.
ul. Szara 21
44-100 Gliwice
E-mail: odudek@ess.etisoft.pl, rkloska@ess.etisoft.pl

Janusz POCHMARA, Aleksandra ŚWIETLICKA, Krzysztof KOLANOWSKI,
Korenlia GIREJKO, Jakub JANKOWSKI

Politechnika Poznańska

REQUIREMENTS FOR ROBOTS IN THE PROCESS OF CONTROL BASED ON THE HUMAN VOICE

WYMAGANIA STAWIANE ROBOTOM W PROCESIE STEROWANIA ICH RUCHEM PRZY POMOCY WYDAWANIA KOMEND GŁOSOWYCH

Streszczenie. Celem badań było skupienie się na opracowaniu nowatorskiego systemu sterowania głosowego robotem przemysłowym, które można by wykorzystać do komunikacji z robotami współpracującymi oraz stworzenie narzędzi ułatwiających integrację między człowiekiem a maszyną. W prezentowanej pracy zwrócono szczególną uwagę na specyficzne wymagania, które powinny spełniać przemysłowe systemy sterowania głosowego, a dzięki zastosowaniu symulacji zaprezentowano eksperymenty oparte na modelach sugerowanych do testowania w przemyśle takich jak roboty KUKA. Przeprowadzono kompleksowe badanie istniejących problemów i ich możliwych rozwiązań. W przeciwieństwie do niektórych innych prac skupiono się na specyficznych wymaganiach językowych (dotyczących języka polskiego), które powinny spełniać przemysłowe systemy sterowania głosowego (w obecnej fazie badań zostały celowo pominięte aspekty bezpieczeństwa i wpływu szumów na jakość rozpoznawanych instrukcji). Starano się skoncentrować przede wszystkim na algorytmach rozpoznawania rozkazów (pełnych zdań) i optymalizacji bazy danych języka służącego do komunikacji człowiek-maszyna wykorzystując algorytmy sztucznych sieci neuronowych (ang. deep learning).

Słowa kluczowe: uczenie maszynowe, roboty współpracujące, sterowanie robotów, sztuczna inteligencja, NLP, analiza głosu, deep learning, symulacja robota.

Wstęp

Meritum badań było skupienie się na opracowaniu nowatorskiego systemu sterowania głosowego, które można by wykorzystać do komunikacji z robotami współpracującymi oraz stworzenie narzędzi zapewniających jego prostą integrację w systemach przemysłowych. W tym przypadku należy zwrócić szczególną uwagę na specyficzne wymagania, które powinny spełniać przemysłowe systemy sterowania głosowego.

Przeprowadzono kompleksowe badanie istniejących problemów i ich możliwych rozwiązań. W przeciwieństwie do niektórych innych prac skupiono się na specyficznych wymaganiach, które powinny spełniać przemysłowe systemy sterowania głosowego. W tej fazie badań zostały celowo pominięte aspekty bezpieczeństwa i wpływu szumów na jakość rozpoznawanych instrukcji. Starano się skoncentrować przede wszystkim na algorytmach rozpoznawania rozkazów i optymalizacji bazy danych języka służącego do komunikacji człowiek-maszyna.

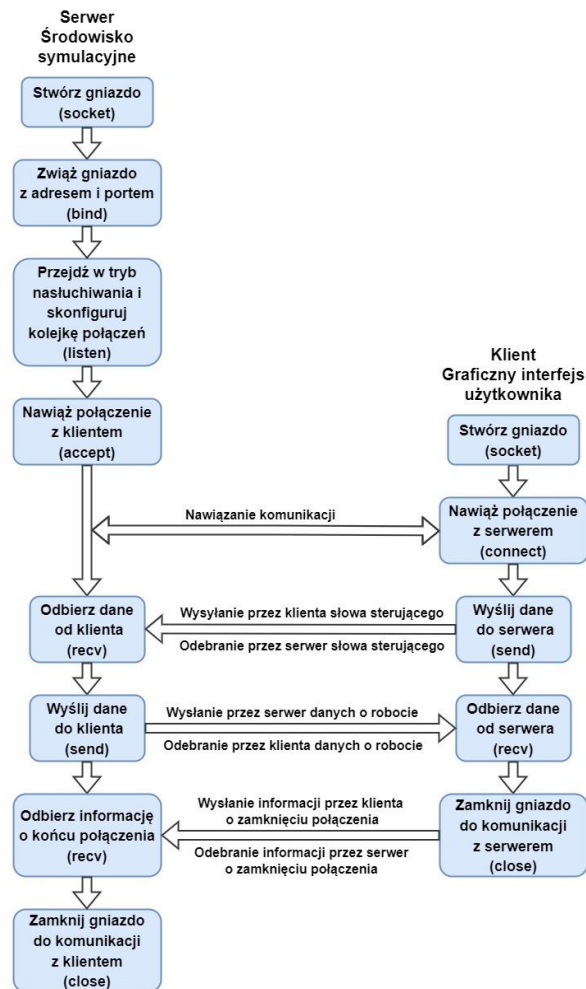
Zakres artykułu przedstawia się w sposób następujący: w paragrafie 1 zaprezentowano architekturę modułu komunikacyjnego, który został wykorzystany do przeprowadzonych badań symulacyjnych. W paragrafie 2 przedstawiono rozwiązanie wspomagające użytkownika w procesie komunikacji z maszyną. Celem paragrafu 3 jest wprowadzenie do architektury robota, która była oparta na układzie udostępnionego rzeczywistego modelu, który został wykorzystany do badań testowych. Paragraf 4 wprowadza do interfejsu użytkownika, natomiast w paragrafie 5 zaprezentowano uzyskane wyniki badań.

Praca powstała ze środków Subwencji Badawczej nr 0211/SBAD/0121.

Komunikacja

Ważnym elementem realizacji projektu jest opracowanie skutecznej wymiany informacji pomiędzy interfejsem graficznym użytkownika a modelem robota w środowisku symulacyjnym. W tym celu zastosowano programowanie gniazdowe w formie protokołu TCP, który jest częścią biblioteki Socket [1]. Postanowiono wykorzystać standardowe rozwiązania oparte na architekturze klient-serwer.

W procesie komunikacji gniazdowej wyróżnić można dwie role – serwera oraz klienta [2]. Zadaniem serwera jest oczekiwanie na zgłoszenia. Serwer nie musi posiadać informacji na temat klienta, ponieważ uzyskuje ją po nawiązaniu komunikacji. Rolą klienta jest nawiązanie połączenia z serwerem. Aby klient mógł skutecznie połączyć się z serwerem, musi posiadać informacje o adresie IP i wykorzystanym porcie, na którym osadzone jest gniazdo serwera.



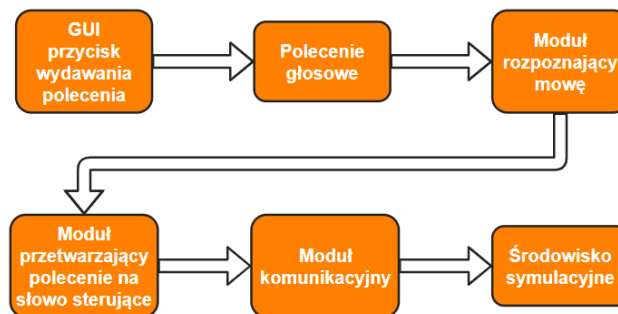
Rys. 1. Wymiary robota KUKA, schemat układu udostępniony przez producenta [20]

Zgodnie z rys.1 w procesie komunikacji rolę klienta pełni graficzny interfejs użytkownika, natomiast za serwer odpowiada środowisko symulacyjne. Słowo sterujące jest wysyłane przez klienta, a odbierane przez serwer. W efekcie tej komunikacji model robota porusza się w symulatorze. Dane o rotacji każdego złącza w układzie złączowym oraz o pozycji i orientacji końcówki robota w układzie bazowym są wysyłane przez serwer i odbierane przez klienta. W celu bieżącego śledzenia zmian podczas ruchu robota aktualizacja danych odbywa się co 100ms. Zakończenie komunikacji następuje w przypadku zamknięcia graficznego interfejsu użytkownika.

Schemat rozpoznawania mowy - testy poleceń bez podanej jednostki

Na rys. 2 przedstawiono sposób w jaki przebiega droga od wydania komendy do uzyskania ruchu modelu robota w środowisku symulacyjnym. Dla przejrzystości i ułatwienia realizacji projektu zostały wyodrębnione następujące elementy:

- moduł rozpoznawania mowy,
- moduł przetwarzania poleceń,
- moduł komunikacyjny,
- interfejs graficzny,
- środowisko symulacyjne,
- symulacja robota.



Rys. 2. Model komunikacyjny systemu użytkownik - maszyna

Istotną częścią projektu jest przetwarzanie mowy na postać tekstową. Do zrealizowania tego zadania wykorzystano bibliotekę SpeechRecognition. Lista kroków obrazująca działanie modułu jest następująca:

1. Inicjalizacja obiektu rozpoznającego mowę.
2. Przypisanie dostępnego mikrofonu jako źródła sygnału akustycznego.
3. Ustawienie minimalnej częstotliwości na poziomie 1000Hz powyżej której przetwarzane są sygnały dźwiękowe.
4. Nasłuchiwanie sygnału dźwiękowego przez obiekt rozpoznający mowę w trakcie wydawania polecenia w czasie nie dłuższym niż 10 sekund.
5. Przetworzenie zebranego sygnału dźwiękowego przez wybrany silnik na postać tekstową.
6. Normalizacja tekstu do postaci małych liter w celu ułatwienia późniejszej analizy.

Przedstawiony algorytm w postaci listy kroków pozwala na przetworzenie polecenia głosowego

Model robota

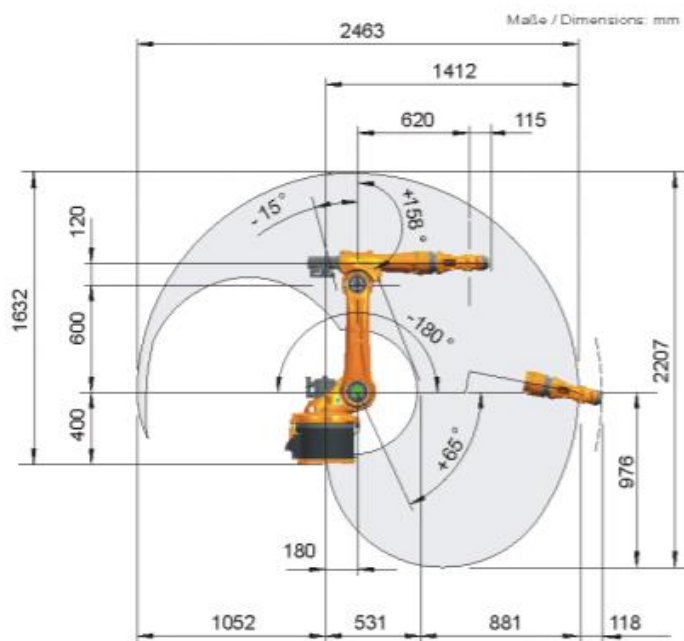
Według normy ISO 8373 robot przemysłowy to „automatycznie sterowany, reprogramowalny, uniwersalny manipulator, programowany w trzech lub więcej osiach, który może być urządzeniem zamocowanym na stałe albo mobilnym, przeznaczony do zastosowania w aplikacjach automatyki przemysłowej” [3]. Określone ramie robota ma wszystkie złącza obrotowe i jest trwale przymocowane do podłoża. Jego łańcuch kinematyczny jest prosty otwarty. Będzie ono modelowane na podstawie rzeczywistego robota przemysłowego KUKA KR5 ARC. Skorzystano z modelu trójwymiarowego udostępnionego na zasadzie otwartego dostępu przez firmę KUKA [4]. Model ten musi być przekonwertowany na plik typu .stl, aby możliwe było jego zaimportowanie do programu Blender. Wymiary robota i jego ograniczenia ruchowe znajdują się w karcie katalogowej robota KUKA KR5 ARC upowszechnionej przez producenta [5].

Tabela 1. Ograniczenia obrotu poszczególnych złączy na podstawie [5]

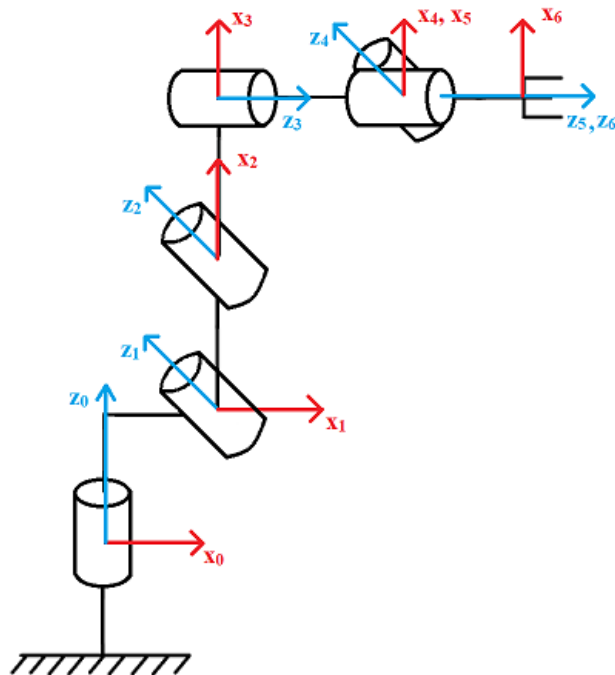
Numer złącza	Zakres [°]
1	±155
2	-180 do +65
3	-15 do +158
4	±350
5	±130
6	±350

Tabela 1 przedstawia ograniczenia ruchowe, które zostaną zaimplementowane w modelowanym robocie. Są one nieodłącznym elementem projektowania układu ruchu robota, ponieważ przekazują informacje na temat zakresu każdego złącza i przestrzeni roboczej ramienia. Przestrzeń robocza ramienia jest to zbiór wszystkich możliwych położeń i orientacji wynikający z długości członów i zakresu zmian współrzędnych wewnętrznych [6]. Na rys.3, który został zaczerpnięty z karty katalogowej KUKA KR5 ARC [5], można zauważyć wymiary poszczególnych złączy robota referencyjnego, zgodnie z którymi zostanie zamodelowane ramię robota wykorzystywane w projekcie. Maksymalna wysokość jaką może osiągnąć robot wynosi 1632 mm licząc od podstawy. Ruch modelu będzie możliwy po zaimplementowaniu kinematyki robota w programie Blender przy użyciu istniejących rozwiązań. W tym celu zostanie wprowadzona do modelu ruchoma armatura i jej ograniczenia, następnie podłączona zostanie do oddzielonych złączy ramienia robota

Kolejnym etapem prac było zaprojektowanie modelu ramienia i jego kinematyki. Wybrano kluczowe elementy, które model musi posiadać i uproszczono jego schemat, tak aby łatwiejsze było jego sterowanie.



Rys. 3. Wymiary robota KUKA, schemat układu udostępniony przez producenta [5]



Rys. 4. Schemat ramienia robota na podstawie [7]

Tabela 8. Tabela parametrów DH

i	α_i [°]	a_i [mm]	d_i [mm]	θ_i [°]	σ_i
1	90	s	400	$\theta_1 = q_1$	0
2	0	600	0	$\theta_2 = q_2$	0
3	-90	120	0	$\theta_3 = q_3$	0
4	90	0	620	$\theta_4 = q_4$	0
5	-90	0	0	$\theta_5 = q_5$	0
6	0	0	115	$\theta_6 = q_6$	0

gdzie:

i – numer przegubu

α_i [°] – kąt między osiami przegubów i a $(i+1)$ mierzony prawoskrętnie wokół a_i

a_i [mm] – długość i -tego ogniwa pomiędzy osią przegubu i a $(i+1)$

d_i [mm] – odległość pomiędzy a_{i-1} i a_i mierzona wzdłuż osi i -tego przegubu

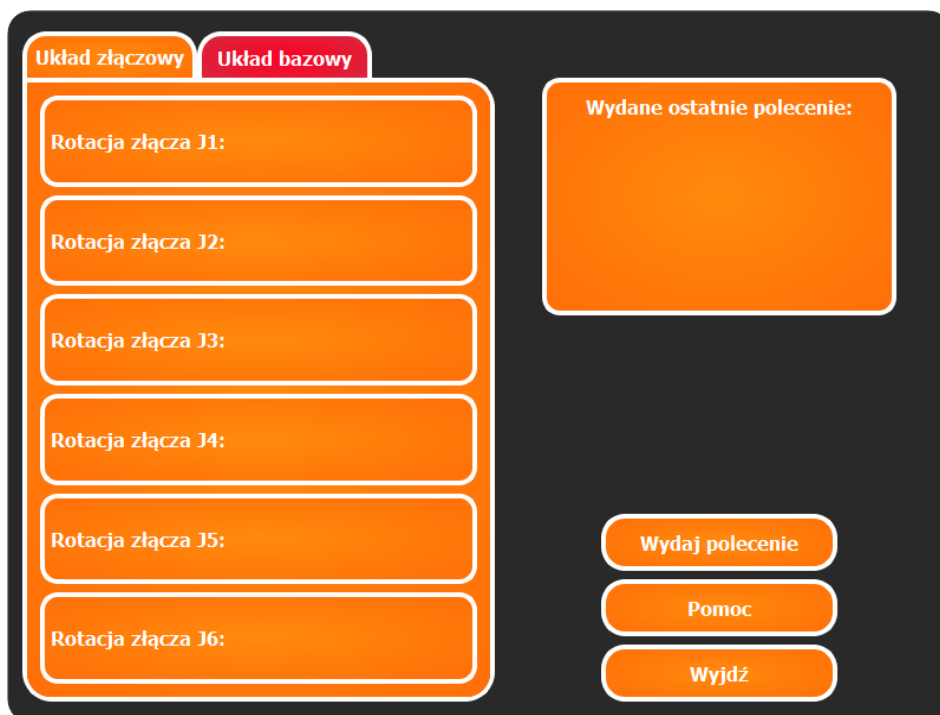
θ_i [°] – kąt między a_{i-1} i a_i mierzony prawoskrętnie wokół osi i -tego przegubu

σ_i – rodzaj złącza (= 0, gdy przegub jest obrotowy)

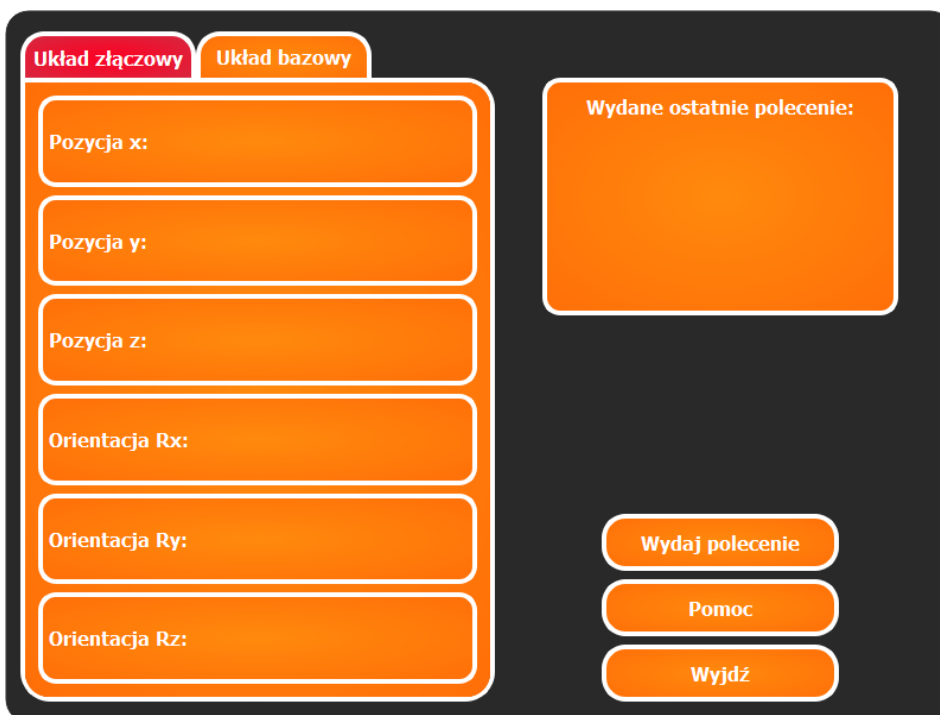
q_i – zmienna uogólniona związana z i -tym ogniwem

Realizacja systemu – program, interfejs graficzny użytkownika

Interfejs graficzny został zaprojektowany tak, aby w prosty i czytelny sposób wyświetlać dane użytkownikowi.



