

KOMAG

Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Sprawiedliwa Transformacja Terenów Pogórniczych

ISBN 978-83-65593-29-0

Monografia zbiorowa

KOMTECH

Międzynarodowa Konferncja Naukowo-Techniczna Sprawiedliwa Transformacja Terenów Pogórniczych

Gliwice, 2022



Redakcja naukowa:

dr hab. inż. Dariusz Prostański, prof. ITG KOMAG dr inż. Bartosz Polnik dr inż. Dariusz Michalak

Recenzenci (w kolejności alfabetycznej): dr Artur Godyń dr inż. Dariusz Jasiulek dr inż. Paweł Kamiński dr inż. Daniel Kowol

dr inż. Wojciech Kraszewski dr hab. Joanna Kulczycka, prof. instytutu dr hab. inż. Mirosław Majkut, prof. PŚl prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński dr inż. Piotr Olczak dr inż Łukasz Orzech dr hab. inż. Paweł Pijarski, prof. uczelni dr inż. Kamil Szewerda dr hab. inż. Stanisław Szweda, prof. ITG KOMAG dr Anna Śliwińska dr hab. inż. Jarosław Tokarczyk, prof. ITG KOMAG dr hab. Gabriela Woźniak, prof. UŚ

Redaktorzy techniczni:

mgr inż. Marzena Pabian-Macina mgr inż. Bogna Kolasińska

Wydawca:

Instytut Techniki Górniczej KOMAG ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

Copyright by Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Monografia opublikowana na licencji <u>Creative Commons Uznanie autorstwa -</u> <u>- Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe</u> (CC BY-NC 4.0)



WPROWADZENIE

Szanowni Państwo,

Zmieniający się świat i podejście do nowych źródeł energii w dużej mierze powiązane ze zmniejszaniem śladu węglowego jest obecnie jedną z żywiej poruszanych tematyk obecnych forów energetycznych i klimatycznych. Tematyka ta, oprócz zagadnień górniczych, jest poruszana również w ramach niniejszej monografii z cyklu KOMTECH, w której mamy przyjemność zaprezentować niektóre z prac.

Tematyka monografii KOMTECH ma zwyczajowo inżynierski charakter i przedstawia wyniki ciekawszych prac realizowanych przez zespoły naukowców i projektantów.

Jednym z zagadnień, które można znaleźć na początku monografii to technologia produkcji kompozytowego paliwa formowanego EKomPell, która zakłada wykorzystanie odpadów kopalnianych jako surowców i jest jednym z nowatorskich podejść do niskoemisyjnych źródeł energii. Pellety otrzymane na bazie opracowanej receptury charakteryzują się dobrą wytrzymałością na ścieranie, niską zawartością wilgoci, popiołu i siarki całkowitej oraz wartością opałową ok. 30 MJ/kg. W pracy przedstawiono ogólny schemat instalacji wraz z opisem koncepcji technologii EKomPell, która wpisuje się w działania Polski i UE jako technologia ogrzewania indywidualnego, zmniejszająca zanieczyszczenie powietrza. Eliminuje spalanie paliw niskiej jakości oraz stosowanie nieefektywnych energetycznie i ekologicznie kotłów grzewczych, co stanowi kluczowy element "circular carbon economy".

Sprawne zarzadzanie energią odnawialną wymaga zastosowania magazynów energii. Jedną z ciekawszych koncepcji, jest przydomowy, wolnoobrotowy kinetyczny magazyn energii. Przeznaczony jest do przydomowych, odnawialnych źródeł energii, jak np. fotowoltaika. W rozdziale przedstawiono wstępne obliczenia w zakresie efektywnego zakresu obrotów oraz doboru masy wirującej. Zaproponowano również postać konstrukcyjną rozwiązania.

Od produkcji komponentów przemysłowych wymagane jest w coraz większym stopniu zmniejszanie śladu węglowego. Autorzy jednego z rozdziałów przeprowadzili przegląd literatury w zakresie programu badań dotyczącego analizy śladu węglowego magnesów neodymowych przeznaczonych do generatorów turbin wiatrowych. Prace te mają na celu ograniczenie emisji CO₂ przy produkcji komponentów odnawialnych, zeroemisyjnych źródeł energii.

Ekologiczne podejście do procesów przemysłowych jest związane również z ograniczaniem emisji szkodliwych substancji oraz innych zanieczyszczeń do środowiska. Taką technologią jest czyszczenie maszyn i urządzeń, szczególnie elektrycznych, z wykorzystaniem suchego lodu i sprężonego powietrza. Technologia ta ma nie tylko walory ekologiczne, ale również znacząco poprawia bezpieczeństwo pracy i efektywność wykonywania czynności serwisowych.

Również optymalizacja pracy maszyn i urządzeń wpływa na ekologiczny wymiar ich stosowania. Jednym z takich sposobów jest wykorzystanie przemienników częstotliwości do sterowania pracą maszyn. Ma to szczególne znaczenie przy dużych konstrukcjach, takich jak wielkogabarytowe maszyny stosowane w górnictwie odkrywkowym. W pracy przedstawiono ciekawą koncepcję oprogramowania narzędziowego do sterowania przemiennikami częstotliwości tego typu maszyn.

Nieco inny charakter prac, aczkolwiek również z dużą dbałością o środowisko, ma rozdział poświęcony dezintegracji roślinności na torowiskach linii kolejowych. Rozwiązanie to pokazuje, że czyszczenie torowisk może być realizowane w sposób zgodny z kanonami zrównoważonego podejścia do środowiska. Autorzy proponują wykorzystanie pełnej automatyzacji tego procesu poprzez



zastosowanie opryskiwania dwoma bioherbicydami oraz gorącą wodą, w oparciu o sygnały z układu detekcji i analizy obrazu. Energia w tym rozwiązaniu ma być pozyskiwana z magazynu energii (doładowywanej z instalacji fotowoltaicznej) współpracującego z agregatem prądotwórczym zabudowanych na zestawie do dezintegracji.

Ciekawa tematyka została przedstawiona w rozdziale opisującym analizę porównawczą pomiarów przyrostów naprężeń eksploatacyjnych ramy kabiny maszyny wyciągowej w kopalni Wieliczka w odniesieniu do modeli MES. Dzięki tym obliczeniom potwierdzono wystarczającą sztywność kabiny, w której określono występujące w niej naprężenia jako pomijalne.

Oddając w Państwa ręce niniejsze opracowanie składamy podziękowania autorom i recenzentom, mając nadzieję, że pogłębi ona doświadczenia i poszerzy spojrzenie inżynierskie czytelników zainteresowanych innowacjami technicznymi. Nowatorskie rozwiązania techniczne są nieodłącznym elementem zmieniającego się świata, poprawiając funkcjonowanie społeczeństwa w bardziej ekologicznym wymiarze.

dr hab. inż. Dariusz Prostański, prof. ITG KOMAG dr inż. Bartosz Polnik dr inż. Dariusz Michalak Redaktorzy naukowi monografii



SPIS TREŚCI

1.	Kompozytowe paliwa węglowe jako element "circular carbon economy" – A. Czardybon, K. Ignasiak, J. Bigda, P. Fudała
2.	Znaczenie badań i certyfikacji jednostek wytwórczych w ITG KOMAG dla zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii – A. Figiel, A. Niedworok, M. Talarek
3.	Przydomowy wolnoobrotowy kinetyczny magazyn energii – propozycja rozwiązania – S. Janas
4.	Badania laboratoryjne mieszalnika systemu UCT – P. Dobrzaniecki, A. Tarkowski, M. Kalita, T. Sinka, P. Chondrokostas, B. Janik, M. Obrębski
5.	Przegląd literatury pod kątem przyszłego programu badań dotyczącego analizy śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych – <i>R. Baron, P. Matusiak, A. Lutyński, M. Lutyński</i>
6.	Koncepcja systemu do ograniczania roślinności na liniach kolejowych – D. Bałaga, M. Kalita, M. Siegmund, M. Woszczyński, W. Świeca
7.	Koncepcja zastosowania oprogramowania narzędziowego przemienników częstotliwości w celu analizy i poprawy pracy zespołów napędowych maszyn górnictwa odkrywkowego – <i>M. Jabłoński, P. Borkowski</i>
8.	Analiza porównawcza wyników pomiarów przyrostów naprężeń eksploatacyjnych w odniesieniu do modeli MES na przykładzie ramy kabiny – A. Konewecki, K. Rozwadowski, S. Molski, R. Pasek

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.1

Kompozytowe paliwa węglowe jako element "circular carbon economy"

Agata Czardybon - Instytut Technologii Paliw i Energii Karina Ignasiak - Instytut Technologii Paliw i Energii Joanna Bigda - Instytut Technologii Paliw i Energii Piotr Fudała - JSW Nowe Projekty S.A.

Streszczenie: Opracowano technologię produkcji kompozytowego paliwa formowanego EKomPell, która zakłada wykorzystanie jako surowców odpadów kopalnianych. Pellety otrzymane na bazie opracowanej receptury charakteryzują się dobrą wytrzymałością na ścieranie ($D_u \ge 87$) oraz zawartością wilgoci $\le 1,6\%$ wag., popiołu $\le 5,4\%$ wag., siarki całkowitej $\le 0,43\%$ wag. i wartością opałową ok. 30 MJ/kg. Przedstawiono ogólny schemat wraz z opisem koncepcji technologii EKomPell. Technologia wytwarzania paliwa EKomPell dla ogrzewnictwa indywidualnego wpisuje się w działania Polski i UE zmierzające w kierunku poprawy jakości powietrza poprzez wyeliminowanie spalania paliw niskiej jakości oraz nieefektywnych energetycznie i ekologicznie kotłów grzewczych, co stanowi kluczowy element "circular carbon economy".

Słowa kluczowe: circular carbon economy, paliwa kompozytowe, pellety, flotokoncentrat węglowy

Composite carbon fuels as an element of the "circular carbon economy"

Abstract: A technology for the production of EKomPell composite formed fuel has been developed. It involves the use of mine wastes as raw materials. The pellets obtained from the developed recipe are characterised by good abrasion resistance ($D_u \ge 87$) and moisture content ≤ 1.6 wt%, ash content ≤ 5.4 wt%, total sulphur content ≤ 0.43 wt% and a calorific value of approx. 30 MJ/kg. A general scheme with a description of the EKomPell technology concept is presented along. The EKomPell fuel production technology for individual heating, is in line with the activities of Poland and the EU aimed at improving air quality by eliminating the combustion of low-quality fuels and energy-inefficient and ecologically-inefficient heating boilers, which is a key element of the "circular carbon economy".