Rys. 5. Główne okno graficznego interfejsu użytkownika z otwartą kartą układu złączowego



Rys. 6. Główne okno graficznego interfejsu użytkownika z otwartą kartą układu bazowego

Na Rys. 6 oraz 7 zostało przedstawione główne okno graficznego interfejsu użytkownika. Po lewej stronie okna znajduje się tabela z dwoma kartami zawierającymi informacje na temat robota. Pierwsza karta zobrazowana na rysunku 6 przedstawia informacje o rotacjach poszczególnych złączy w układzie złączowym. Druga karta prezentowana na rysunku 7 zawiera dane o pozycji i orientacji końcówki robota w układzie bazowym. Aby zapewnić płynny odczyt danych z symulatora informacje odświeżane są co 100ms. Po prawej stronie głównego okna widać pole zawierające wydane ostatnie polecenie. Poza tą informacją w oknie pojawiają się

komunikaty pochodzące z modułu przetwarzania komend głosowych. Pod polem z komunikatami znajduje się sekcja przycisków.

Przycisk „Wydaj polecenie” uruchamia animację odbierania sygnału akustycznego, która trwa, dopóki użytkownik wprowadza polecenie głosowe nieprzekraczające czasu przeznaczonego na wydanie komendy. Po przetworzeniu sygnału wejściowego przez moduł wynik rozpoznawania polecenia zostaje wyświetlony w polu zawierającym komunikaty. Jest on również wysyłany do środowiska symulacyjnego.

Badania

Zasadniczym aspektem realizacji projektu jest skuteczność jego działania. Rozwiązanie inżynierskie oparto na bibliotece SpeechRecognition. W związku z tym, że autorzy nie udostępniają danych na temat skuteczności silnika rozpoznawania mowy musiano stworzyć bazę do testów. Przetestowanie takiego silnika jest skomplikowanym i czasochłonnym zadaniem, dlatego skupiono się na sprawdzeniu poprawności modułu przetwarzającego komendy. Na potrzeby testu ograniczono się do 15 poleceń głosowych. Założono, że proces rozpoznawania mowy działa poprawnie, po stronie programistycznej. Przy takim założeniu, na wejściu modułu przetwarzającego komendy w postaci tekstowej wprowadzono każde możliwe zdanie, które zostało opracowane na potrzeby działania projektu. W zdaniach zmieniano jedynie dane liczbowe występujących w nich zmiennych. Przykładowe wyniki jakie zostały uzyskane zaprezentowano w Tabeli 3-6.

Zebrane wyniki reprezentują już efekt pracy końcowej, początkowe rezultaty nie były tak zachęcające, a nawet więcej skłaniano się do przejścia na język angielski, który jest zdecydowanie prostszym niż język polski w analizie.

Testy poleceń bez podanej jednostki

Na wejściu modułu przetwarzającego komendy w postaci tekstowej wprowadzono każde możliwe zdanie, które zostało opracowane podczas realizacji projektu pozbawiając je jednostki na potrzeby testów. W zdaniach zmieniano dane liczbowe występujących w nich zmiennych.

Tabela 3. Wyniki testów komend opracowanych dla układu złączonego bez podanej jednostki

Lp.	Polecenie głosowe	Wynik
1	obróć złącze/złączem o numerze "jointData" o "angleData"	100%
2	obróć złącze/złączem numer "jointData" o "angleData"	100%
3	obróć złącze/złączem "jointData" o "angleData"	100%
4	obróć "jointData" złącze/złączem o "angleData"	100%
5	obróć o "angleData" złącze/złączem o numerze "jointData"	100%
6	obróć o "angleData" złącze/złączem numer "jointData"	100%
7	obróć o "angleData" złącze/złączem "jointData"	100%
8	obróć o "angleData" "jointData" złącze/złączem	100%

W tabeli 3 przedstawiono wyniki testów dla poleceń bez podanej jednostki dla układu złączonego. W zdaniach zmieniano dane liczbowe dla zmiennej „angleData” w zakresie od minus 360 do plus 360 stopni oraz zmiennej „jointData” w zakresie od 1 do 6. W rezultacie odpowiedź systemu przetwarzania komend głosowych brzmiała jako „Niepoprawna komenda”, a więc każde polecenie w układzie złączonym zostało przetworzone poprawnie.

Tabela 4. Wyniki testów komend opracowanych dla układu bazowego bez podanej jednostki

Lp.	Polecenie głosowe	Wynik
1	przesuń robota/robotem po osi x/y/z o "linearData"	100%
2	obróć robota/robotem względem osi x/y/z o "rotationData"	100%
3	przesuń robota/robotem o wektor "linearData" przecinek "linearData" przecinek "linearData"	BRAK
4	obróć robota/robotem o wektor "rotationData" przecinek "rotationData" przecinek "rotationData"	BRAK
5	przesuń robota/robotem o "linearData" po osi x/y/z	100%
6	obróć robota/robotem o "rotationData" względem osi x/y/z	100%

W tabeli 4 przedstawiono wyniki testów dla poleceń bez podanej jednostki dla układu bazowego. W zdaniach zmieniano zakresy dla zmiennej „linearData” w zakresie od minus 1500 do plus 1500 oraz zmiennej „rotationData” w zakresie od minus 360 do plus 360 stopni. Zdania 3. i 4. nie były testowane, ponieważ w tych zdaniach nie występuje żadna jednostka. Pozostałe zdania zostały poprawnie przetworzone uzyskując odpowiedź systemu „Niepoprawna komenda”.

Na wejściu modułu przetwarzającego komendy w postaci tekstowej wprowadzono każde możliwe zdanie, które zostało opracowane podczas realizacji projektu zmieniając na potrzeby testów słowo „obróć” i „przesuń” na słowo „przemieść”. W zdaniach zmieniano dane liczbowe występujących w nich zmiennych.

Testy poleceń ze zmienionym słowem

Tabela 5 przedstawia wyniki testów poleceń dla układu złączowego ze zmienionym słowem. W zdaniach zmieniano dane liczbowe dla zmiennej „angleData” w zakresie od minus 360 do plus 360 stopni oraz zmiennej „jointData” w zakresie od 1 do 6. W efekcie uzyskano stuprocentową skuteczność działania modułu przetwarzającego komendy głosowe, ponieważ na każdą komendę system odpowiedział komunikatem „Niepoprawna komenda”.

Tabela 5. Wyniki testów komend opracowanych dla układu złączowego ze zmienionym słowem

Lp.	Polecenie głosowe	Wynik
1	przemieść złącze/złączem o numerze "jointData" o "angleData" stopni	100%
2	przemieść złącze/złączem numer "jointData" o "angleData" stopni	100%
3	przemieść złącze/złączem "jointData" o "angleData" stopni	100%
4	przemieść "jointData" złącze/złączem o "angleData" stopni	100%
5	przemieść o "angleData" stopni złącze/złączem o numerze "jointData"	100%
6	przemieść o "angleData" stopni złącze/złączem numer "jointData"	100%
7	przemieść o "angleData" stopni złącze/złączem "jointData"	100%
8	przemieść o "angleData" stopni "jointData" złącze/złączem	100%

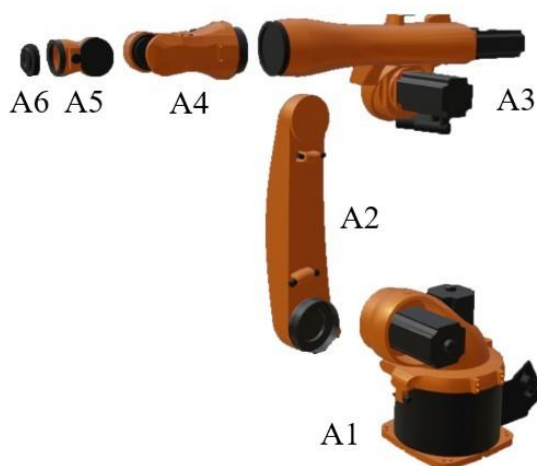
W tabeli 6 przedstawiono wyniki testów poleceń ze zmienionym słowem dla układu bazowego. W zdaniach zmieniano zakresy dla zmiennej „linearData” w zakresie od minus 1500 do plus 1500 mm oraz zmiennej „rotationData” w zakresie od minus 360 do plus 360 stopni. Testy przebiegły pozytywnie i rozpoznały każdą komendę jako niepoprawną

Tabela 6. Wyniki testów komend opracowanych dla układu bazowego ze zmienionym słowem

Lp.	Polecenie głosowe	Wynik
1	przenieść robota/robotem po osi x/y/z o "linearData" mm	100%
2	przenieść robota/robotem względem osi x/y/z o "rotationData" stopni	100%
3	przenieść robota/robotem o wektor "linearData" przecinek "linearData" przecinek "linearData"	100%
4	przenieść robota/robotem o wektor "rotationData" przecinek "rotationData" przecinek "rotationData"	100%
5	przenieść robota/robotem o "linearData" mm po osi x/y/z	100%
6	przenieść robota/robotem o "rotationData" stopni względem osi x/y/z	100%

Symulowany robot

Na Rys. 7 przedstawiono rozdzielone zamodelowane złącza ramienia robota wraz z nadanymi im materiałami. Zamieszczono przykładowo użyte materiały dla złącza A1, czyli podstawy robota wraz z pierwszym przegubem. Mając wszystkie przeguby zamodelowane, wprowadzono ruchomą armaturę robota i każdemu złączu nadano odpowiednie ograniczenia obrotowe.



Rys. 7. Części składowe modelu robota

Wnioski

Zaproponowane autorskie rozwiązanie systemu sterowania głosowego robotem oparte jest na nowatorskim algorytmie analizy semantycznej, wykorzystującym specyficzne cechy poleceń głosowych, które wybrano na potrzeby aplikacji. W tym celu opracowano bazę najczęściej wykonywanych czynności, które starano się wyodrębnić podczas testów. Analiza porównawcza pozwalała wybrać tylko te, które były rozpoznawane przynajmniej w 70%, tak by uniknąć niejednoznaczności, za resztę odpowiadają decyzje podejmowane przez sztuczną inteligencję. Poparte to zostało licznymi eksperymentami symulacyjnymi.

Na ten moment opracowany system przetwarza piętnaście komend głosowych w języku polskim co stanowi pewien ewenement na rynku rozwiązań przemysłowych, gdzie dominującym językiem jest angielski.. Istnieje możliwość dodania obsługi innych języków oraz zwiększenia liczby możliwych komend. W ten sposób można łatwo rozbudować projekt dodając do niego nowe funkcjonalności jak na przykład możliwość chwytania obiektów oraz ich przenoszenia.

Projekt pragniemy w pierwszej fazie wdrożyć w edukacji, by szerzej zweryfikować słusność jego użycia w przemyśle. Głównym celem będzie wdrożenie rozwiązania na potrzeby ćwiczeń laboratoryjnych wspieranych dodatkowo przez sterowniki PLC. Liczymy, że rozwiązanie takie pokaże, że proponowane rozwiązania zostaną zastosowane w przemyśle już w najbliższej przyszłości.

Literatura

1. *Dokumentacja biblioteki Socket 2022*, [online] <https://docs.python.org/3/library/socket.html>.
2. *ISO 8373-2012 Robots and robotic devices – vocabulary*.
3. Wprowadzenie do gniazd BSD
4. <http://www.cs.put.poznan.pl/ddwornikowski/sieci/sieci2/bsdsockets.html>
5. Centrum pobierania KUKA – model KUKA KR5 ARC
6. <https://www.kuka.com/event/media?itemId=F3A5EBFC31B54C35996CD618A51909A7>
7. Specyfikacja KUKA KR5 ARC
8. http://www.robotforum.ru/assets/files/Kuka/KR_5_arc_en.pdf
9. Szkodny T. *Modelowanie i symulacja ruchu manipulatorów robotów przemysłowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2004.
10. Saadah A., Husi G., *Kuka KR5 arc Welding Industrial Manipulator Workspace Modelling Based on Kinematics Study*, 2021.

Abstract. The aim of our the research was to focus on the development of an innovative industrial robot voice control system which could be used to communicate with collaborative robots and the creation of tools facilitating human-machine integration. In this paper, particular we focus requirements that industrial voice control systems should meet, and thanks to the use of simulations experiments based on models suggested for testing in the industry, such as KUKA robots, we confirmed proposed solution. A comprehensive study of the existing problems and their possible solutions was carried out. Contrary to some other works, the focus was on the specific language requirements (concerning on the Polish language) that should be met by industrial voice control systems, in this phase of our research we omitted safety aspects and the impact of noise on the quality of recognized instructions. We focus primarily on algorithms for recognizing orders (full sentences) and optimizing the language database used for human-machine communication using algorithms of artificial neural networks (deep learning).

Dr inż. Janusz Pochmara
Dr hab. inż. Aleksandra Świetlicka
Mgr inż. Krzysztof Kolanowski
Inż. Korneli Girejko
Inż. Jakub Jankowski
Politechnika Poznańska
Wydział Automatyki Robotyki i Elektrotechniki
Instytut Automatyki i Robotyki
ul. Piotrowo 3a
60-965 Poznań

E-mail: janusz.pochmara@put.poznan.pl
aleksandra.swietlicka@put.poznan.pl
krzysztof.kolanowski@put.poznan.pl
kornelia.girejko@student.put.poznan.pl
jakub.jankowski@student.put.poznan.pl

REMOTE MONITORING OF THE HEATING INSTALLATION PARAMETERS OF A SINGLE-FAMILY HOUSE

ZDALNY MONITORING PARAMETRÓW INSTALACJI GRZEWCZEJ DOMU JEDNORODZINNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono zdalną kontrolę pracy pieca gazowego CO za pomocą regulatora pokojowego ST-2801 Wi-Fi oraz aplikacji eModul. System wzbogacono o zdalny podgląd parametrów instalacji grzewczej: temperatura rzeczywista w pomieszczeniu, temperatura zewnętrzna i temperatura na wejściu rozdzielacza CO realizowany za pomocą sterowników Sonoff z sondą temperatury DS18B20 pracujących z oprogramowaniem SUPLA. Zaproponowano układ zdalnego pomiaru zużycia gazu za pomocą nakładki impulsowej i licznika impulsów LIW-01. Dane pomiarowe przechowywane są w chmurach. Zaprezentowano przykładowe charakterystyki parametrów instalacji CO.

Słowa kluczowe: supla, Sonoff, eModul, Tech-sterowniki, Termet.

Wstęp

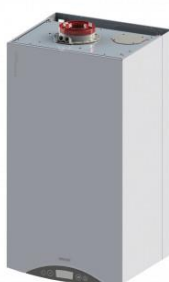
Prezentowana instalacja CO wykonana w technologii 16×2 PEX/AL/PE skręcanej z rozdzielaczem ośmioobwodowym zasilającym piętnaście stalowych grzejników trzy-, dwu- i jedno-panelowych o łącznej mocy ok. 17,00 kW przy parametrach 75/65/20°C. W skład instalacji wchodzi gazowy dwufunkcyjny kocioł kondensacyjny EcoCondens Gold Plus o mocy 25 kW firmy TERMET sterowany za pomocą regulatora pokojowego ST-2801 Wi-Fi z możliwością zdalnej obsługi z wykorzystaniem aplikacji eModul. Dodatkowo system pomiarowy wzbogacono o zdalny pomiar i podgląd parametrów instalacji grzewczej: temperatura rzeczywista pomieszczenia (pokój telewizyjny), temperatura zewnętrzna i temperatura na wejściu rozdzielacza realizowany za pomocą sterowników Sonoff z sondami temperatury DS18B20 pracujących z oprogramowaniem SUPLA z możliwością zdalnego monitoringu przy pomocy aplikacji SUPLA. Dane ogrzewanego budynku dwukondygnacyjnego bez podpiwniczenia o powierzchni ok. 150 m², stropy betonowe, dach płaski drewniany ocieplony wełną mineralną 15 cm, elewacja ocieplona styropianem 10 cm, okna profil 6-cio komorowy o przenikalność około $U=0,75$ oraz trzy szyby o przenikalności $U=0,5$.