Keywords: circular carbon economy, composite fuels, pellets, coal flotation concentrate

1. Wprowadzenie

Obecnie jednym z priorytetów polityki UE i Komisji Europejskiej (KE) jest przejście z gospodarki liniowej (wyprodukuj – zużyj – wyrzuć) na gospodarkę obiegu zamkniętego (GOZ), co przyczyni się do osiągnięcia neuralności klimatycznej UE do 2050 r. W tym celu KE zaproponowała w marcu 2020 r. pierwszy pakiet środków dla przyspieszenia przejścia gospodarki unijnej na obieg zamknięty.

Według KE "w gospodarce o obiegu zamkniętym wartość produktów i materiałów jest utrzymywana tak długo, jak to możliwe. Odpady i zużycie zasobów są zminimalizowane, a gdy produkt osiąga koniec swojego życia, jest ponownie używany do tworzenia dalszej wartości" [1]. Przejście z linearnej na cyrkularną gospodarkę może przynieść duże korzyści gospodarcze, przyczyniając się do rozwoju innowacji, wzrostu i tworzenia nowych miejsc pracy [2], a także zwiększenia konkurencyjności, chroniąc przedsiębiorstwa przed niedoborem zasobów i niestabilnością cen, dając nowe możliwości biznesowe, wydajniejsze sposoby produkcji i konsumpcji [1]. Według Stahela [3] "system GOZ powinien zamieniać towary, których okres użytkowania dobiega końca,



w zasoby dla innych". GOZ stwarza wiele możliwości dla społeczeństwa i przemysłu, jest to nie tylko program ochrony środowiska, ale zadanie, które pozwala odzyskać m.in. surowce i materiały z odpadów oraz zwrócić je konsumentom [4]. Zgodnie z powyższym w pierwszej kolejności należy podjąć działania mające na celu zapobieganie powstawaniu odpadów. W przypadku, kiedy już dochodzi do powstania odpadów, priorytetem jest wprowadzenie ich do ponownego użycia. Jeśli nie ma już takiej możliwości, należy poddać je recyklingowi. Gospodarka o obiegu zamkniętym – woda, surowce kopalne, odpady, jest jedną ze strategicznych Krajowych Inteligentnych Specjalizacji (KIS) [5], które określone zostały przez Państwa Członkowskie UE jako priorytety gospodarcze w obszarze badań, rozwoju oraz innowacji.

Polsce nadal jednym z głównych surwców energetycznych wykorzystywanych W w ogrzewnictwie indywidualnym jest węgiel kamienny. W okresie zimowym obserwuje się zanieczyszczenia powietrza związane ze spalaniem paliw kopalnych w urządzeniach grzewczych w sektorze ogrzewnictwa indywidualnego (powstawanie smogu w efekcie tzw. niskiej emisji). Zjawisko to wynika przede wszystkim ze spalania paliw niskiej jakości oraz wykorzystywania do celów grzewczych niskiej klasy kotłów komorowych z ręcznym dozowaniem. Obecnie z uwagi na krajowe (Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 27 września 2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych) i europejskie (Rozporządzenie Komisji EU 2015/1189) prawodawstwo wprowadzono restrykcje (uchwały antysmogowe w 14 województwach) dotyczące rodzaju spalanych paliw oraz kotłów grzewczych. W praktyce doprowadziło to do eliminacji z rynku paliw flotokoncentratów, mułów i części miałów (w postaci nieprzetworzonej). Powstałe flotokoncentaty oraz muły jako odpad z procesu produkcji (wzbogacania) wegla są składowane na hałdach (istnieje ok. 150 hałd w Polsce, z czego 90% w województwie śląskim), co w konsekwencji prowadzi do utraty ich potencjału energetycznego. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do flotokoncentratów weglowych, które charakteryzują się dobrymi parametrami jakościowymi, a ich jedynymi mankamentami jest bardzo drobne uziarnienie i wysoka wilgotność, skutkujące nadmierną emisja pyłów podczas procesu spalania. Flotokoncentraty pochodzace z procesu wzbogacania wegli koksowych stanowią część tzw. wsadu koksowniczego, pomimo zbadanego negatywnego wpływu zbyt dużej ilości najdrobniejszych ziaren na parametry jakościowe koksu (CRI, CSR) i nie ma możliwości regulowania jego ilości w mieszance węglowej.

Jedną z możliwych metod korzystnego ekonomicznie energetycznego wykorzystania drobnoziarnistych frakcji węglowych w postaci flotokoncentratu węglowego charakteryzującego się wysoką wartością opałową, jest wytwarzanie zwartych oraz mechanicznie wytrzymałych paliw formowanych. Zgodnie z definicją Wandrasza i in. [6], paliwa formowane to substancje palne przeznaczone do realizacji określonego procesu termicznego, utworzone w wyniku przemian fizycznych lub fizyczno-chemicznych, między innymi na bazie paliw naturalnych.

Do produkcji paliw formowanych stosowane są procesy aglomeracji/kompaktowania, których istotą jest wytwarzanie paliw kawałkowych z silnie rozdrobnionych cząstek, dzięki czemu zbyt duży stopień rozdrobnienia lub zbyt duży rozrzut uziarnienia nie stanowi przeszkody w ich stosowaniu. Do dwóch podstawowych sposobów aglomeracji, wykorzystywanych w produkcji paliw formowanych, należą [7]: prasowanie (brykietowanie) i granulacja/peletyzacja. W wielu przypadkach zaliczenie metod do prasowania lub granulacji jest sprawą umowną, a kryterium jest jedynie rozmiar wytworzonego produktu i tak np. Kłassien i Griszajew [8] oraz Pietsch [7] dodają do metod granulacji prasowanie, formowanie lub wytłaczanie. Innym podziałem procesów aglomeracji/kompaktowania jest podział na metody bezciśnieniowe i ciśnieniowe.

Formowanie materiałów drobnoziarnistych przeprowadzane jest metodami ciśnieniowymi i bezciśnieniowymi z użyciem lepiszcza lub bez lepiszcza [9, 10]. W większości przypadków paliwa formowane na bazie węgla wymagają zastosowania odpowiedniego spoiwa [11-14]. Lepiszcza zapewniają spojonym materiałom wytrzymałość mechaniczną. Mogą również wpływać na specyficzne

Open Access (CC BY-NC 4.0)



właściwości niezbędne do konkretnych zastosowań np. w przypadku paliw formowanych mogą zapewniać odporność na czynniki atmosferyczne i ułatwiać proces spalania (łatwość zapalania, rodzaj płomienia, zachowanie kształtu paliwa – tzw. termowytrzymałość). Nadrzędnym celem jest jednak poprawa wytrzymałości mechanicznej tj. odporności na ściskanie bądź na zrzut otrzymanych paliw kompaktowanych [15, 16]. Jednocześnie jednak istotną i pożądaną właściwością lepiszczy jest co najmniej neutralny wpływ na parametry energetyczno-emisyjne wytwarzanego z ich udziałem paliwa [17-19].

Spoiwami są zarówno substancje stałe, jak i płynne, pochodzenia mineralnego lub organicznego, w tym karbochemiczne, związki petrochemiczne, polisacharydy, polimery, kopolimery, substancje mineralne, biomasa i inne [9]. Wybór sposobu formowania zależy przede wszystkim od właściwości surowca oraz wymaganych właściwości produktu końcowego. Pożądanymi właściwościami zagęszczonego paliwa są głównie wytrzymałość mechaniczna i gęstość. W zależności jednak od sposobu zastosowania paliwa i warunków logistycznych (np. konieczność transportu i przechowywania na wolnym powietrzu, narażenie na czynniki atmosferyczne), niektóre paliwa formowane dodatkowo powinny charakteryzować się właściwościami hydrofobowymi [20, 21].

Wejście w życie Rozporządzenia Ministra Energii z dn. 27.09.2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych oraz Rozporządzenia Ministra Rozwoju i Finansów z dn. 1.08.2017 r. (wraz z późniejszymi zmianami) w sprawie wymagań dla kotłów na paliwo stałe eliminuje z rynku pierwotnego kotły zasypowe, co powoduje stopniowy wzrost udziału kotłów automatycznych w ogrzewnictwie indywidualnym, a w konsekwencji zapotrzebowania na paliwo do nich (głównie paliwa kwalifikowane tzw. ekogroszki, ekomiały). Biorąc pod uwagę przytoczone wyżej fakty i olbrzymi potencjał rynkowy (niedostateczna podaż paliw – obecnie i w perspektywie, ryzyko bezpowrotnej utraty potencjału energetycznego drobnoziarnistych sortymentów węglowych), konieczne jest podjęcie działań w kierunku wykorzystania drobnoziarnistych sortymentów weglowych do produkcji paliwa o odpowiednich parametrach fizykochemicznych, dedykowanego dla kotłów automatycznych. Opracowanie na bazie odpadowych, drobnoziarnistych sortymentów węgla kamiennego (w szczególności flotokoncentratów) technologii wytwarzania ekologicznego kompozytowego paliwa formowanego (EKomPell) dla ogrzewnictwa indywidualnego, spełniającego wymagania zadane obowiązującymi i projektowanymi przepisami prawnymi może stać się elementem GOZ, poprzez minimalizację wytwarzania odpadów w procesach wydobycia i przeróbki wegla kamiennego. Opracowanie takiego paliwa będzie się również wpisywało w krajowe i europejskie prawodawstwo zmierzające w kierunku poprawy jakości powietrza poprzez wyeliminowanie spalania paliw niskiej jakości oraz nieefektywnych energetycznie i ekologicznie kotłów grzewczych.

Obecnie, z uwagi na zaistniałą sytuację gospodarczo-polityczną, obserwuje się deficyt odpowiedniej ilości paliw węglowych, tak więc można stwierdzić, że istnieje konieczność wprowadzenia na rynek paliwa do kotłów automatycznych, spełniającego odpowiednie kryteria jakościowe. W odpowiedzi na oczekiwania rynku, JSW Nowe Projekty S.A. (wcześniej JSW Innowacje S.A.) oraz Instytut Technologii Paliw i Energii, ITPE (wcześniej Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla) w ramach projektu EKomPell pt.: "Opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych dla ogrzewnictwa indywidualnego" opracowały technologię wytwarzania ekologicznego pelletu na bazie drobnoziarnistych sortymentów węgla kamiennego, które – zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi – są wykluczone z rynku paliw w postaci nieprzetworzonej. Zaprojektowane paliwo kompozytowe składa się z komponentów węglowych i biomasowych oraz lepiszcza.