Instalacja CO

Instalacja CO wykonana została w technologii 16×2 PEX/AL/PE skręcanej z rozdzielaczem ośmioobwodowym zasilającym piętnaście stalowych grzejników trzy-, dwu- i jedno-panelowych o łącznej mocy ok. 17,00 kW przy parametrach 75/65/20°C. W skład instalacji wchodzi gazowy dwufunkcyjny kocioł kondensacyjny EcoCondens Gold Plus o mocy 25 kW (rys. 1) firmy TERMET. Podstawowe cech kotła gazowego:

- nowoczesny palnik typu BLUE JET – niezwykle szeroki zakres modulacji (od 11% do 100%), mniejsza emisja zanieczyszczeń,
- sprawność 108% (sezonowa efektywność energetyczna ogrzewania pomieszczeń $\eta_s = 90\%$,
- użycie najnowszej generacji wymiennika ciepła ze stali nierdzewnej z aluminiowymi drzwiami palnika, co powoduje mniejsze straty ciepła,

- wysokoefektywna pompa obiegowa klasy A,
- niski poziom hałasu dzięki izolacji dźwiękochłonnej (poziom mocy akustycznej $L_{WA} = 54$ dB),
- wentylator z płynną regulacją obrotów (sterowany elektronicznie),
- palnik cylindryczny ze stali nierdzewnej o niskiej emisji NOx (klasa 5),
- grupa hydrauliczna w postaci hydrobloku montowania na szybkozłączach,
- kompletny system zabezpieczeń,
- nowoczesny panel sterowania z wyświetlaczem elektronicznym, pełną autodiagnostyką i funkcją pogodową,
- możliwość pracy z modułami wielostrefowymi do systemów grzewczych,
- możliwość współpracy z pompami ciepła powietrze/woda,
- współpraca z kolektorami słonecznymi,
- wymiennik płytowy do przygotowania ciepłej wody użytkowej.



Rys. 1. Gazowy dwufunkcyjny kocioł kondensacyjny EcoCondens Gold Plus o mocy 25 kW
(źródło: www.termet.com.pl)

Specyfikację grzejników w poszczególnych obwodach rozdzielacza CO przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Specyfikacja grzejników w poszczególnych obwodach rozdzielacza CO.

Numer obwodu rozdzielacza	Pomieszczenie / poziom	Rodzaj grzejnika	Moc grzejnika [kW]	Pojemność grzejnika [l]	Powierzchnia pomieszczenia [m ²] / wysokość [m]
1.	Pokój balkonowy / II	C22 600x1200	1990	7,08	20,20 / 2,40
2.	Sypialnia / I	C11 600x1000	901	2,87	11,30 / 2,20
	Gabinet / I	C11 600x900	811	2,58	6,00 / 2,20
	Łazienka / I	Grzejnik dekoracyjny	454	b/d	2,25 / 2,20
3.	Pokój telewizyjny / II	V33 600x1000	2257	8,30	15,70 / 2,40
4.	Korytarz / I	C11 600x900	811	2,58	10,00 / 2,20
	Pokój (jadalnia) / I	C11 600x1000	901	2,87	8,00 / 2,20
	Warsztat / I	C22 900x600	1379	4,56	15,50 / 2,20
5.	Korytarz / II	V11 900x600	759	2,40	3,50 / 2,40
	Wiatrołap / II	Grzejnik dekoracyjny	601	b/d	2,70 / 2,40
6.	Kuchnia I/	C22 900x400	920	3,04	10,00 / 2,20
	Kotłownia / I	C11 600x400	360	1,15	3,10 / 2,20
7.	Kuchnia / II	V22 600x800	1326	4,72	10,00 / 2,40
	Łazienka / II	Grzejnik dekoracyjny	712	b/d	5,30 / 2,40
8.	Pokój (niebieski). / II	V22 600x1400	2321	8,26	18,00 / 2,40

Całkowita pojemność instalacji CO to ok. 100 litrów, dlatego nie była konieczna instalacja dodatkowego wzbiorczego naczynia przeponowego.

Regulator pokojowy ST-2801 Wi-Fi

Kocioł sterowany jest za pomocą regulatora pokojowego ST-2801 Wi-Fi (Rys.2a.) z możliwością zdalnej obsługi z wykorzystaniem aplikacji eModul (Rys.3.). Regulator jest kompatybilny z protokołem OpenTherm/plus (OT+) i OpenTherm/lite (OT-), dlatego wspiera pracę kotłów gazowych ze złączem komunikacyjnym OpenTherm, a w takie wyposażony jest dodatkowo kocioł kondensacyjny EcoCondens Gold Plus.

Podstawowe funkcje regulatora:

- inteligentne utrzymywanie zadanej temperatury pokojowej,
- inteligentne sterowanie zadaną temperaturą kotła CO,
- zmiana zadanej temperatury kotła na podstawie temperatury zewnętrznej (sterowanie pogodowe),
- podgląd temperatury zewnętrznej,
- tygodniowy program ogrzewania pokojowego oraz bojlera,
- wyświetlanie informacji o alarmach urządzenia grzewczego,
- dostęp do wykresów temperatury urządzenia grzewczego,
- budzik,
- blokada rodzicielska,
- komunikacja Wi-Fi.

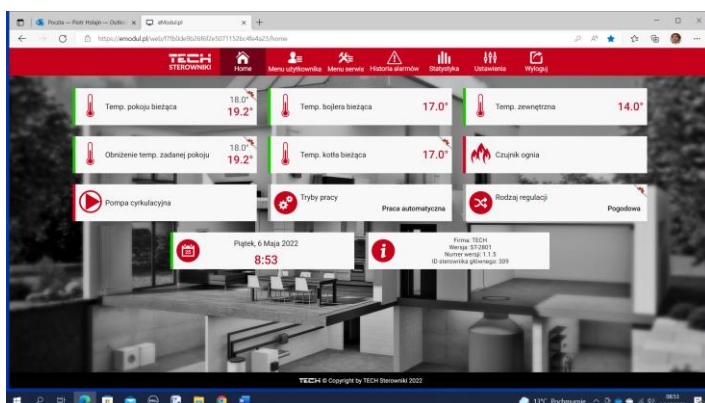


a)



b)

Rys. 2. Regulator pokojowy ST-2801 Wi-Fi z osprzętem: a) regulator i bezprzewodowy czujnik temperatury C-mini, b) czujnik temperatury zewnętrznej Termet WKC0567 współpracujący z kotłem. (źródło: www.techsterowniki.pl)



a)

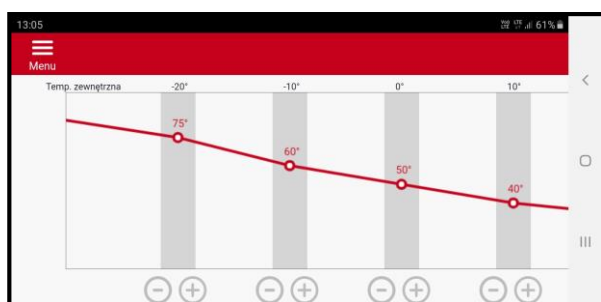


b)

Rys.3. Wygląd interfejsu użytkownika aplikacji eModul strona startowa: ekran laptopa, b) ekran smartfona.

Czujnik temperatury wewnętrznej C-mini umieszczony jest w pokoju telewizyjnym (grzejnik bez głowicy termostatycznej otwarty na max.), natomiast czujnik temperatury zewnętrznej Termet WKC0567 zainstalowano na elewacji północnej w połowie wysokości budynku (Rys.2b.). Przez większość okresu grzewczego zastosowano sterowanie pogodowe: zmiana zadanej temperatury kotła na podstawie temperatury zewnętrznej zgodnie z krzywą grzewczą pokazaną na rysunku 4.

W przypadku dłuższej nieobecności utrzymywano temperaturę zadaną na poziomie 16 °C, a w celu szybszego dogrzenia budynku stosowano sterowanie stałotemperaturowe przy temperaturze docelowej z zakresu 60-75 °C uzależnionej od temperatury zewnętrznej.



Rys.4. Krzywa grzewcza zaimplementowana w regulatorze pokojowym ST-2801 Wi-Fi.

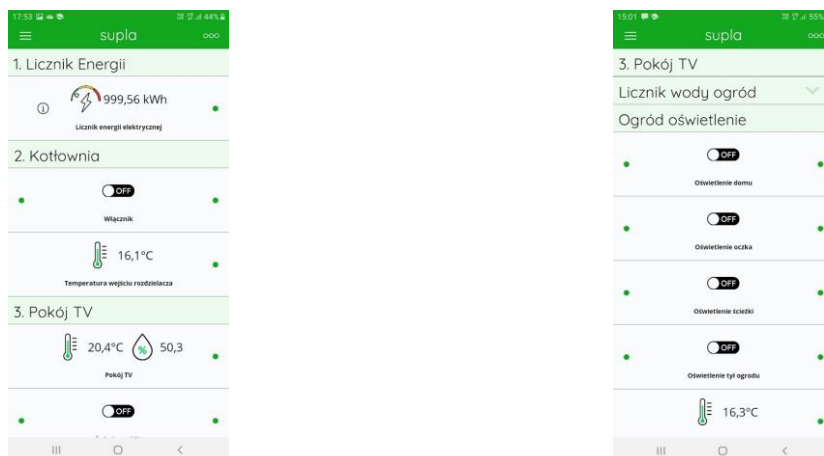
Dodatkowy układ pomiarowy parametrów instalacji CO

System pomiarowy regulatora pokojowego ST-2801 Wi-Fi fabrycznie wbudowany wzbogacono o zdalny pomiar i podgląd parametrów instalacji grzewczej: temperatura rzeczywista w pomieszczeniu, temperatura zewnętrzna i temperatura na wejściu rozdzielacza realizowany za pomocą sterowników Sonoff Basic i Sonoff 4CH (Rys.5.) z sondami temperatury DS18B20 a w przypadku pokoju telewizyjnego czujnika temperatury i wilgotności DHT22 pracujących z oprogramowaniem SUPLA. Na rysunku 6 przedstawiono wygląd interfejsu użytkownika aplikacji SUPLA ekran startowy smartfona.

Zaletą takiego układu pomiarowego jest dokonywanie pomiarów temperatury co 10 minut w odróżnieniu od systemu wbudowanego regulatora pokojowego gdzie pomiar odbywa się co 10 minut ale nieregularnie dla poszczególnych kanałów. Ponadto czujnik temperatury kotła pokazuje błędne odczyty temperatury instalacji CO w momencie pobierania ciepłej wody ponieważ jest on jednocześnie czujnikiem temperatury CWU. Umieszczenie sondy temperatury na wejściu rozdzielacza CO (Rys.7.) eliminuje problem jednoczesnego odczytu temperatury CO i CWU. Temperatura na wejściu rozdzielacza jest o ok 4 °C niższa niż na wyjściu kotła (można tego uniknąć odpowiednio kalibrując sondę). W obu przypadkach dane pomiarowe przechowywane są w chmurach w formacie csv. oraz możliwy jest podgląd danych w postaci wykresów bezpośrednio w aplikacjach eModul i SUPLA.



Rys. 5. Zainstalowane sterowniki Sonoff Basic i Sonoff 4CH w rozdzielnicy kotłowni.



Rys. 6. Wygląd interfejsu użytkownika aplikacji SUPLA ekran startowy smartfona.



Rys. 7. Miejsce instalacji czujnika temperatury na wejściu rozdzielacza.

Funkcje zdalnego włączania i wyłączania sterowników Sonoff wykorzystano do sterowania oświetleniem elewacji domu, ogrodu oraz oczka wodnego wykorzystującym automatykę z zegarem astronomicznym w chmurze SUPLA.ORG.

Propozycja zdalnego pomiaru zużycia gazu

Układ pomiarowy można by było rozbudować o zdalny pomiar zużycia gazu z archiwizacją danych pomiarowych w chmurze SUPLA.ORG po zastosowaniu nakładki impulsowej na licznik gazu np. IN-Z61 (Rys.8a) oraz licznika impulsów LIW-01 firmy ZAMEL (Rys.8b). Dane pomiarowe byłyby zintegrowane z pomiarami parametrów CO. Problemem jest uznanie przez dostawcę gazu założenie takiej nakładki jako ingerencję w układ pomiarowy i nałożeniem kary.



(źródło: www.intergaz.eu)



b)
(źródło: www.zamel.com.pl)

Rys.8. Propozycja układu zdalnego pomiaru zużycia gazu wraz z archiwizacją danych: nakładka impulsowa IN-Z61; licznik impulsów LIW-01 firmy ZAMEL.

Dane pomiarowe

Na rysunku 9 pokazano przykładowe dane pomiarowe pobrane z aplikacji eModul w zakładce *Statystyki*: temperatura kotła bieżąca, temperatura pokoju bieżąca i temperatura zewnętrzna dla dwóch miesięcy grudnia 2021 oraz marca 2022. Natomiast na rysunku 10 pokazano zrzuty ekranu danych pomiarowych w chmurze SUPLA.ORG dla temperatury na wejściu rozdzielacza (Rys.10.a) oraz temperatury i wilgotności w pokoju telewizyjnym (Rys.10.b) oba zrzuty ekranów dotyczą miesiąca marca.

a)

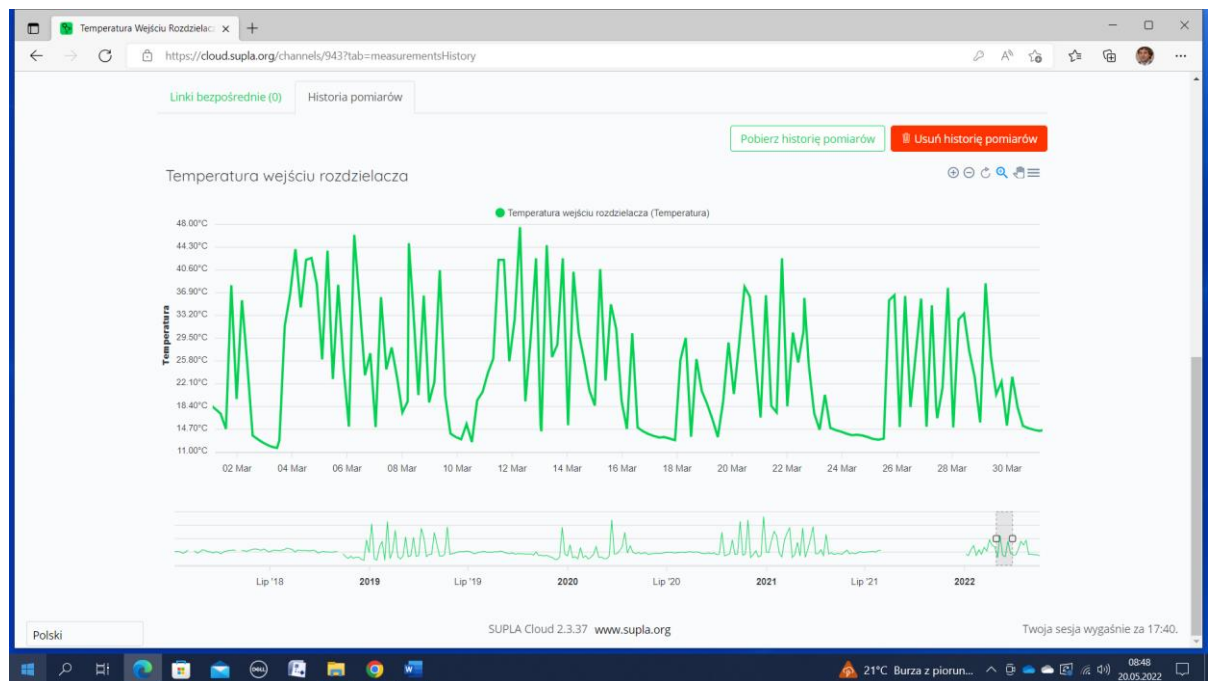


b)



Rys.9. Przykładowe dane pomiarowe pobrane z aplikacji eModul w zakładce *Statystyki* dla a) temperatura kotła bieżąca, temperatura pokoju bieżąca i temperatura zewnętrzna: grudzień 2021, b) marzec 2022

a)



b)



Rys. 10. Przykładowe dane pomiarowe pobrane z chmury SUPLA.ORG dla: a) temperatura na wejściu rozdzielacza marzec 2022, b) temperatura i wilgotność w pokoju telewizyjnym marzec 2022

Podsumowanie

Instalacja CO została uruchomiona 11.09.2021 i do 01.05.2022 zużyto 1227 m³ gazu w tym przygotowanie CWU oraz ciepłych posiłków (kuchenka gazowa wraz piekarnikiem). Całkowity koszt użytkowania kotła CO oraz kuchenki gazowej za rok od 11.05.2021 do 01.05.2022 z uwzględnieniem zużycia gazu przez poprzedni bojler gazowy CWU to 3080,16 złotych (1227 m³ gazu). W kolejnych latach przewiduje się optymalizację zużycia gazu na podstawie analizy zbieranych danych pomiarowych.

Literatura

1. www.techsterowniki.pl
2. www.termet.com.pl
3. www.supla.org
4. www.emodul.pl

Abstract. The paper presents remote control of the CO gas furnace operation using the ST-2801 Wi-Fi room regulator and the eModul application. The system has been enriched with remote ` of the heating system parameters, including the actual temperature in the room, the external temperature, and the temperature at the input of the CO manifold, realized by means of Sonoff controllers with a DS18B20 temperature probe working with SUPLA software. A remote gas consumption measurement system based on an impulse module and a pulse counter LIW-01 has been proposed through. Measurement data are stored in the cloud. Examples of the characteristics of the parameters of the central heating installation have been presented.

Dr inż. Piotr Holajn
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki i Informatyki
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice
E-mail: piotr.holajn@polsl.pl

Krzysztof SZTYMELSKI, Adam PILŚNIAK, Marcin FICE, Bartłomiej GAŚSIOR,
Piotr JANOTA Michał SOREK, Dawid NAMYSŁO

Politechnika Śląska

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A RENEWABLE-SOURCE SIMULATOR WITH DIGITALLY CONTROLLED CURRENT- VOLTAGE CHARACTERISTICS

PROJEKT I REALIZACJA SYMULATORA ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII Z CYFROWO STEROWANĄ CHARAKTERYSTYKĄ PRĄDOWO-NAPIĘCIOWĄ

Streszczenie. W artykule przedstawiono projekt i budowę symulatora źródeł odnawialnych, w szczególności źródła fotowoltaicznego, o mocy do ok. 1,5 kW i napięciu maksymalnym 300 V. Uzyskanie takiego napięcia jest istotne dla współpracy z przekształtnikami energoelektronicznymi on-grid – pracujących z siecią elektroenergetyczną i off-grid – pracujących poza siecią, w których dolne napięcie regulatora MPPT (układ poszukujący punktu maksymalnego mocy) wynosi obecnie ponad 100 V. Symulator wykonano wykorzystując zasilacz z możliwością niezależnego ograniczania napięcia i prądu. Obciążeniem zasilacza jest układ szeregowo połączonych diod reprezentujących ogniwa fotowoltaiczne. W ten sposób możliwe jest uzyskanie charakterystyki zewnętrznej odnawialnego źródła energii, a wartość napięcia źródła jest sterowana liczbą szeregowo połączonych diod. Potencjometry ograniczenia prądu i napięcia zasilacza zrównoległono układem mikroprocesorowym z zaimplementowanym lokalnym serwerem WEB i możliwością zdalnego sterowania przez przeglądarkę internetową. Przedstawione efekty pracy dotyczą zrealizowanego przez studentów kierunku Energetyka (profil praktyczny) Politechniki Śląskiej, projektu PBL (project base learning).