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki realizowanego projektu dotyczące opracowanego paliwa EKomPell bazującego na odpadach jakimi są flotokoncentraty węglowe oraz technologii jego wytwarzania.

2. Badania otrzymywania kompozytowych paliw formowanych

W ramach projektu EKomPell, na podstawie analizy stanu techniki oraz eksperymentalnych badań laboratoryjnych, przeprowadzono dobór urządzenia formującego, receptury surowcowej oraz parametrów technologicznych procesu formowania drobnoziarnistych sortymentów węglowych, umożliwiających pozyskiwanie mechanicznie wytrzymałego pelletu paliwowego, spełniającego wymagania Rozporządzenia Ministra Energii z dn. 27 września 2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych [22] (Tabela 1).

Badania nad otrzymywaniem pelletów paliwowych w skali laboratoryjnej wykonano w ITPE z wykorzystaniem ekstrudera jednoślimakowego S45 firmy Metalchem. Czynnikami zmiennymi w prowadzonych testach były: ciśnienie ekstrudowania regulowane średnicą wewnętrzną filiery, temperatura mieszanki poddawanej ekstrudowaniu, czas mieszania surowców, zawartość i rodzaj surowca węglowego i biomasowego w ekstrudowanej mieszance oraz rodzaj i ilość stosowanego lepiszcza [23]. W ramach testów laboratoryjnych przetestowano wpływ dodatku różnych rodzajów biomas tj. lignocelulozy pohydrolitycznej, makuchu rzepakowego, śruty poekstrakcyjnej oraz trocin, jak również obszernej gamy lepiszcz organicznych, nieorganicznych i kompozytowych na właściwości pelletów (gęstość nasypowa i pozorna, wytrzymałość na ściskanie i ścieranie).

Na podstawie przeprowadzonych badań [24] ustalono warunki procesu peletowania w skali laboratoryjnej, dostosowane do granicznych wartości parametrów pracy ekstrudera laboratoryjnego, pozwalające na uzyskanie pelletów o najkorzystniejszych walorach fizykomechanicznych, spełniających postawione wymagania (wytrzymałość mechaniczna D_u nie mniejsza, niż 85%, wg PN-EN ISO 17831-1:2016-02). Przeprowadzono badania optymalizacyjne mające na celu redukcję zawartości spoiwa oraz opracowano recepturę bazową dla testów peletyzacji w skali przemysłowej.

Głównym zagadnieniem technologicznym w ramach przeprowadzonych badań przemysłowych było przeniesienie skali z warunków laboratoryjnych do warunków produkcyjnych (skala, wydajność poszczególnych węzłów technologicznych). Podstawowym celem realizowanych prac był dobór receptury mieszanki i parametrów pracy poszczególnych węzłów technologicznych procesu wytwarzania paliwa formowanego, tj. węzła dozowania komponentów (w tym lepiszcza), węzła uśredniania mieszanki kierowanej do procesu (odpowiedni czas mieszania), węzła formowania (ekstruder, dobór odpowiedniego rodzaju i wielkości otworów matrycy), zapewniający możliwość wytwarzania paliwa o parametrach jakościowych nie niższych, niż parametry jakościowe paliw wytworzonych w skali laboratoryjnej.

Kluczowym problemem technicznym w procesie formowania metodą ekstrudowania był dobór właściwej zawartości wilgoci w mieszance kierowanej do procesu formowania. Zarówno zbyt mała, jak i zbyt duża zawartość wilgoci w mieszance poddawanej procesowi ekstrudowania była niekorzystna z punktu widzenia jakości wytwarzanych pelletów (niska wytrzymałość mechaniczna), ciągłości pracy linii produkcyjnej (blokowanie matrycy, uszkodzenie elementów roboczych ekstrudera) oraz ekonomiki produkcji (wzrost kosztów suszenia pelletów). Zawartość wilgoci w mieszance oznaczano dla każdej partii mieszanki wytworzonej w pojedynczym mieszalniku. W warunkach aparaturowych ZPKPS w Suszcu optymalny czas mieszania w celu homogenizacji mieszanki wynosił 15 minut, w tym 5 minut mieszania po zadozowaniu wszystkich komponentów paliwa [25]. W celu uzyskania bardzo dobrej homogenizacji komponentów paliwa, dwa pracujące w układzie rewersyjnym mieszalniki pracowały z maksymalną możliwą prędkością obrotów silnika na poziomie 50 Hz, co przekłada się na 19 obrotów mieszadła na minutę. Zastosowany czas wynoszący 70 min. w standardowo stosowanej temperaturze (85÷90°C) pozwolił na uzyskanie produktu o zawartości wilgoci poniżej 3%. Dolna granica zawartości wilgoci dla stosowanego typu ekstrudera wynosiła 23% wag., a górna - 31% wag. Najkorzystniejszymi, z punktu widzenia ciągłości pracy linii produkcyjnej, zawartościami wilgoci w ekstrudowanej mieszance były wartości od 24%. Kolejnym, istotnym aspektem technologicznym był właściwy dobór matrycy urządzenia. Matryca ekstrudera

Open Access (CC BY-NC 4.0)



o zbyt dużym sprężu powoduje nadmierne opory formowania, co w konsekwencji może prowadzić do zablokowania linii, a nawet uszkodzeń mechanicznych elementów roboczych ekstrudera. Podstawową matrycą stosowaną w testach była matryca o średnicach otworów Ø=15 mm (o stopniu otwarcia φ =34,74%). Matrycą wymienną była matryca o średnicach otworów Ø=16 mm (φ =35,94%).