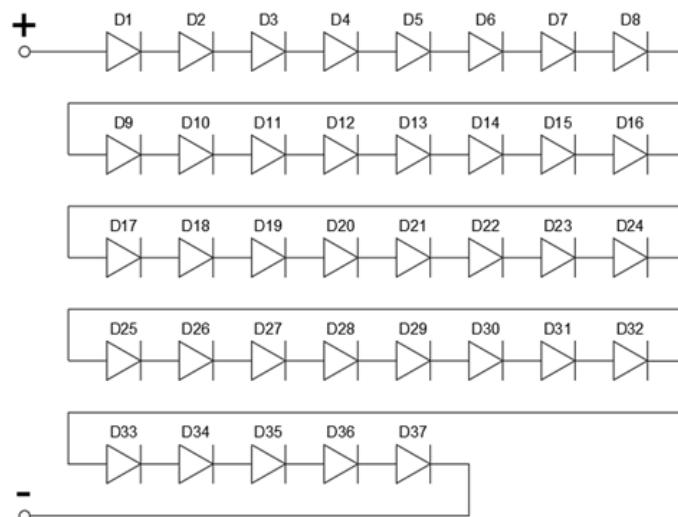
Słowa kluczowe: symulator OZE, zasilacz programowalny, charakterystyki prądowo-napięciowe.

Wstęp

W niniejszej części artykułu przedstawiono schematy, wyniki symulacji oraz przeprowadzone badania wraz z obrazującymi je wykresami. Symulator stworzono aby umożliwić badanie przekształtników energoelektronicznych. Pomysłem, według którego zrealizowano projekt było stworzenie panelu PV, czyli fotowoltaicznego, złożonego z diod typu MUR 860. Założeniem było stworzenie odpowiednika pojedynczego ogniwa PV w taki sposób, aby pojedyncza dioda mogła ją skutecznie odwzorować.

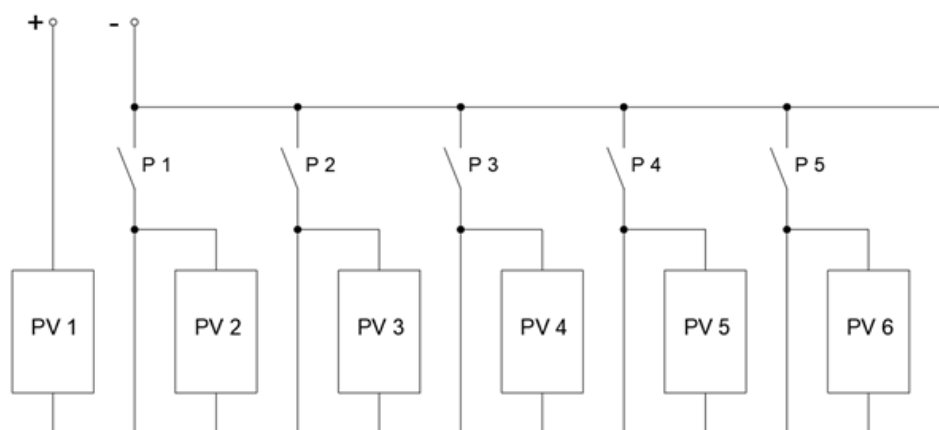
Realizacja projektu

Zaprojektowano układ sterujący, oraz ogniwo fotowoltaiczne które tworzą pojedyncze diody połączone szeregowo (rys. 1).



Rys. 1. Schemat zastępczy pojedynczego ogniwa PV

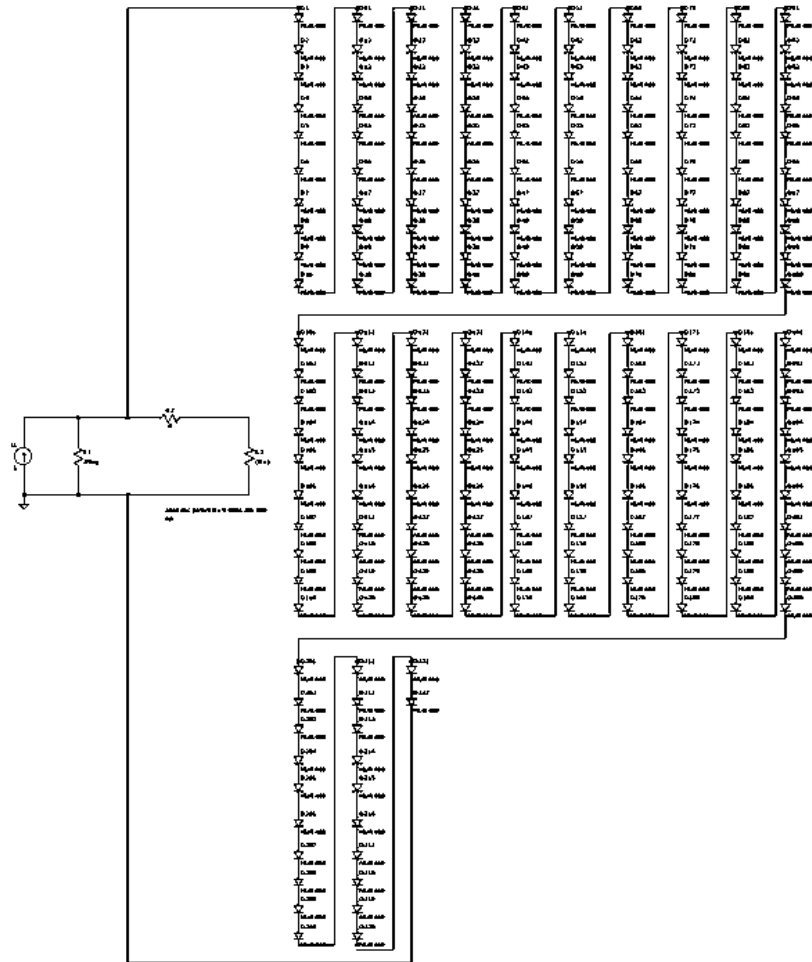
Pojedyncze diody połączone szeregowo tworzą jedno ogniwo PV. Stworzono 6 paneli, czyli zespołu ogniw – obrazuje to poniższy rysunek:



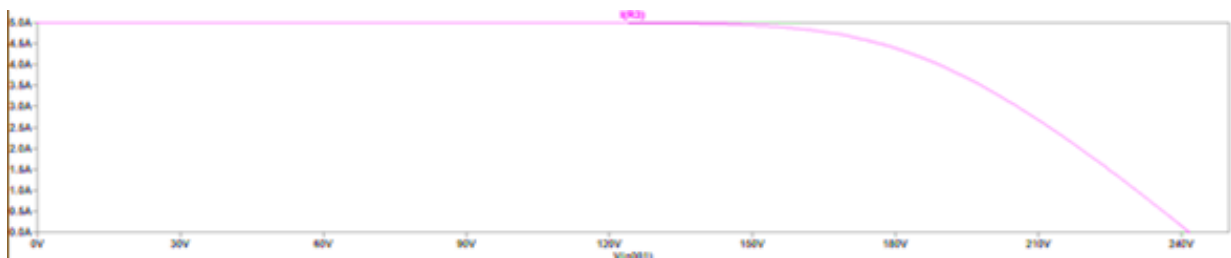
Rys. 2. Schemat symulatora fotowoltaicznego

Symulacje komputerowe

Koncepcyjny model panelu przed przystąpieniem do budowy należało zasymulować, aby potwierdzić przyjęte założenia. W tym wypadku potwierdzenia wymagały charakterystyki paneli PV, wraz z punktem pracy maksymalnej. W celu zbadania możliwości zasilacza wykonano koncepcyjny schemat symulatora modułu PV. Moduł wyposażono w 222 diody połączone szeregowo, które symbolizowały 222 pojedyncze ogniwa fotowoltaiczne. W celu weryfikacji propozycji takiego rozwiązania wykonano symulacje w programie LTspice.



Rys. 3. Symulacja modułu PV zwizualizowanego za pomocą 222 diod (222 celki)



Rys. 4. Charakterystyka zewnętrzna zasymulowanego komputerowo modułu PV przy prądzie źródła równym 5 A



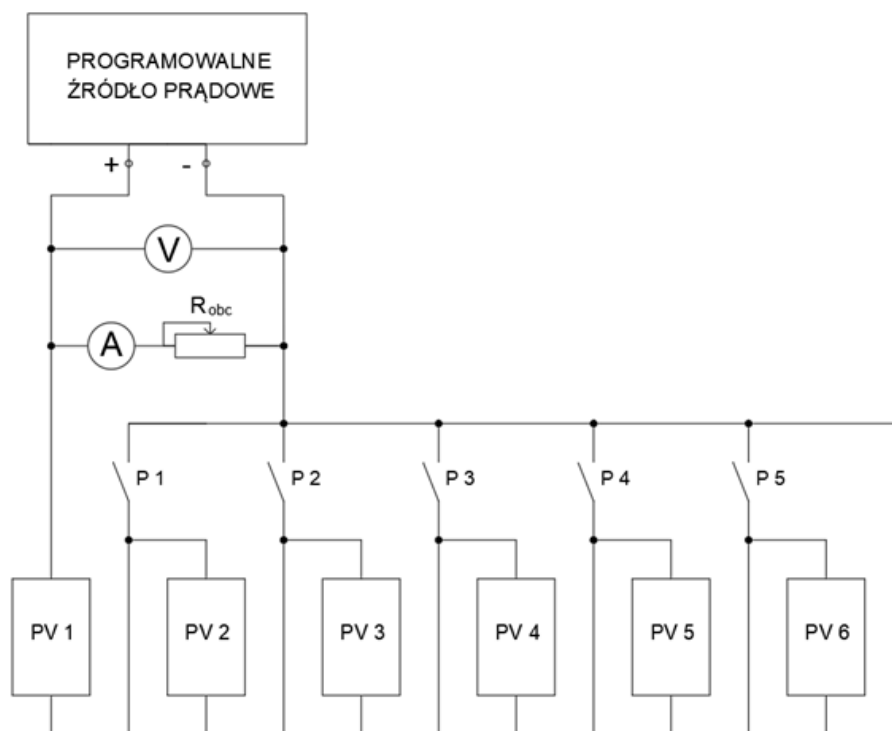
Rys. 5. Charakterystyka zewnętrzna zasymulowanego komputerowo modułu PV przy prądzie źródła równym 3 A



Rys. 6. Charakterystyka zewnętrzna zasymulowanego komputerowo modułu PV przy prądzie źródła równym 1 A

Wykonanie symulatora

Komputerowe analizy potwierdziło zgodne z oczekiwaniami działanie układu, czego konsekwencją było utworzenie rzeczywistego symulatora składającego się z 6 paneli w których to skład wchodziło: 37 diod połączonych szeregowo, przymocowanych do radiatora. Takie połączenie diod miało odzwierciedlać rzeczywisty moduł PV składający się z 37 celek. Wykonano symulator panelu modułu fotowoltaicznego o stałych, sztucznych parametrach nasłonecznienia co jest dużą zaletą w kontekście badań odnawialnych źródeł energii. Energię do układu dostarczał zasilacz laboratoryjny dużej mocy. Układ (zarówno ten w symulacji jak i ten stworzony w poszczególnych elementach w formie fizycznej) zawierał rezystancje nastawną – pozwalało to wykreślić charakterystyki od stanu zwarcia do stanu jałowego, zawężając pomiary na tzw. kolanie charakterystyki źródła fotowoltaicznego, gdzie znajduje się punkt pracy maksymalnej.

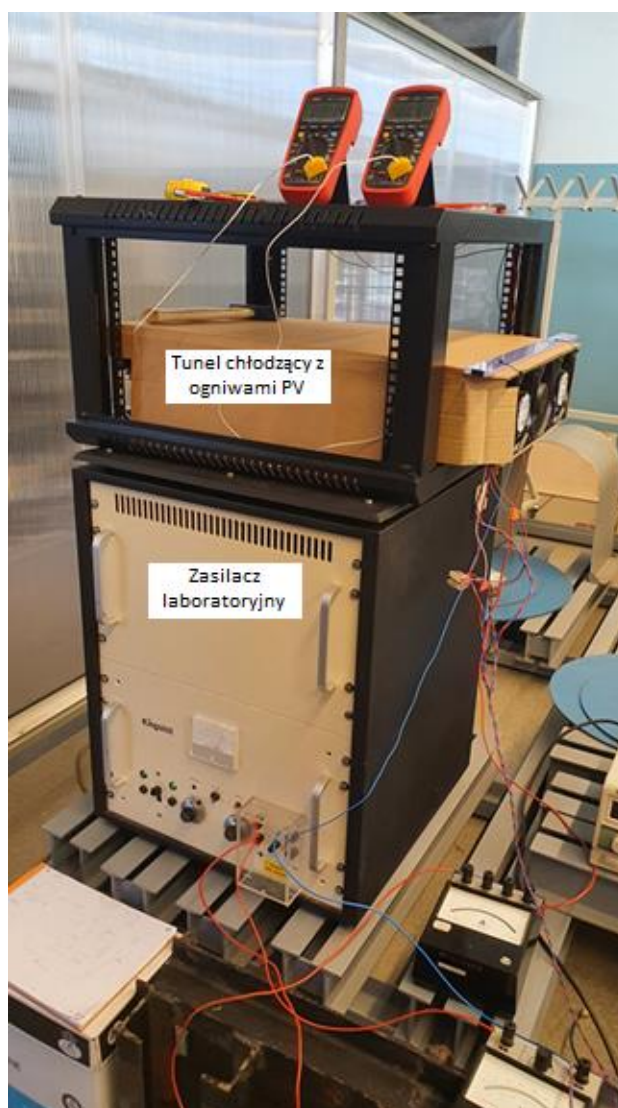


Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

Poniżej przedstawiono kilka fotografii przedstawiających zbudowany symulator.



Rys. 8. Skonstruowane moduły PV



Rys. 9. Zasilacz wraz z modułami PV zabudowanymi w tunelu chłodzącym

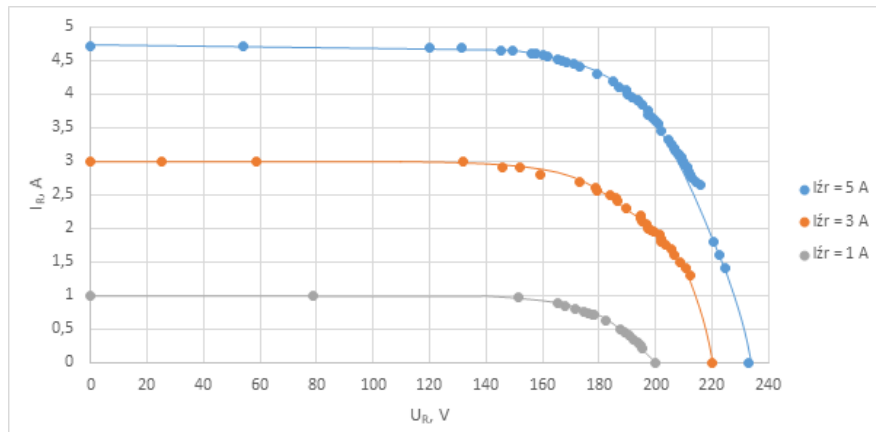


Rys. 10. Zasilacz z modułami PV (pierwotna wersja zabudowy w szafie sterowniczej)

W symulacji komputerowej nie uwzględniono wpływu temperatury na charakterystykę, co miało duży wpływ na finalną wersję zabudowy. Na rys. 9 na obudowie zasilacza umieszczono zabudowane w tunelu chłodzącym (kartonowy tunel jako prototyp testowy) radiatory z diodami oraz w celu stałego monitoringu rozkładu temperatury wewnątrz tunelu multimetry przystosowane do pomiaru temperatury z wykorzystaniem termopar typu K. Pierwotna wersja rys. 10 zakładała umieszczenie jednego wentylatora centralnie nad modułami. Po pierwszych pomiarach taką konstrukcję należało zmienić. Wymuszone to było następującymi czynnikami:

- centralnie umieszczony wentylator nie wydmuchiwał ciepłego powietrza, a jedynie je cyrkulował – brak wymiany powietrza,
- rogowe części konstrukcji nagrzewały się nadmiernie, gdyż nie miały dopływu zimnego powietrza – co było jednym z następstw wyżej wspomnianego braku wymiany powietrza.

Po analizie wstępnych wyników badań, projekt zmodyfikowano tak aby umieścić wentylatory w jednym z boków modułu oraz aby ukierunkować przepływ powietrza tak by wydmuchiwać ciepłe powietrze poza obudowę. W celu sprawdzenia postawionych założeń zbudowano prototyp tunelu chłodzącego. Przeprowadzone pomiaru rozkładu temperatury wewnątrz zmodyfikowanego układu potwierdziły poprawę w odprowadzaniu ciepła. Po ustabilizowaniu temperatur wykonano pomiary w celu stworzenia charakterystyk wyjściowych.



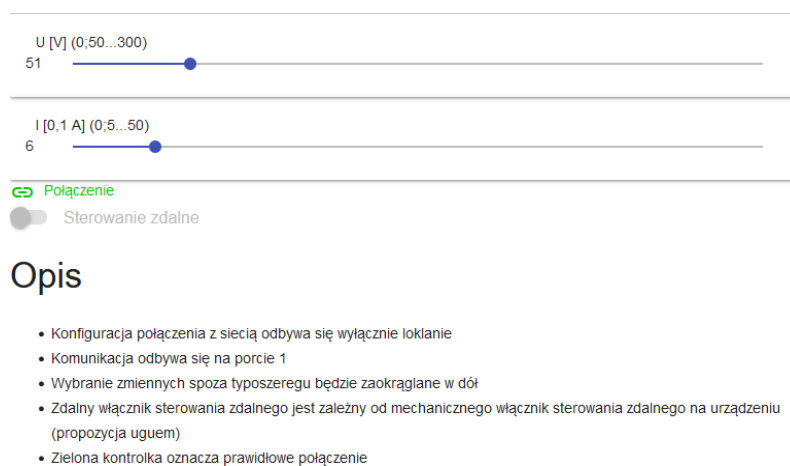
Rys. 11. Charakterystyka zewnętrzna symulatora PV wyznaczona poprzez zmianę rezystancji obciążenia

Programowe zadawanie charakterystyk

Zasilacz został wyposażony w 32 – bitowy mikrokontroler ESP 32. Jego zadaniem jest sterowanie podstawowymi parametrami zasilacza czyli prądem oraz napięciem. Wykonawczy układ sterowania to 8 przełączników do których podłączone są rezystory ułożone w drabinkę. Pozwoliło to uzyskać dwa czterobitowe przetworniki rezystancyjne, służące do sterowania prądem i napięciem. Istnieje również możliwość ręcznego sterowania lokalnego. Oparcie elektroniki o mikrokontroler ESP 32 pozwoliło w ciekawy i bardzo praktyczny sposób zrealizować metodę zdalnego sterowania. Mikrokontroler wyposażony jest domyślnie w bezprzewodowy moduł Wi-Fi oraz Bluetooth. Zdecydowano się odrzucić protokół Bluetooth, ponieważ pozwalałby jedynie na bezprzewodowe sterowanie w niedużej odległości od zasilacza. Mając świadomość dostateczności lokalnego sterowania, zdecydowano się o przyszłościowe poszerzenie funkcjonalności. Wykorzystano komunikację Wi-Fi oraz darmowy portal remoteme.org. Portal ten jest darmowym oprogramowaniem służącym do wspomaganie hobbyistycznego programowania układów elektronicznych działających w szeroko rozumianej rodzinie Internetu rzeczy, zwanej IoT.