Czynnikami zmiennymi w weryfikowanej recepturze paliwa były: pochodzenie komponentu węglowego (flotokoncentratu), rodzaj biomasy oraz rodzaj spoiwa. Przyjęte receptury zakładały stały stosunek ilości komponentu węglowego do biomasy oraz minimalny udział składnika węglowego na poziomie 85% wag.

Wyżej wymienione warunki technologiczne, tzn. receptura paliwa oraz warunki prowadzenia procesu wywierają istotny wpływ na jakość uzyskiwanego produktu. W prowadzonych badaniach szczególny nacisk położono na otrzymywanie paliwa o odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej, która determinuje jego zachowanie się podczas transportu, składowania (pylenie, degradacja ziaren) a przede wszystkim podczas spalania w kotle (zwiększona emisja pyłów spowodowana degradacją ziarnową podczas operacji dozowania paliwa do paleniska). Założono, że minimalna wymagana wytrzymałość mechaniczna dla tego typu paliwa powinna wynosić 85%.

Na podstawie przeprowadzonych 15 testów przemysłowych peletowania różnych mieszanek flotów węglowych, biomas i spoiw wytypowano receptury otrzymywania paliw formowanych i wytworzono trzy informacyjne partie pelletów w ilości ok. 20 t, 10 t i 10 t. Spełniały one założone w projekcie wymagania jakościowe dotyczące zawartości wilgoci całkowitej, zawartości popiołu, siarki, wartości opałowej oraz wytrzymałości mechanicznej na ścieranie (Tabela 1). Jedocześnie spełniają one wymagania jakościowe dla paliw stałych o wymiarze ziarna 5÷31,5 mm (typ ekogroszek) zgodnie z Rozporządzeniem Ministra i Energii z dnia 27 września 2018 r. w sprawie wymagań jakościowych dla paliw stałych [22].

Porównanie parametrów osiągniętych i wymaganych dla pelletów na bazie drobnoziarnistych frakcji węglowych i biomasy

			Tabela 1
Parametr	Wartości osiągnięte	Wartości założone w ramach projektu	Wartości wymagane*
Zawartość wilgoci całkowitej Wtr, % wag.	0,8 ÷ 1,6	≤ 5	≤15
Zawartość popiołu w stanie suchym Ad, % wag.	5,2 ÷ 5,4	≤ 8	≤12
Wartość opałowa w stanie roboczym Qir, MJ/kg	29,862 ÷ 30,819	≥ 24	≥24
Zawartość siarki całkowitej w stanie suchym S_t^d , % wag.	0,39 ÷ 0,43	$\leq 0,8$	≤1,2
Wytrzymałość mechaniczna na ścieranie D _u , %	$87,0 \div 88,0$	≥ 85	_

* zgodnie z rozporządzeniem Ministra Energii z dn. 28.09.2018 r. [22]

Przeprowadzone badania wykazały, że właściwości wytwarzanego paliwa w głównej mierze zależą od właściwości zastosowanych surowców i przyjętej receptury wytwarzania paliwa, co w procesie przemysłowym obliguje do ścisłej kontroli dostaw poszczególnych surowców pod kątem ich jakości, a także przestrzegania przyjętej receptury paliwa.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono docelową recepturę paliwa kompozytowego na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych. Ze względu na podpisaną umowę licencyjną oraz zobowiązanie do zachowania poufności, w tabeli 2 przytoczono ogólną recepturę opracowanego paliwa kompozytowego EKomPell, będącą tajemnicą handlową.



Receptura paliwa kompozytowego na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych

Tabela 2

Składnik	Udział, % wag. s. masy
Komponent węglowy	>85
Biomasa	<10
Spoiwo	<5

Przeprowadzone prace były bazą sformułowania wytycznych procesowych i surowcowych do wytwarzania paliw kompozytowych na bazie drobnoziarnistych frakcji węglowych.

3. Technologia wytwarzania kompozytowych paliw formowanych EKomPell

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i testów przemysłowych opracowano kompleksową technologię produkcji kompozytowego paliwa formowanego EKomPell [26]. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat koncepcji technologii, która składa się z czterech podstawowych węzłów produkcji:

- Węzeł 1. Podawanie surowców i przygotowanie mieszanki do formowania.
- Węzeł 2. Formowanie paliwa.
- Węzeł 3. Suszenie paliwa.
- Węzeł 4. Pakowanie i załadunek paliwa.

Opracowana technologia zakłada wykorzystanie jako surowców do produkcji paliwa EKomPell: drobnoziarnistych frakcji węglowych, biomasy oraz spoiwa. Mieszanka surowców formowana jest metodą ekstrudowania, a wytworzone pellety surowe są suszone do założonego poziomu zawartości wilgoci (tj. max. 5 %).

3.1. Podawanie surowców i przygotowanie mieszanki do formowania

W przedmiotowej technologii surowce: drobnoziarnista frakcja węglowa oraz biomasa magazynowane są na pryzmach w zadaszonych boksach. Ponieważ technologia umożliwia stosowanie różnych biomas, powinny być one magazynowane w oddzielnych boksach magazynowych. Spoiwo powinno być magazynowane w suchej hali magazynowej (spoiwo konfekcjonowane w workach) lub w zabezpieczonym przed działaniem czynników atmosferycznych silosie dostosowanym do przechowywania materiałów sypkich.

Surowce przekazywane są z magazynów do zbiorników zasypowych stacji dozowania. Elementami głównymi stacji są przenośniki ślimakowe oparte na wagach tensometrycznych, umożliwiające dozowanie surowców w odpowiednich proporcjach, zgodnych ze stosowaną recepturą paliwa. Surowce z wag stacji dozowania kierowane są na wspólny przenośnik taśmowy rewersyjny, transportujący komponenty mieszanki do jednego z dwóch pracujących sekwencyjnie mieszalników lemieszowych.

Z uwagi, że mieszalniki są urządzeniami o działaniu okresowym, utrzymanie ciągłej pracy instalacji wymaga ich naprzemiennego działania. Podczas gdy jeden z mieszalników homogenizuje składniki paliwa, drugi mieszalnik jest rozładowywany za pomocą przenośnika ślimakowego. Łączny czas mieszania surowców w mieszalniku wynosi 15 min., przy czym czas mieszania po zadozowaniu wszystkich składników wynosi 5 min. Z mieszalników mieszanka do produkcji paliwa kierowana jest za pomocą przenośnika do węzła formowania paliwa.





Rys. 1. Schemat koncepcyjny technologii wytwarzania kompozytowych paliw formowanych EKomPell



3.2. Formowanie paliwa

Mieszanka z węzła jej przygotowania podawana jest w pierwszej kolejności do miksera, w którym ulega szybkiej, dodatkowej homogenizacji, a następnie do systemu próżniowego – komory próżniowej, w której następuje jej odpowietrzenie. Odpowietrzona mieszanka podawana jest do ekstrudera wyposażonego w zagęszczający podajnik ślimakowy o zbieżnym skoku. Poprzez matrycę o określonej wielkości otworów wytłaczane są kształtki paliwa, które spadają na rewersyjny przenośnik taśmowy, który przeznaczony jest do transportowania surowych pelletów do węzła suszenia, jednakże w sytuacjach awaryjnych – poprzez możliwość ruchu rewersyjnego – jest wykorzystywany do usuwania wadliwych pelletów z linii produkcyjnej. Wadliwe pellety ze skrzyni odpadów kierowane mogą być powtórnie do węzła formowania.

3.3. Suszenie paliwa

Paliwo surowe o zawartości wilgoci od 24 do 31% wag., podawane jest na jezdny przenośnik taśmowy, który umożliwia równomierne rozprowadzenie paliwa w suszarce taśmowej. Czynnikiem suszącym w urządzeniu jest gorące powietrze o temperaturze 85÷90°C. Czynnikiem grzewczym jest woda obiegowa o temp. 95÷115°C. Czas suszenia pelletów (regulowany prędkością przesuwu taśmy) wynosi 70 min. Wysuszone pellety kierowane są na przenośnik taśmowy węzła pakowania i załadunku paliwa.

3.4. Pakowanie i załadunek paliwa

Przed pakowaniem i dystrybucją wysuszone paliwo poddawane jest przesiewaniu w przesiewaczu wibracyjnym. Pozbawione podziarna paliwo przenośnikiem taśmowym transportowane jest do zsuwni rozdzielczej trzydrogowej, umożliwiającej skierowanie go do zbiornika nadwagowego nad systemem załadowczym do big-bagów, zbiornika nadwagowego nad systemem pakowania w worki lub do taśmowej wagi przenośnikowej umożliwiającej załadunek paliwa w luźnej formie bezpośrednio na samochody ciężarowe.

Wydzielone w przesiewaczu wibracyjnym podziarno może być kierowane za pomocą zsuwni rozdzielczej dwudrogowej do zbiornika skruszonego paliwa i następnie pakowane w big-bagi służąc jako wsad surowcowy obniżający wilgotność mieszanki lub przy małej ich ilości – kierowane bezpośrednio do węzła formowania.

3.5. Bilans zużycia energii w produkcji kompozytowego paliwa formowanego

Przyjęto, żę roczna produkcja paliwa będzie wynosiła 60 480 t, co odpowiada wydajności produkcji paliwa 10 t/h i efektywnemu czasowi pracy instalacji 69% (praca instalacji w czasie 252 dni w roku w ruchu trzyzmianowym – 24 h/dobę).

Oszacowania zużycia mediów bezpośrednio produkcyjnych (energia elektryczna i energia cieplna w postaci wody grzewczej) dokonano przy założeniu rocznej produkcji i efektywnego czasu pracy jak w szacowaniu zużycia surowców, a także pełnego obciążenia mocy zainstalowanej (Tabela 3).