Uruchomienie symulatora powoduje pojawienie się sieci Wi-Fi, po połączeniu z którą dostępny jest portal służący do zadawania parametrów pracy.

Witryna dedykowana do urządzenia znajduje się w chmurze portalu *remoteme.org* i jest dostępna na całym świecie pozwalając na zdalne sterowanie urządzenia (Rys. 12.).



Rys. 12. Okno stworzonej strony w portalu remoteme.org [2]

Źródła

1. Symulacje i analizy komputerowe: program *LTspice*.
2. Sterowanie układem zasilacza: <https://remoteme.org/>.

Abstract. This paper presents the design and construction of a renewable source simulator, strictly – a photovoltaic source, with a maximum output power up to about 1.5 kW and a maximum voltage of 300 V. Obtaining such a voltage is important for the cooperation with on-grid and off-grid power electronic converters, in which the lowest voltage of the MPPT regulator is in these days, over 100 V. The simulator was made by using a power supply with the electrical parameters $I_{\max} = 5$ A and $U_{\max} = 300$ V and with the possibility of independent voltage and current limiting. The load of the power supply is an array of diodes connected in series which represents photovoltaic cells. In this way, the output characteristics of the renewable source can be obtained and voltage of the source is controlled by the number of diodes connected in series. The current and voltage limiting potentiometers of the power supply are paralleled by a microprocessor system with an implemented web server and the possibility of remote control via a web browser. The presented results refers to the PBL (project base learning) project carried by students of the Power Engineering Faculty (practical profile) of the Silesian University of Technology.

Dr inż. Krzysztof Sztymelski,
Dr inż. Marcin Fice,
Dr inż. Adam Piłśniak,
Bartłomiej Gąsior, Piotr Janota, Michał Sorek, Dawid Namysło, Marcel Torbus (studenci)
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice

E-mail: krzysztof.sztymelski@polsl.pl
marcin.fice@polsl.pl
adam.pilsniak@polsl.pl
bartgas348@student.polsl.pl
piotjan960@student.polsl.pl
michsor319@student.polsl.pl
dawinam662@student.polsl.pl

CONTROL OF THE INDUCTION GENERATOR FOR A MICROBIOGAS PLANT IN THE ON/OFF-GRID MODE

STEROWANIE GENERATOREM INDUKCYJNYM MIKROBIOGAZOWNI W TRYBIE ON/OFF-GRID

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki zrealizowanych prac w ramach projektu dopasowania generatora spalinowego z prądnicą indukcyjną o mocy do 20 kW do pracy w trybach on-grid i off-grid. Dopasowanie polegało na zastosowaniu układu przekształtnikowego pośredniczącego w przekazywaniu energii elektrycznej z prądnicy do sieci elektroenergetycznej. Zastosowanie akumulatora o niewielkiej pojemności pozwoliło na stabilizację parametrów jakościowych energii elektrycznej (napięcie, częstotliwość) w sieci wyspowej bez względu na moc generowaną przez prądnicę w stanach nieustalonych. Układ przekształtnikowy umożliwił również pracę prądnicy indukcyjnej ze zmienną prędkością obrotową oraz momentem obrotowym w celu dopasowania mocy generowanej do mocy odbiorników. Badania układu zasilania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym umożliwiającym pracę w trybie on-grid oraz off-grid ze zmienną mocą obciążenia trójfazowego symetrycznego, niesymetrycznego i nieliniowego.

Słowa kluczowe: generator indukcyjny, układ przekształtnikowy, on grid, off-grid.

Wstęp

Do budowy układów generacji energii elektrycznej (również w skojarzeniu z ciepłem) dla mikrobiogazowni do 50 kW wykorzystywane są powszechnie, z powodu niskiej ceny oraz trwałości i prostoty rozwiązania, maszyny indukcyjne napędzane silnikami spalinowymi. Układy takie pracują „na sieć” (on-grid), a do przyłączenia do sieci elektroenergetycznej wymagają jedynie baterii kondensatorów kompensującej moc bierną indukcyjną. Natomiast układ taki nie może poprawnie generować energii w trybie „na wyspę” (off-grid). Urządzenia takie pracują najczęściej bez regulacji generowanej mocy czynnej lub stosowana jest regulacja dwustanowa (dwie wartości mocy nastawiane dawką mieszanki paliwowo-gazowej). Jednak coraz częściej wymagana jest praca off-grid, np. w gospodarstwach hodowlanych wymagających źródła energii w przypadku zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej. Opracowano rozwiązanie z układem przekształtnikowym i niewielkim zasobnikiem akumulatorowym, pozwalające na bezprzerwową generację energii w trybach on/off-grid z możliwością regulacji generowanej mocy czynnej, jednocześnie przez zmianę prędkości obrotowej generatora oraz dawki paliwa (momentu obrotowego), dopasowując punkt pracy zestawu do najniższego zużycia paliwa. W trybie off-grid amplituda zmiany mocy czynnej obciążenia nie może być większa niż maksymalna moc zasobnika akumulatorowego. Przy czym czas pobierania energii z akumulatora lub oddawania energii do akumulatora jest stosunkowo krótki (kilka sekund przy mocy maksymalnej).

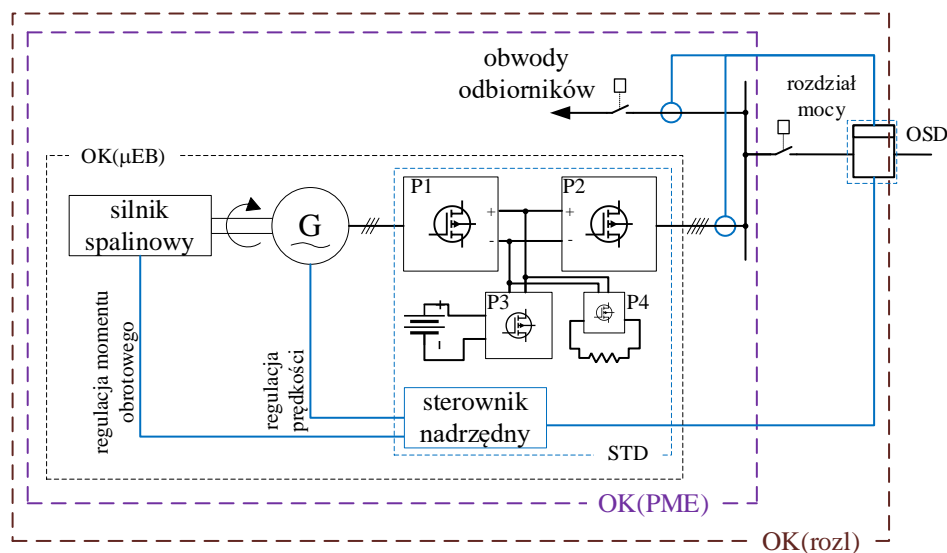
Założono, że układ zasilania z prądnicą indukcyjną spełni wymagania:

- w trybie on-grid zmiana generowanej mocy czynnej przez zmianę prędkości obrotowej o momentu obrotowego (dawki paliwa) silnika spalinowego;
- w trybie off-grid zapewnienie odpowiednich parametrów jakościowych energii elektrycznej zgodnie z normą PN-EN 50160:2010E [1];
- czas przełączania pomiędzy trybami <40 ms.

Budowa układu zasilania z prądnicą indukcyjną i układem przekształtnikowym

Cechą charakterystyczną układu jest zastosowanie dwóch przekształtników AC/DC (sieciowego P2 i generatorowego P1) i jednego przekształtnika akumulatorowego DC/DC typu DAB (P3). Dodatkowo zainstalowany został przekształtnik DC/DC typu chopper (P4) mający na celu odprowadzanie energii elektrycznej po osiągnięciu wartości granicznych napięcia i prądu akumulatora podczas ładowania. Napięcie szyny DC pomiędzy przekształtnikami wynosi ok. 700 V. Napięcie znamionowe akumulatora wynosi 48 V.

Schemat blokowy układu zasilania pokazano na rys. 1. Na schemacie oznaczono osłony kontrolne (osłony bilansowe): OK(PME) – osłona prosumenckiej mikroinfrastruktury energetycznej (w tym wypadku osłona gospodarstwa rolnego), uwzględnia bilans energii wewnątrz instalacji odbiorcy (prosumenta); OK(rozl) – osłona rozliczeniowa, uwzględnia bilans energii z przyłączem energetycznym; OK(μ EB) – osłona źródła mikrobiogazowego, uwzględnia bilans źródła brutto (wraz z bilansem paliwa); oraz STD – sieciowy terminal dostępowy, w tym wypadku jest to układ przekształtnikowy wraz ze sterownikiem i układem pomiarowym [2].



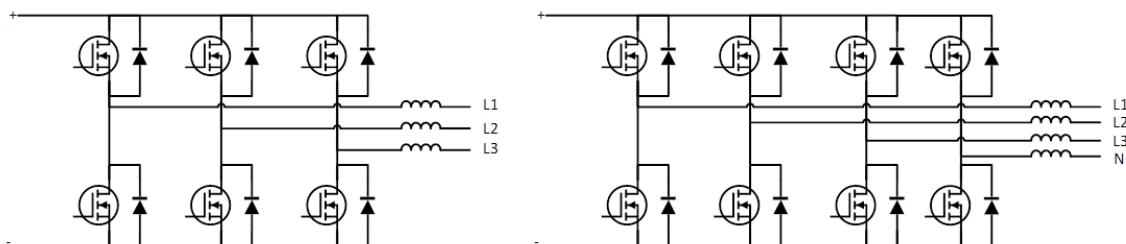
Rys. 1. Schemat blokowy układu zasilania z generatorem spalinowym i prądnicą indukcyjną.

Cechy funkcjonalne systemu zasilania:

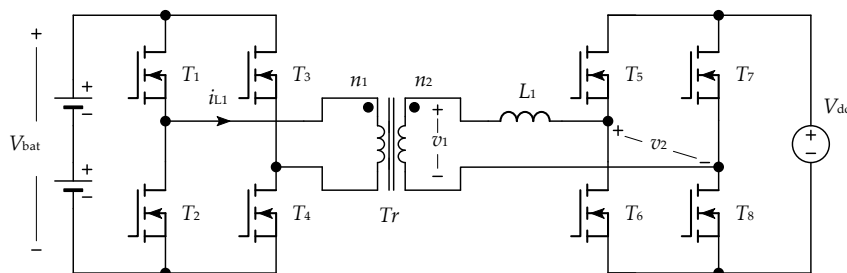
- w trybie on-grid i off-grid regulacja mocy w punkcie przyłączenia realizowana sterowaniem dawki mieszanki silnika spalinowego oraz mocą zasobnika energii elektrycznej i pośrednio prędkością obrotową maszyny indukcyjnej – punktem pracy silnika spalinowego;
- w trybie on-grid i off-grid prędkość obrotowa maszyny indukcyjnej może być zmieniana w zakresie dopuszczalnym (rekomendowanym sprawnością silnika spalinowego oraz parametrami maszyny indukcyjnej pracującej przy zmiennej częstotliwości), niezależna od stałej częstotliwości sieci zasilającej. Prędkość obrotowa maszyny indukcyjnej jest zadawana przez przekształtnik generatorowy. Sterowanie może odbywać się z zadawaniem momentu obrotowego (wówczas prędkość obrotowa jest sterowana przez regulator) lub zadawaniem prędkości obrotowej (wówczas generowany moment obrotowy sterowany jest przez regulator);
- możliwość zasilania odbiorów 3-fazowych niesymetrycznych.

Na rys. 2 pokazano schematy przekształtników generatorowego i sieciowego, a na rys. 3 – przekształtnika akumulatorowego. Zadaniem przekształtnika zasobnikowego jest:

- bilansowanie krótkotrwałe mocy w instalacji elektrycznej;
- zapewnienie energii do wzbudzenia prądnicy w trybie off-grid.



Rys. 2. Schematy przekształtników: po lewej – generatorowy, po prawej - sieciowy.



Rys. 3. Schematy przekształtnika akumulatorowego.

Bilansowanie mocy czynnej w trybie pracy off-grid

Wyposażenie mikroelektrowni μ EB w przekształtnik energoelektroniczny pozwala na pełne wykorzystanie własności tego źródła w trybie regulacyjno-bilansującym. Typowym rozwiązaniem dla mikroelektrowni μ EB jest zastosowanie taniej prądnicy indukcyjnej, wymagającej do wzbudzenia źródła mocy biernej, najczęściej sieci zasilającej. Wyposażając prądnicę indukcyjną w przekształtnik energoelektroniczny i akumulator uzyskuje się źródło z regulacją mocy czynnej i biernej oraz możliwością pracy w trybie off-grid. Zaznaczona na rys. 1 osłona OK(PME) odcina infrastrukturę techniczną na szynach zbiorczych przyłącza aby uwydatnić pełnią funkcję regulacyjno-bilansującą mikroelektrowni μ EB.

Podstawowy bilans mocy czynnej POK w osłonie kontrolnej można opisać równaniem:

$$P_{OK} = \sum_{i=0}^k P_{gi} - P_s - \sum_{i=0}^j P_{oi} - \sum_{i=0}^l P_{zi} = 0 \quad (1)$$

gdzie: P_{gi} – moc i -go źródła wewnątrz osłony kontrolnej ;

P_s – moc węzła wymiany – dla analizowanej osłony kontrolnej jest to jeden węzeł w punkcie styku z siecią elektroenergetyczną;

P_{oi} – moc i -go odbiornika;

P_{zi} – moc i -go zasobnika energii.

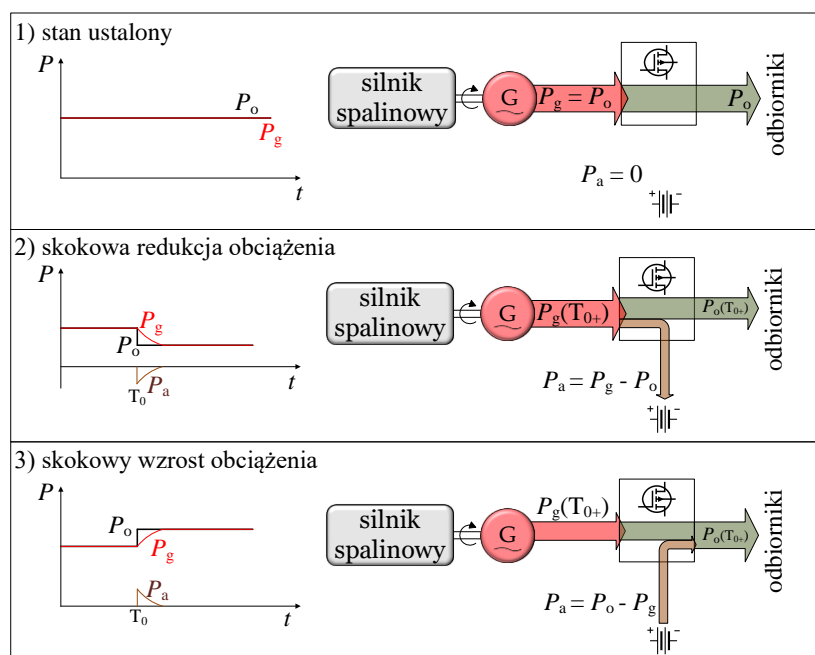
Dla osłony kontrolnej przyłączonej do węzła wymiany (tryb on-grid) bilans mocy wynosi:

$$\sum_{i=0}^k P_{gi} - \sum_{i=0}^j P_{oi} - \sum_{i=0}^l P_{zi} = P_s \quad (2)$$

Jak w każdym systemie elektroenergetycznym, w osłonie OK(PME) off-grid podaż mocy czynnej musi równoważyć popyt. Jest to podstawowe kryterium regulacji mocy czynnej w osłonie kontrolnej. Mianowicie, jest to dążenie do zbilansowania mocy bez przepływu energii elektrycznej przez węzeł wymiany ($P_s=0$):

$$\sum_{i=0}^j P_{oi} + \sum_{i=0}^l P_{zi} = \sum_{i=0}^k P_{gi} \quad (3)$$

Aby możliwe było szybkie bilansowanie mocy czynnej z wykorzystaniem mikroelektrowni μ EB, układ przekształtnikowy został wyposażony w akumulator. W czasie zmiany mocy obciążenia dodatkowa energia pobierana jest z akumulatora, lub oddawana do akumulatora. W celu regulacji mocy zespołu prądowłórczego sterownik ma do dyspozycji możliwość zmiany prędkości obrotowej prądnicy (co jednocześnie przekłada się na zmianę mocy) i zmianę nastawy dawki paliwa (zmiana położenia przepustnicy wpływa na zmianę momentu obrotowego). Na rys. 4 pokazano charakterystyczne stany pracy mikroelektrowni μ EB oraz przebiegi mocy czynnej: 1) stan ustalony; 2) stan skokowego obniżania mocy obciążenia; 3) stan skokowego zwiększania mocy obciążenia.

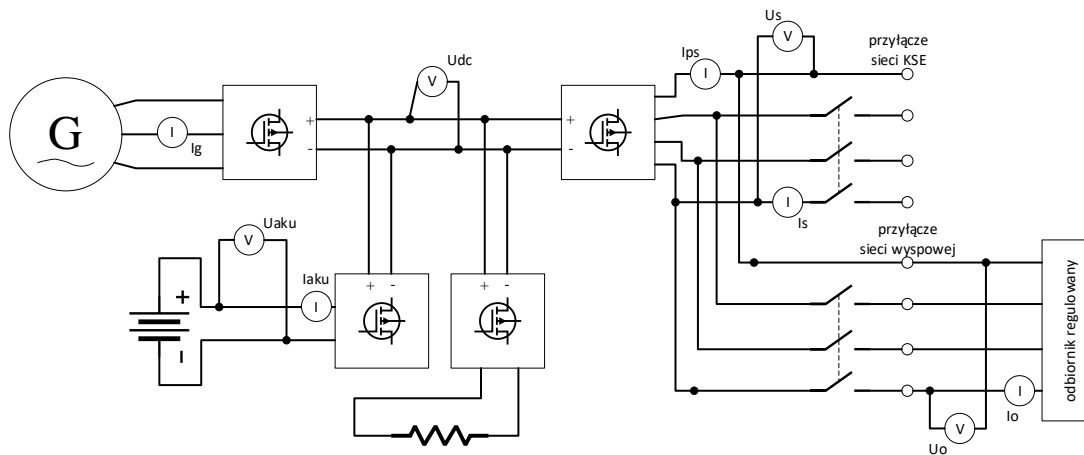


Rys. 4. Stany pracy układu zasilania. Od góry: 1) stan ustalony; 2) skokowe obniżenie mocy; 3) skokowe zwiększenie mocy.

Czas reakcji regulacji mocy zależy od: 1) dostępnej mocy akumulatora (a ta zależy od pojemności); 2) czasu reakcji napędu przepustnicy. Zmianę mocy napędowej silnika spalinowego można wymusić na dwa sposoby: 1) zmianę ilości doprowadzanej mieszanki paliwowo-powietrznej; 2) zmianę prędkości obrotowej. Możliwe (i pożądane) jest stosowanie obu metod jednocześnie w celu uzyskania możliwie dużej dynamiki regulacji mocy czynnej.

Badania prototypu układu zasilania

Zbudowany model układu przekształtnikowego poddano badaniom na stanowisku z prądnicą indukcyjną napędzaną ze zmienną prędkością obrotową oraz momentem obrotowym. Regulacja momentu obrotowego odbywała się przez symulację zmiany nastawy położenia przepustnicy, a prędkość obrotowa była stabilizowana przekształtnikiem generatorowym. Na rys. 5 pokazano schemat układu pomiarowego. Obciążenie w trybie off-grid stanowił zestaw 9 nagrzewnic o mocy 2 kW każda, z możliwością regulacji mocy skokowo co ok. 0,6 kW (rys. 6 – widok stanowiska badawczego).



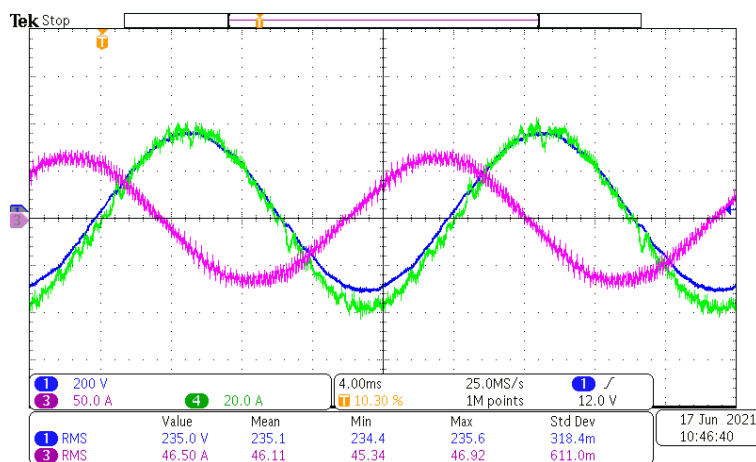
Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego.



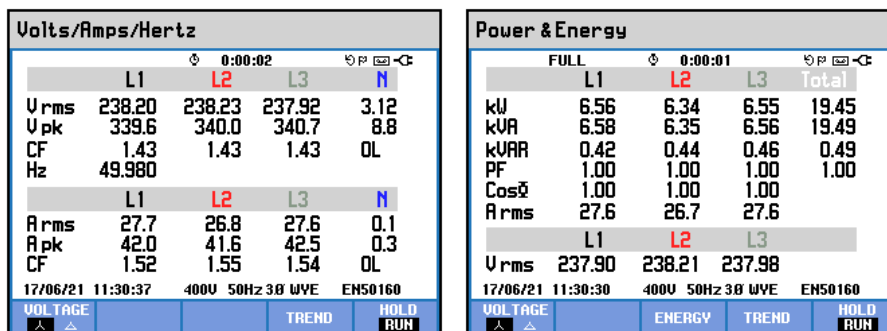
Rys. 6. Widok stanowiska badawczego.

Wyniki pomiarów w trybie on-grid

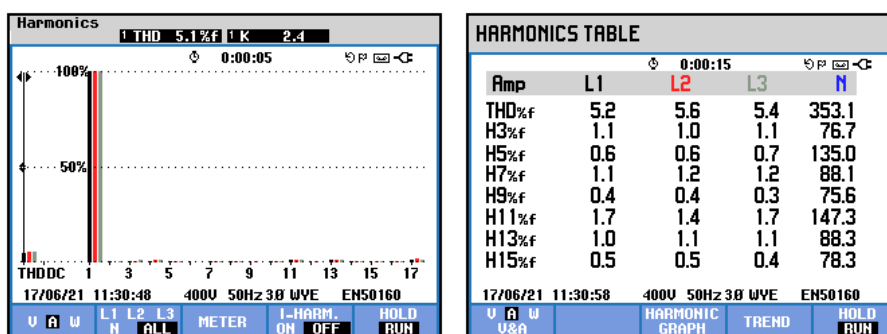
Pomiary przeprowadzono dla kilku wartości mocy obciążenia w stanie ustalonym. Poniżej zaprezentowano wyniki pomiarów dla mocy 20 kW. W trybie on-grid układ jest obciążony symetrycznie, a wartość mocy zadawana programowo.



Rys. 7. Przebiegi napięcia i prądu fazowego oraz prądu generatora. **1** 200 V - napięcie fazowe; **3** 50.0 A - prąd fazowy generatora; **4** 20.0 A - prąd fazowy



Rys. 8. Wartości napięć i prądów fazowych oraz mocy

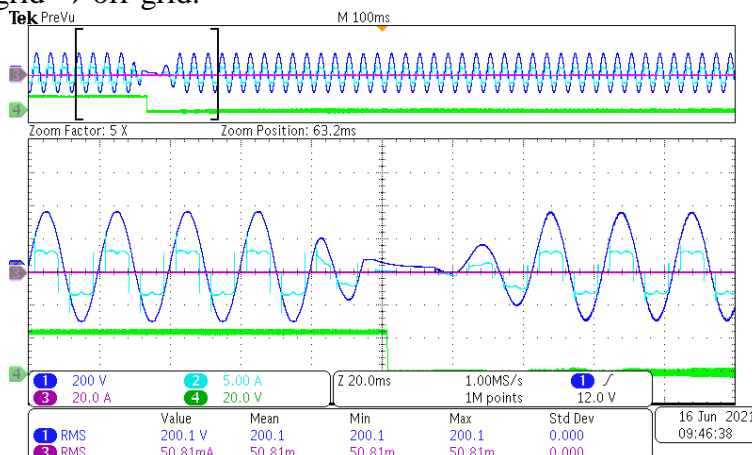


Rys. 9. Harmoniczne prądu

Wyniki pomiarów dla testu przełączania pomiędzy trybami pracy

Test przełączania pomiędzy trybami pracy polegał na wyłączeniu lub załączeniu stycznika sieciowego. Zarejestrowano przebiegi napięcia i prądu jednej fazy obciążenia oraz napięcie sterujące stycznikiem przełączającym. Ten ostatni parametr pozwala ocenić szybkość działania samego stycznika, który wpływa na czas fizycznego przełączenia pomiędzy trybami pracy. Biorąc pod uwagę czas wystawienia napięcia zasilającego stycznik po zaniku bądź pojawieniu się zasilania sieciowego, czas przełączania jest krótszy niż 20 ms. Odbudowa napięcia następuje w czasie ok. 40 ms.

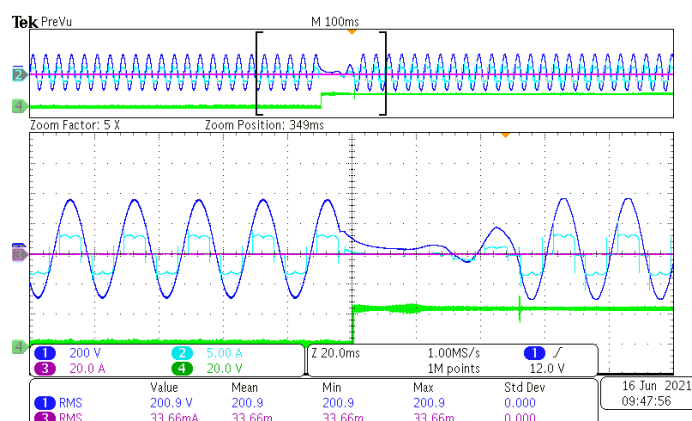
Przełączenie on-grid → off-grid:



Rys. 10. Przebiegi napięcia i prądu podczas przełączenia z sieci na wyspę.

1 200 V - napięcie fazowe; 2 5.00 A - prąd fazowy; 4 20.0 V - napięcie stycznika przełączającego

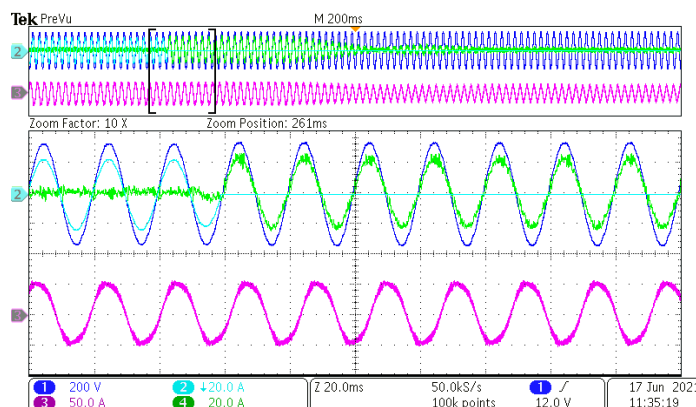
Przełączenie off-grid → on-grid:



Rys. 11. Przebiegi napięcia i prądu podczas przełączenia z sieci na wyspę

Wyniki pomiarów dla trybu on-grid i skokowej zmiany obciążenia

Badania miały na celu sprawdzenie możliwości regulacji mocy zespołu prądotwórczego podczas skokowej zmiany mocy obciążenia w trybie on-grid. Sterowanie odbywa się na podstawie sygnału z licznika energii elektrycznej zainstalowanego w punkcie przyłączenia do sieci. Takie sterowanie ma na celu ograniczanie mocy pobieranej z sieci elektroenergetycznej oraz sterowania mocą elektryczną w punkcie przyłączenia.



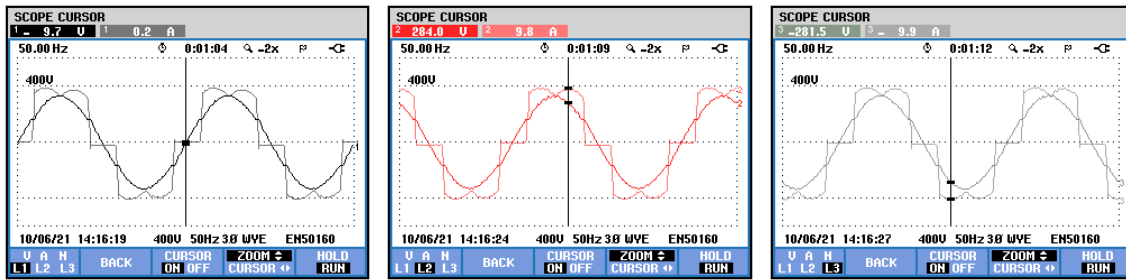
Rys. 12. Przebiegi napięcia i prądu podczas wyłączenia obciążenia 12 kW

1 200 V - napięcie fazowe zasilania; 2 +10.0 A - prąd fazowy obciążenia; 3 50.0 A - prąd fazowy generatora 4 20.0 A - prąd fazowy sieci

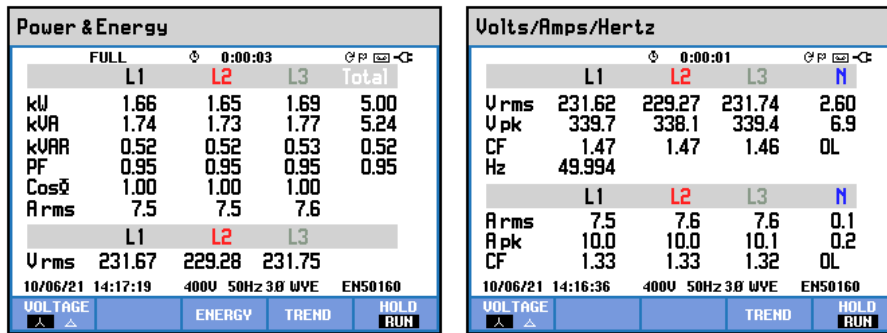
W trybie on-grid regulacja mocy odbywa się bez udziału akumulatora. Testy przeprowadzono przy zmianie momentu obrotowego generatora indukcyjnego (zmiana nastawy dawki paliwa w silniku spalinowym) i stałej prędkości obrotowej stabilizowanej przez przekształtnik generatorowy. Czas uzyskania nowego zadanego punktu pracy nie przekracza 2 s.

Wyniki pomiarów dla trybu off-grid – parametry jakościowe energii elektrycznej

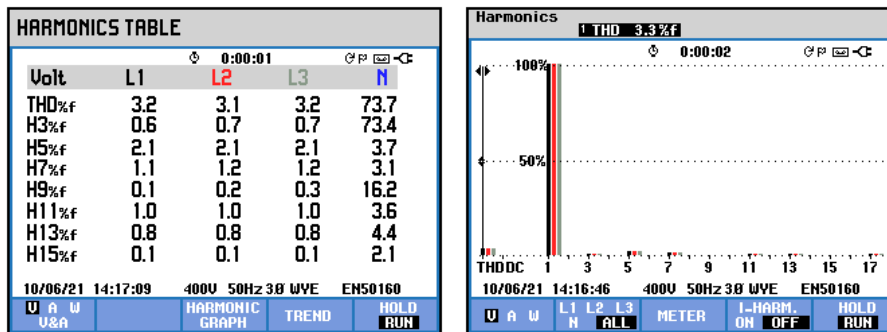
Wykonano pomiary parametrów jakościowych energii elektrycznej w stanie ustalonym mierząc napięcia i prądy fazowe obciążenia symetrycznego, asymetrycznego i nieliniowego. W każdym przypadku spełnione zostały założenia dotyczące parametrów jakościowych energii elektrycznej. Poniżej pokazano wyniki pomiarów dla obciążenia nieliniowego o mocy 5 kW, jakim był obciążony prostownik sześciopulsowy.



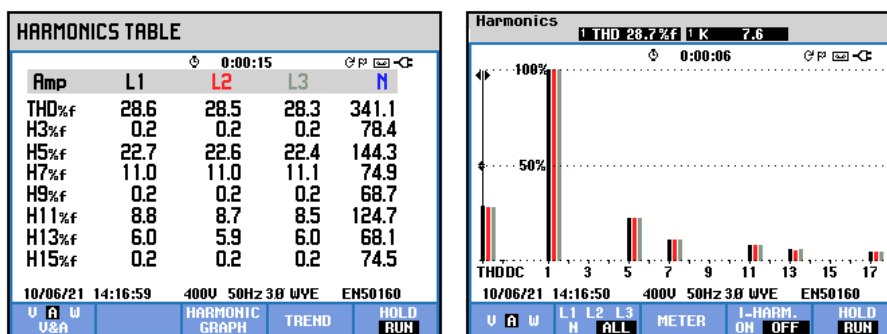
Rys. 13. Przebiegi napięć i prądów w poszczególnych fazach



Rys. 14. Wartości mocy obciążenia oraz napięć i prądów fazowych



Rys. 15. Harmoniczne napięcia

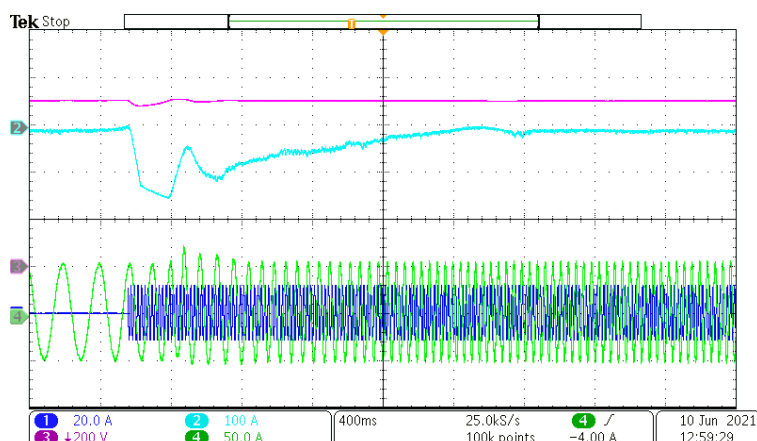


Rys. 16. Harmoniczne prądu

Wyniki pomiarów dla trybu off-grid – parametry dynamiczne

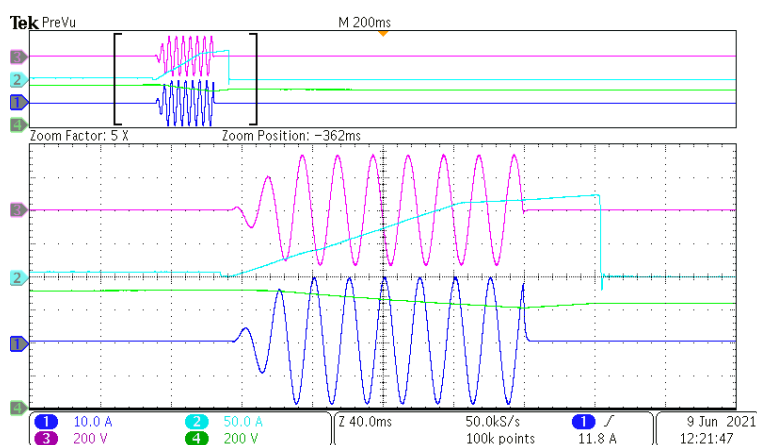
Przeprowadzone zostały testy w stanach nieustalonych podczas zmiany mocy obciążenia. Po każdej zmianie mocy obciążenia regulator prądu akumulatora wpływa na prędkość obrotową prądnicy celem zmiany mocy generowanej i jednocześnie ustalenia wartości zadanej prądu akumulatora (ok. 0 A). Na rys. 17 prędkość obrotową reprezentuje przebieg prądu generatora, na którym widoczna jest zmiana częstotliwości. Prowadzone testy pozwoliły na ustawienie

parametrów regulatora takich, aby czas ponownego ustalenia wartości zadanej prądu akumulatora wynosił ok. 2 s.



Rys. 17. Zarejestrowane przebiegi podczas testu załączenia obciążenia o mocy 5,5 kW: **1** 20.0 A - prąd odbiornika; **2** 100 A - prąd akumulatora; **3** 200 V - napięcie szyny DC; **4** 50.0 A - prąd generatora

Ograniczeniem maksymalnej zmiany mocy obciążenia jest maksymalny prąd akumulatora oraz czas narastania prądu akumulatora. Szczególnie dotyczy to wzrostu obciążenia, kiedy do czasu ustalenia nowego punktu pracy prądnicy energia elektryczna jest dostarczana z akumulatora. Na rys. 18 pokazano przebiegi prądów i napięć podczas załączenia obciążenia o mocy 8,5 kW.



Rys. 18. Przebiegi (skala przebiegu): **1** 10.0 A - prąd odbiornika; **2** 50.0 A - prąd akumulatora; **3** 200 V - napięcie odbiornika; **4** 200 V - napięcie szyny DC.

Przebieg prądu akumulatora składa się z dwóch prostych, nachylonych pod różnymi kątami. Pierwszy kąt zależy od indukcyjności obwodu transformatora przekształtnika DAB. Po ok. 120 ms zadziałał regulator ustalając rampę narastania prądu bezpieczną dla obwodu DC akumulatora, w celu zabezpieczenia przed przekroczeniem prądu maksymalnego. Po czasie ok. 160 ms prąd nie osiągnął jeszcze wartości maksymalnej (165 A), ale napięcie w obwodzie DC zmniejszyło się do ok. 600V i przekształtnik sieciowy odłączył obciążenie.

Czas narastania prądu akumulatora jest decydujący dla maksymalnej mocy uzyskiwanej z akumulatora, ponieważ w tym czasie obniża się wartość napięcia w obwodzie DC. Drugim czynnikiem jest napięcie akumulatora. Dla napięcia znamionowego 48 V (akumulator kwasowo-ołowiowy) napięcie podczas rozładowania może obniżyć się do 40 V. Natomiast napięcie końcowe ładowania wynosi ok. 56 V.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych potwierdziły uzyskanie wymaganych parametrów jakościowych energii elektrycznej w przyjętym zakresie. Szczególnie ważny jest czas przełączania pomiędzy trybami on-off grid, który nie przekracza 20 ms. Drugim istotnym parametrem jest wartość skokowej zmiany mocy obciążenia. Ograniczenie mocy podczas skokowej zmiany obciążenia wynika z chwilowego napięcia akumulatora oraz maksymalnego prądu rozładowania, a także z czasu narastania prądu w przekształtniku DAB. Czas narastania prądu wynika głównie z indukcyjności transformatora oraz indukcyjności pasożytniczych obwodu DC. Przekładnia transformatora została dobrana do napięcia znamionowego akumulatora, czyli 48 V, oraz napięcia obwodu DC (ok. 700 V) i wynosi 14. Aby zminimalizować czas narastania prądu konieczne było ograniczenie liczby zwojów. Przy małej liczbie zwojów uzwojenia pierwotnego zakres zmian przekładni jest stosunkowo duży. Zakres skokowej zmiany mocy, w zależności od napięcia na zaciskach akumulatora (40 – 48 V podczas rozładowania), wynosi 6,6 – 8 kW.

LITERATURA

1. PN – ISO 8528-5 Zespoły prądotwórcze. Zespoły prądotwórcze zasilane silnikiem tłokowym
2. Jurkiewicz A., Wereszczyński D., Fice Marcin: *Mikroelektrownia biogazowa (μEB) on-off grid z siecią terminali STD w systemie (WSE) przeznaczonym do testowania w sandboxie studium przypadku*. Energetyka, 2020 nr 7 (793), Katowice 2020
3. Gajowik T., Rafał K., Bobrowska-rafał M.: *Dwukierunkowy przekształtnik DC-DC w topologii trójfazowego podwójnego mostka aktywnego*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 90 nr 5/2014

Abstract. The article presents the results of the work carried out as part of the project of adapting a 20 kW combustion generator with an induction generator to work in on-grid and off-grid modes. The adaptation consisted in the use of a power electronic system between the generator to the power grid. The use of a low-capacity battery allowed for the stabilization of the quality parameters of voltage and frequency in the island network, regardless of the power generated by the generator in transient states. The power electronic system also enabled the operation of the induction generator with variable rotational speed and torque in order to adjust the generated power to the power of the receivers.

Badania dofinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2014-2020. Projekt nr RPOP.01.01.00-16-0017/18 „System dostosowujący biogazowy agregat spalinowy i prądnicę indukcyjną do regulacji mocy elektrycznej w układzie on-grid i off-grid”.

Mgr. inż. Andrzej Jurkiewicz
eGmina, Infrastruktura, Energetyka Sp. z o.o.
ul. Oświęcimska 102D lok. 5
45-641 Opole

Dr inż. Marcin Fice
Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki i Informatyki
ul. Akademicka 10
44-100 Gliwice

E-mail: a.jurkiewicz@egie.pl
marcin.fice@polsl.pl

MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF THE MAGNETIC GEAR WITH AXIAL FLUX

ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO W PRZEKŁADNI MAGNETYCZNEJ O STRUMIENIU OSIOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono zmodyfikowaną konstrukcję przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym. Opisano zasadę działania oraz wykonano obliczenia numeryczne dla wybranej konfiguracji przekładni o przełożeniu 5,5:1, dla której uzyskano gęstość przenoszonego momentu przekraczającą 35kNm/m^3 . W dalszej części pracy przeanalizowano rozkład pola magnetycznego w szczelinach powietrznych ze szczególnym uwzględnieniem składowej osiowej. Dla części obliczeń przeprowadzono również weryfikację pomiarową na prototypie przekładni zbudowanym przy zastosowaniu technologii druku 3D.

Słowa kluczowe: Przekładnia magnetyczna, metoda elementów skończonych, obliczenia numeryczne, moment magnetyczny, druk 3D.

Wstęp

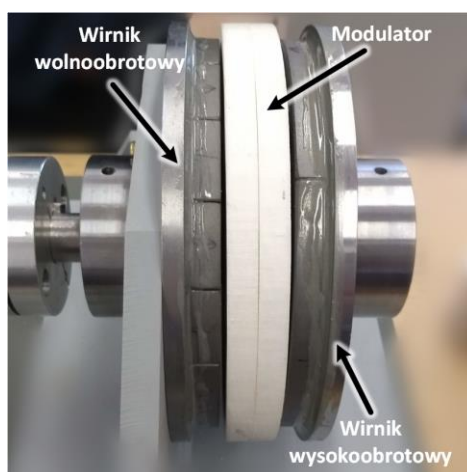
W układach napędowych w celu zmiany prędkości obrotowej oraz wartości momentu stosuje się przekładnie. W większości układów wykorzystuje się przekładnię mechaniczną, w której niekorzystnym zjawiskiem jest występowanie tarcia, do którego dochodzi przy bezpośrednim kontakcie pomiędzy współpracującymi elementami. Efektem tego zjawiska jest spadek sprawności przekładni, a tym samym wartości przenoszonego momentu. Dodatkowo, na skutek mechanicznego zazębienia się elementów przekładni, układ charakteryzuje się stosunkowo głośną pracą. Wymaga on także okresowych przeglądów oraz konserwacji. Alternatywą dla popularnych przekładni mechanicznych jest zastosowanie przekładni magnetycznej. Koncepcja przekładni magnetycznej powstała ponad sto lat temu. Pierwsza wzmianka dotycząca bezstykowej transformacji momentu obrotowego pojawiła się w patencie z 1901r [1, 7]. W przekładni magnetycznej możliwe jest zminimalizowanie lub całkowite wyeliminowanie wad przekładni mechanicznej. Poza tym, dodatkową jej zaletą jest naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem. Pierwsze badania na Politechnice Opolskiej zostały rozpoczęte w 2012 roku [3-7]. W wyniku prowadzonych prac powstały prototypy przekładni magnetycznej o strumieniu promieniowym. Autorzy, mając duże doświadczenia z promieniową przekładnią magnetyczną [4, 5, 6], postanowili przeprowadzić badania przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym o przełożeniu ułamkowym [2, 3, 8, 9]. Zastosowanie przełożenia ułamkowego jest związane z mniejszymi pulsacjami momentu, gdyż następuje kompensacja momentu zaczepowego [2, 3, 8]. Jednak brak symetrii obu maszyn komplikuje modele numeryczne, gdyż obliczenia należy prowadzić dla całego przetwornika.

W pracy przedstawiono budowę oraz zasadę działania zmodyfikowanej przekładni magnetycznej. Dla wybranej konstrukcji przekładni ze strumieniem osiowym, o przełożeniu 5,5:1, opracowano trójwymiarowy model dyskretny, dla którego wykonano szereg obliczeń polowych, a następnie szczegółową analizę składowych indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych. Za pomocą metody pracy wirtualnej wyznaczono charakterystyki momentu magnetycznego, który następnie zweryfikowano pomiarowo na prototypie przekładni.

Budowa przekładni

Omawiany przetwornik składa się z trzech podstawowych elementów tj. wirnika wolnoobrotowego i wysokoobrotowego, na których naklejone są magnesy trwałe oraz z wirnika pośredniczącego (modulatora) wykonanego w postaci trzpieni ferromagnetycznych (rys.1). Zaletą omawianej konstrukcji w porównaniu z tradycyjnymi przekładniami magnetycznymi jest zwiększenie powierzchni oddziałujących na siebie wirników, a co za tym idzie, uzyskuje się większą gęstość przeniesionego momentu [4, 5]. Specyficzna konstrukcja przekładni ze strumieniem osiowym utrudnia jednak zastosowanie pakietowania z uwagi na zapewnienie odpowiedniej sztywności tarcz wirników. Mając to na uwadze jarzma dla obydwu wirników wykonano z litej stali. Materiał użyty do pozycjonowania trzpieni modulatora powinien umożliwić zamykanie się pola magnetycznego pomiędzy sąsiednimi biegunami i być izolatorem pod względem elektrycznym. Dlatego w pracy do budowy klatki wykorzystano technologię wydruku 3D i tworzywo ABS. Dodatkową zaletą tej technologii jest możliwość szybkiego uzyskania żądanej geometrii, co skraca czas prototypowania.

Bieguny modulatora zostały wykonane z dielektromagnetyku Somaloy 700, który jest materiałem magnetycznie miękkim. Dielektromagnetyki dzięki swoim właściwościom znajdują coraz częstsze zastosowanie w maszynach elektrycznych i stanowią alternatywę do magnetowodów wykonanych z blach elektrotechnicznych [3, 10]. Pozostałe elementy konstrukcyjne centrujące wirniki oraz modulator, w związku z koniecznością eliminacji sprzężeń magnetycznych, wykonano ze stali kwasoodpornej, mosiądzu oraz ABSu.



Rys. 1. Konstrukcja przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym

Zasada działania przekładni magnetycznej oparta jest na modulacji pola magnetycznego magnesów trwałych z zastosowaniem biegunów ferromagnetycznych pierścienia pośredniczącego zwanego również modulującym. Liczbę biegunów pierścienia modulującego dobiera się tak, aby liczba par biegunów w przestrzeni harmonicznych rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej odpowiadała liczbie par biegunów wirnika z magnesami trwałymi. Przełożenie przekładni określa się na podstawie liczby par biegunów wirników z magnesami trwałymi, liczby biegunów modulatora oraz nieruchomego elementu przetwornika [4, 5, 6]. Na tej podstawie można wyznaczyć przełożenie przekładni magnetycznej (i_r), która dla opisywanej konstrukcji w przypadku nieruchomego pierścienia ferromagnetycznego wyraża się zależnością [6, 7]:

$$i_r = \frac{p_s - p_r}{p_r} \quad (1)$$

gdzie: p_r – liczba par biegunów wirnika z magnesami trwałymi; p_s – liczba nabiegunków pierścienia ferromagnetycznego;

W sytuacji, w której nieruchomy jest jeden z wirników z magnesami trwałymi, przełożenie przekładni określa się zależnością:

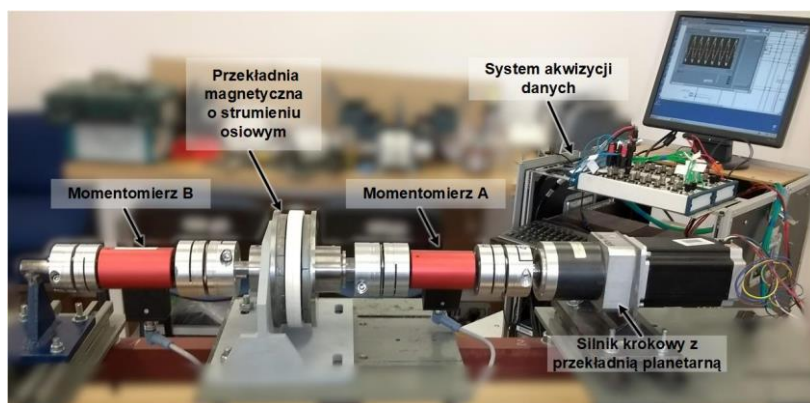
$$i_r = \frac{p_s}{p_r} \quad (2)$$

Równania (1) i (2) pokazują, że dla wybranego przełożenia przekładni, istnieje stosunkowo duża liczba kombinacji doboru par biegunów wirnika wewnętrznego, zewnętrznego oraz liczby biegunków ferromagnetycznych. Pewne ograniczenia wynikają głównie ze względów konstrukcyjnych i konieczności zapewnienia odpowiednich parametrów pracy przekładni [11,12].

Parametry konstrukcyjne i model dyskretny

Przekładnia magnetyczna, zilustrowana na rysunku 1, może pracować w dwóch trybach pracy. W sytuacji, w której napędzany jest wirnik wysokoobrotowy a wirnik pośredniczący (modulator) jest nieruchomy, wirnik wolnoobrotowy obraca się w przeciwnym kierunku do kierunku obrotu wirnika wysokoobrotowego. Natomiast w stanie pracy, w którym to nieruchomy jest wirnik wolnoobrotowy, wirnik pośredniczący obraca się zgodnie z kierunkiem obrotu wirnika wysokoobrotowego. Przełożenie przekładni, w pierwszym i drugim przypadku, nie jest takie same i jest ściśle określone liczbą par biegunów zarówno wirnika wolnoobrotowego, wysokoobrotowego oraz biegunów modulatora [4-7]. W prototypie omawianym w pracy, unieruchomiono wirnik wolnoobrotowy. Elementem napędzanym jest wirnik wysokoobrotowy a wyjście z przekładni stanowi wał połączony z modulatorem.

Wirnik pośredniczący jest newralgicznym elementem przekładni, ponieważ narażony jest na oddziaływanie znacznie większych sił w porównaniu do pozostałych elementów przekładni. Poza tym konstrukcja modulatora ma znaczący wpływ na moment jaki przenosi przekładnia [3, 7]. Prototyp przekładni magnetycznej, na stanowisku badawczym, umożliwiającym przeprowadzenie badań zmian momentu magnetycznego w funkcji obrotu wirnika wewnętrznego, przedstawiono na rysunku 2.

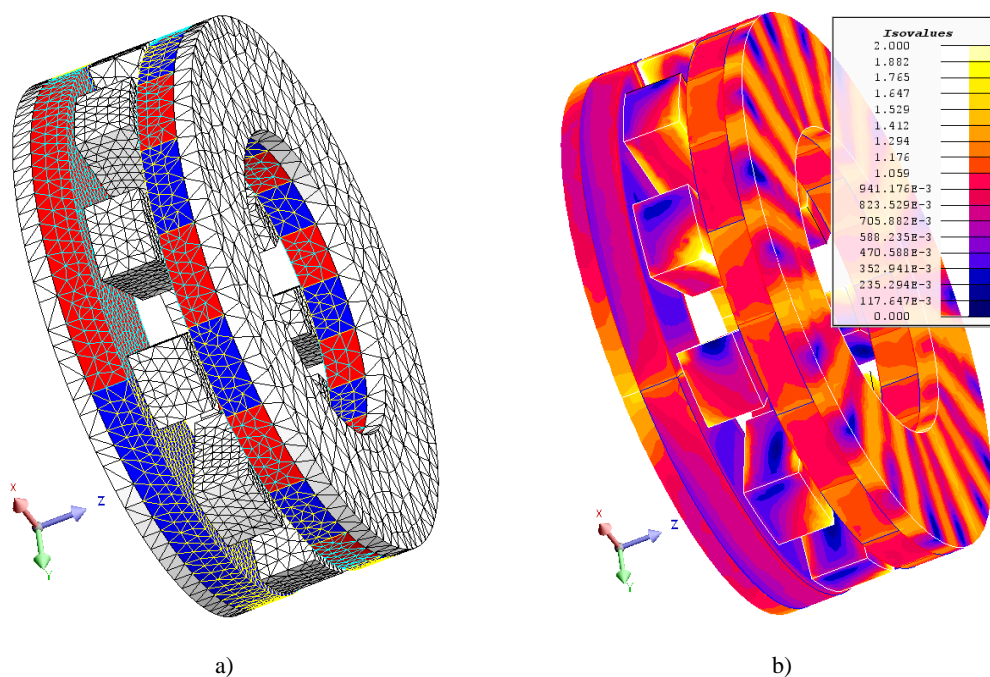


Rys. 2. Prototyp przekładni magnetycznej na stanowisku badawczym

Podstawowe parametry konstrukcyjne przetwornika zestawiono w tabeli 1. Biorąc pod uwagę wszystkie elementy konstrukcyjne przekładni, mające wpływ na zmianę drogi strumienia magnetycznego, analizowana konstrukcja wymaga zastosowania metody elementów skończonych w ujęciu trójwymiarowym. Uwzględnienie rzeczywistych wymiarów przetwornika powoduje również brak możliwości zastosowania warunków symetrii i periodyczności, a tym samym ograniczenia obszaru obliczeniowego. Trójwymiarowy model numeryczny wraz z siatką dyskretyzacyjną zilustrowano na rysunku 3a, zaś na rysunku 3b przedstawiono przykładowy rozkład indukcji magnetycznej w modelu przekładni.

Tabela 1. Parametry konstrukcyjne przekładni magnetycznej

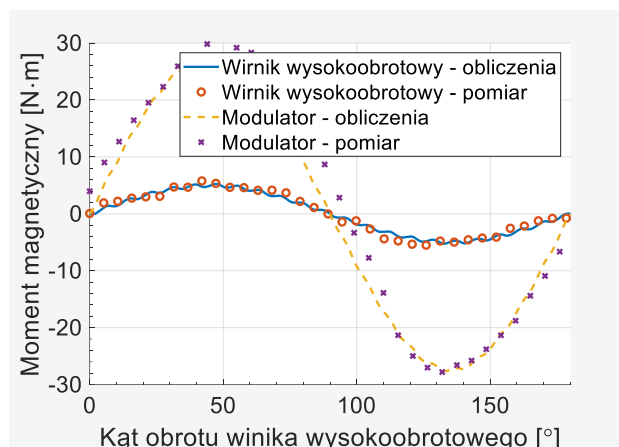
Średnica tarczy ferromagnetycznej	150 mm
Grubość tarczy ferromagnetycznej	5 mm
Średnica zewnętrzna magnesów	140 mm
Średnica wewnętrzna magnesów	80 mm
Grubość magnesu trwałego	10 mm
Średnica zewnętrzna trzpieni modulatora	140 mm
Średnica wewnętrzna trzpieni modulatora	80 mm
Grubość trzpieni modulatora	15 mm
Przełożenie i_r	5,5:1
Indukcja B_r	1,18 T
Natężenie H_c	900 kA/m
Grubość szczelin powietrznych	2,5 mm
Liczba biegunów wirnika wolnoobrotowego	4
Liczba biegunów wirnika szybkoobrotowego	18
Liczba trzpieni wirnika pośredniczącego (modulatora)	11



Rys. 3. Model dyskretny przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym - a), rozkład indukcji magnetycznej - b)

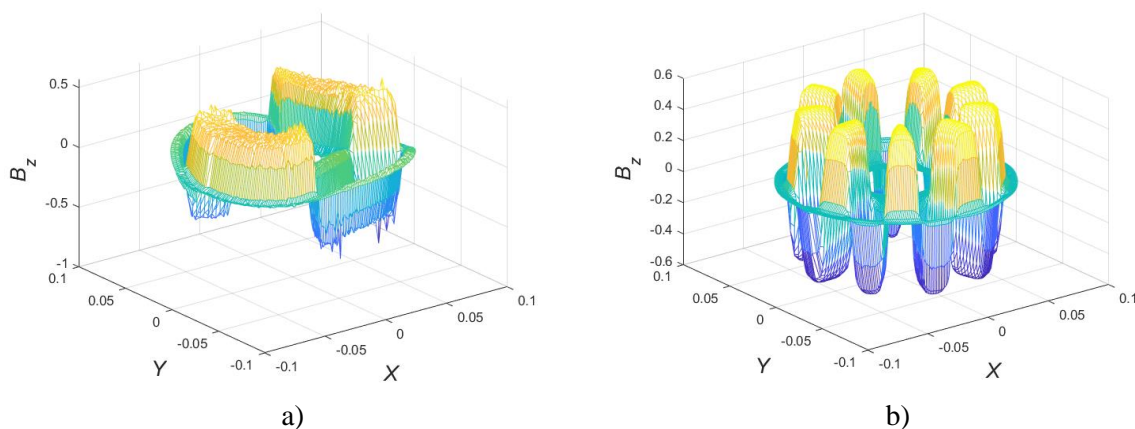
Wyniki badań

W pierwszym etapie badań, w celu weryfikacji modelu polowego, wykonano obliczenia statyczne momentu magnetycznego. Obliczenia te zostały zweryfikowane na prototypie. Punktem bazowym w modelach polowych jest położenie kątowe, w którym moment magnetyczny równy jest zero. W celu wyznaczenia momentu sił działających na przekładnię magnetyczną z analizowanym modulatorem przeprowadzono obliczenia wykorzystujące metodę elementów skończonych oraz dokonano pomiarów na rzeczywistym obiekcie. Otrzymane wyniki zostały przedstawione na rysunku 4.



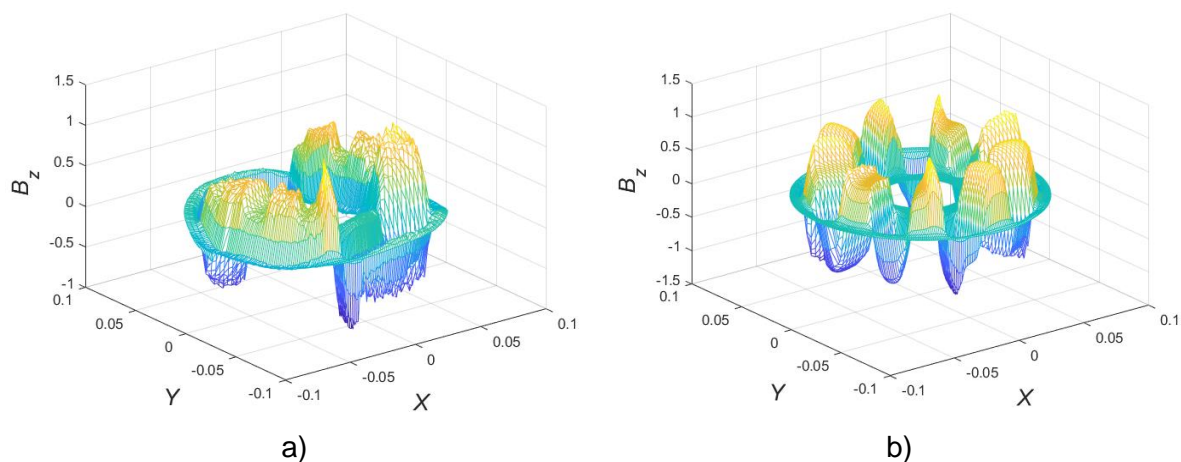
Rys. 4. Kątowa zmienność momentu magnetycznego działającego na wirnik wewnętrzny i zewnętrzny

Zasada działania przekładni o strumieniu osiowym jest taka sama jak w jej promieniowym odpowiedniku. W literaturze stosunkowo często można napotkać na obwodowe rozkłady składowych promieniowej i stycznej indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych dla rozwiązania promieniowego. Analiza taka zazwyczaj składa się z dwóch kroków. W pierwszej kolejności porównuje się składowe wektora indukcji oraz ich widma w przestrzeni harmonicznych od obydwu wirników bez obecności modulatora, a następnie z modulatorem [7]. Jednak stosunkowo niewiele miejsca poświęca się analizie pola składowych indukcji magnetycznej w przekładniach o konstrukcji osiowej. Jednym z powodów jest pewna trudność w wizualizacji poszczególnych komponentów indukcji w szczelinach powietrznych, z racji konieczności uwzględnienia przestrzennego charakteru pola. Dodatkowo kluczową rolę w tej analizie odgrywa pomijalny w strukturach promieniowych komponent osiowy indukcji (B_z). W oparciu o opracowany model polowy przeprowadzono szereg obliczeń numerycznych, obrazujących istotę modulacji pola wirników przez pierścień modujący w odniesieniu do komponentu B_z indukcji magnetycznej. Na rysunku 5 przedstawiono obwodowy rozkład składowej osiowej indukcji magnetycznej w sąsiadujących z poszczególnymi wirnikami szczelinach powietrznych, przy wirniku wolnoobrotowym (rys. 5a) i wysokoobrotowym (rys. 5b), bez obecności pierścienia modującego. Obrazy pola w takim przypadku są niezaburzone i ściśle skorelowane z liczbą par biegunów obu wirników.



Rys. 5. Składowe osiowe indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych przy braku modulatora, a) B_z w szczelinie sąsiadującej z wirnikiem wysokoobrotowym (źródło pola - wirnik wysokoobrotowy), b) B_z w szczelinie sąsiadującej z wirnikiem wolnoobrotowym (źródło pola - wirnik wolnoobrotowy),

Bez modulatora przekładnia nie może działać. Jego obecność wprowadza jednak znaczne zaburzenia w obrazie pola w szczelinie. W niniejszej pracy autorzy pomijają składowe promieniową i styczną B_r i B_t , jednak również one podlegają zaburzeniu. Konsekwencje (w odniesieniu do składowej B_z) wprowadzenia do sąsiedztwa wirników pierścienia pośredniczącego są widoczne na rysunku 6. Największa intensywność pola magnetycznego dotyczy bezpośredniego sąsiedztwa biegunów i modulatora. Pole magnetyczne praktycznie nie ulega dużemu rozproszeniu.

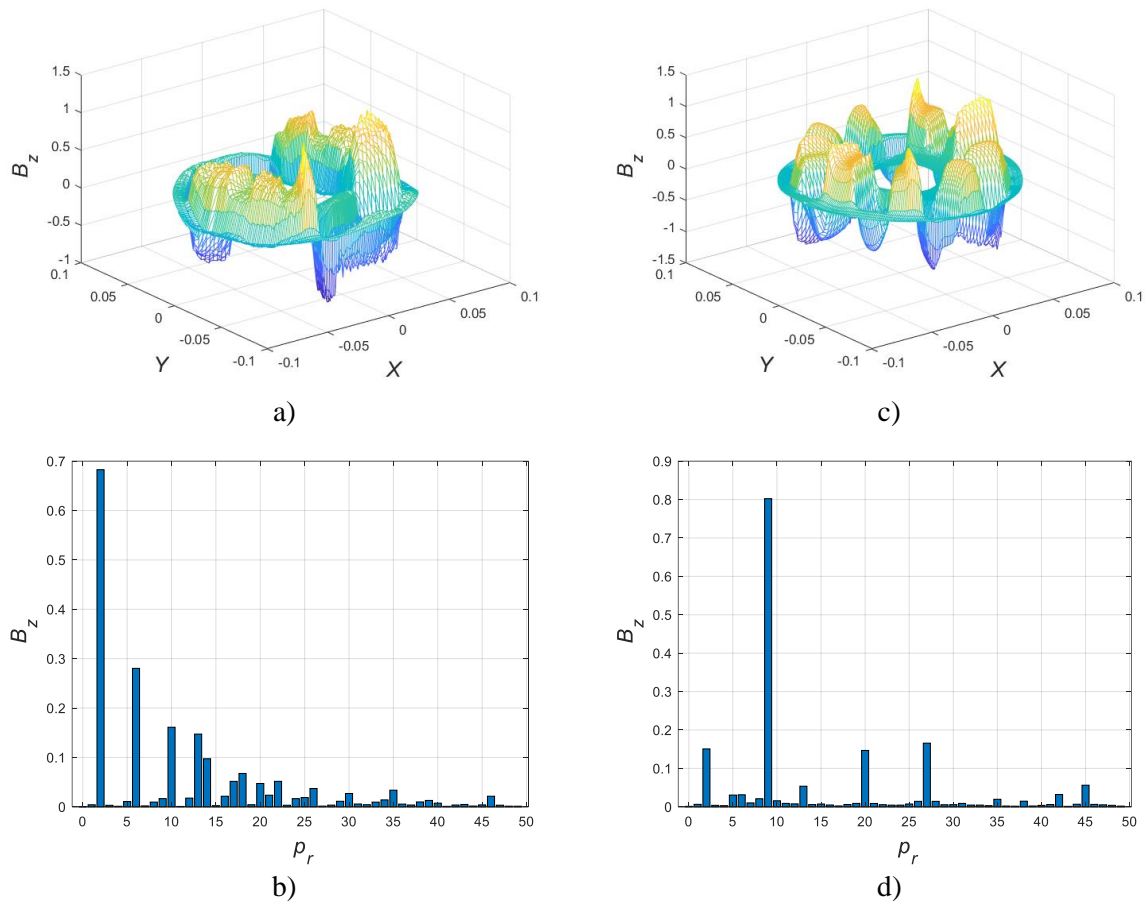


Rys. 6. Składowe osiowe indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych przy obecności modulatora, a) B_z w szczelinie sąsiadującej z wirnikiem wysokoobrotowym (źródło pola - wirnik wysokoobrotowy), b) B_z w szczelinie sąsiadującej z wirnikiem wolnoobrotowym (źródło pola - wirnik wolnoobrotowy),

Analizując model kompletnej przekładni niezbędne staje się również zastosowanie analizy widma celem pokazania istotnych harmonicznych. Otrzymane rozkłady składowej osiowej indukcji magnetycznej w szczelinach są dodatkowo uzależnione od punktu pracy przekładni. Pole magnetyczne jak w każdej maszynie synchronicznej podlega deformacji zależnej od obciążenia, w stanie jałowym deformacja ta jest najmniejsza, stąd też wykresy pokazane na rysunku 7a i 7c są bardzo podobne do tych na rysunku 6. Kluczowym narzędziem jest w tym przypadku analiza harmonicznych, uwidacznia ona dominujący charakter składowej osiowej dla 2 i 9 par biegunów. Pełna analiza wymaga jednak również szerszego spojrzenia na składową promieniową oraz styczną – odpowiedzialną za przenoszenie momentu. Z uwagi na ograniczoną objętość pracy i silną zależność od punktu pracy autorzy nie zamieszczają tych charakterystyk w niniejszej pracy.

Mając na uwadze brak symetrii maszyny, interesującym zagadnieniem jest analiza oddziaływań w obrębie modulatora. Skutki niesymetrii magnetycznej i naciągów zazwyczaj uzewnętrzniają się poprzez drgania i hałas. Kluczową rolę w tym zakresie odgrywają siły lokalne, siła promieniowa oraz osiowa. Analiza oddziaływań lokalnych jest jednak złożona, czasochłonna i wymaga dokładnego opisu geometrycznego elementów – rdzenia modulatora, obliczeń lokalnych a następnie ich syntezy. Rozpatrując w ujęciu całościowym zbalansowaną przekładnię magnetyczną, składowa promieniowa siły działająca na wirniki i modulator nie występuje. Rozpatrywany prototyp z racji niecałkowitego przełożenia charakteryzuje jednak występowanie naciągu promieniowego, dodatkowo zależnego również od obciążenia. Naciąg w kierunku osiowym rośnie bardzo szybko wraz ze wzrostem obciążenia. Dla maksymalnego obciążenia wartość składowej osiowej siły naciągu wzrasta prawie 10 krotnie. Duże wartości naciągów osiowych potwierdzają konieczność zachowania ostrożności przy prototypowaniu i używaniu materiałów konstrukcyjnych o odpowiedniej sztywności. Z punktu widzenia konstruktora istotną rolę odgrywa również wspomniana wyżej szczegółowa analiza oddziaływań lokalnych. Siły działające na poszczególne rdzenie modulatora są znacznie wyższe niż

te wyznaczone w analizie globalnej. Znacznie szersze ujęcie tego zagadnienia zostało przedstawione w pracy [3].



Rys. 7. Składowe osiowe B_z indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych oraz harmoniczne dla całej przekładni w stanie jałowym a-b) w szczelinie sąsiadującej z wirnikiem wysokoobrotowym c-d) w szczelinie sąsiadującej z wirnikiem wolnoobrotowym

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zmodyfikowaną konstrukcję przekładni magnetycznej ze strumieniem osiowym, umożliwiającą z racji zastosowania stosunkowo szerokich szczelin powietrznych, znaczne zwiększenie transmisji momentu obrotowego. Opisano zasadę działania oraz wykonano obliczenia dla wybranej konfiguracji przekładni o przełożeniu 5,5:1, dla której uzyskano gęstość przenoszonego momentu przekraczającą 35kNm/m^3 . Zaprezentowany w pracy przetwornik jest pierwszym wykonanym przez autorów prototypem takiej przekładni. Przedstawione wyniki analiz obrazują zasadę działania przekładni, złożoność pola magnetycznego w szczelinach powietrznych samych wirników, wirników wraz z modulatorem i wreszcie całej przekładni. Autorzy skoncentrowali się jedynie na składowej osiowej indukcji z racji charakterystycznej budowy rozpatrywanej przekładni magnetycznej. Pełna analiza wymaga oceny wszystkich składowych oraz uwzględnienia punktu pracy przetwornika. Zastosowanie odpowiednich, sztywniejszych materiałów konstrukcyjnych wraz z redukcją szerokości szczelin powietrznych spowoduje znaczący wzrost gęstości momentu obrotowego. W pracy przedstawiono również możliwość wykorzystania technologii druku 3D w układach napędowych ze względu na dobre parametry materiału oraz szybkość wykonywania prototypów.

Literatura

1. Atallah K., Howe D., *A novel high-performance magnetic gear*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, Issue.4 Part. 1, 2001.
2. Gardner M. C., Johnson M., and Toliyat H. A.: *Comparison of surface permanent magnet axial and radial flux coaxial magnetic gears*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 4, pp. 2250–2259, Dec. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2865200.
3. Kołodziej J., Kowol M., Mynarek P., Gabor R., and Łukaniszyn M.: *Forces in Axial Flux Magnetic Gears with Integer and Fractional Gear Ratios*, Energies 2021, Vol. 14, vol. 14, no. 4, p. 855, Feb. 2021, doi: 10.3390/EN14040855.
4. Kowol M., Łukaniszyn M.: *Budowa i zasada działania przekładni magnetycznej*, Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki, WZEE, Ustroń, 27-29 września 2012.
5. Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M.: *An analysis of the magnetic gear performance*, Technical Transactions, Electrical Engineering, Issue 1-E(8), 2015.
6. Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M.: *Analiza pola magnetycznego w przekładni magnetycznej*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 100/3/2013, Komel, 2013.
7. Kowol M.: *Przetwarzanie energii mechanicznej we współosiowej przekładni magnetycznej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2021.
8. Niguchi N., Hirata K.: *Cogging Torque Analysis of Magnetic Gear*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, pp. 2189-2197, 2012.
9. Tlali P. M., Wang R., Gerber S.: *Magnetic gear technologies: a review*, International Conference on Electrical Machines, 2014, pp. 544-550.
10. Wrobel, R.; Mecrow, B.: *Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines – A Review*, 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Athens, Greece, 2019, pp. 15-22

Abstract. This paper presents the construction and operation principle of the modified magnetic gear with coaxial flux. For the presented gear construction (with gear ratio 5,5:1) a series of calculations was carried out using three-dimensional numerical field model. On the base of field calculations, an analysis of the distribution of the axial component of the magnetic flux density in the air gaps were performed. The magnetic torque characteristics were calculated using the Virtual Work Method. The results of computer simulations are verified with measurements on the physical prototype. The paper presents also the possibility of using 3D printing technology and its benefits to build a magnetic gear.

Dr inż. Janusz Kołodziej,
Dr inż. Rafał Gabor,
Dr hab. inż. Marcin Kowol,
Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Instytut Systemów Napędowych i Robotyki
ul. Próżkowska 7645-758 Opole

E-mail: ja.kolodziej@po.edu.pl
rafal.gabor@po.edu.pl,
m.kowol@po.edu.pl
m.lukaniszyn@po.edu.pl