Bilans zużycia energii w produkcji kompozytowego paliwa formowanego EKomPell

Tabela 3

Medium	Wskaźnik zużycia	Zużycie roczne	Zużycie jednostkowe
Energia elektryczna	797,9 kW moc zainstalowana	4 825,70 MWh/rok*	79,79 kWh/t produktu
Woda grzewcza	73,96 (± 4,2%) m ³ /h	447 340,32 (± 4,2%) m ³ /rok [*]	7,39 (± 4,2%) m ³ /t produktu

- rok = 252 dni = 6048 h



4. Podsumowanie

Jednym z głównych celów Polityki Surowcowej Państwa [27] w zakresie pozyskiwania surowców ze źródeł wtórnych jest transformacja gospodarki w kierunku obiegu zamkniętego, przy założeniu, iż odpady to potencjalne surowce. Kluczowe działania związane z GOZ wskazują na możliwość wykorzystania odpadów wydobywczych oraz działania na rzecz rozwoju ich odzysku, w tym rozwój technologii przetwórstwa.

W niniejszym rozdziale przedstawiono koncepcję technologii wytwarzania paliwa kompozytowego wytworzonego w głównej mierze z flotokoncentratów węglowych będących odpadem w trakcie produkcji wegla (min. 85% wag.), biomasy (max. 10% wag.) oraz spoiwa (max. 5% wag.). Pellety otrzymane na bazie opracowanej receptury charakteryzują się dobrą wytrzymałością na ścieranie ($D_u \ge 87$) oraz zawartością wilgoci $\le 1,6\%$ wag., popiołu $\le 5,4\%$ wag., siarki całkowitej ≤0,43% wag. i wartościa opałowa ok. 30 MJ/kg, tym samym wpisując się w wymagania jakościowe stawiane dla paliw stałych o wymiarze ziarna 5÷31,5 mm (typ ekogroszek) określonych w Rozporzadzeniu Ministra Energii z dn. 27.09.2018 r. Przeprowadzone badania zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej, wskazują, że właściwości opracowanego paliwa kompozytowego zależą głównie od właściwości surowców i przyjętej receptury jego wytwarzania. W ramach projektu EKomPell oprócz opracowania receptury paliwa zaproponowano również koncepcje technologiczna jego produkcji.

Zaprezentowane innowacyjne zagospodarowanie mułów i flotokoncentratów węglowych ma nie tylko znaczenie gospodarcze, ale może wpłynąć również pozytywnie na stan środowiska naturalnego poprzez ograniczenie emisji zanieczyszczeń podczas ich spalania i zmniejszenie ilości odpadów składowanych na hałdach (uniknięcie zeszpecenia krajobrazu, zagrożenia wtórnym pyleniem lub samozapłonem i niezorganizowaną emisją CO₂).

Praca wykonana w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0038/17 "Opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych dla ogrzewnictwa indywidualnego" (EKomPell) współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego



Literatura

- Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów Zamknięcie obiegu - plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym, COM(2015) 614 final. file:///C:/Users/JB/Downloads/COM(2015)614_0-1.pdf [dostęp: 24 sierpnia 2022]
- 2. Kirchherra J., Piscicellia L., Boura R., Kostense-Smitb E., Mullerb J., Huibrechtse-Truijensb A., Hekkert M.: Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). Ecological Economics. 2018. 150, s. 264-272
- 3. Stahel W.: The circular economy he circular economy. A new relationship with our goods and materials would save resources and energy and create local jobs explains. Nature 2016. 531, s.435-438. DOI: 10.1038/531435a
- 4. Wdowin M., Koneczna R., Cader J., Hanc E., Olczak P., Kunecki P.: Koncepcja wsparcia regionalnego w zakresie realizacji gospodarki o obiegu zamkniętym w województwie



wielkopolskim. https://wrot.umww.pl/wp-content/uploads/2021/09/GOZ.pdf [dostęp: 24 sierpnia 2022]

- Krajowa Inteligentna Specjalizacja (KIS) aktualizacja 2020 r. Ministerstwo Rozwoju. Projekt 5. z dnia 29.09.2020 Załącznik Strategii r. nr 2 do produktywności 2030. https://smart.gov.pl/images/Krajowa_Inteligentna_Specjalizacja_-_za_nr 2.pdf [dostep: 24 sierpnia 2022]
- 6. Wandrasz J., Wandrasz A.: Paliwa formowane. Wydawnictwo Seidel Przywecki Sp. z o.o., Warszawa 2006
- 7. Koch R., Noworyta A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992
- 8. Kłassien P.W., Griszajew I.G.: Podstawy techniki granulacji. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989
- 9. Zhang G., Sun Y., Xu Y.: Review of briquette binders and briquetting mechanism. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018. 82, s. 477–487
- 10. Dzik T., Marciniak-Kowalska J., Madejska L.: Pressure agglomeration of hard and brown coals. Chemik 2012. 66, s. 445–452
- 11. Hycnar J.J.; Borowski G.: Methods of Increasing the Calorific Value of Fine Coal Waste; Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2016
- 12. Adeleke A.A., Odusote J.K., Lasode O.A., Ikubanni P.P., Malathi M., Paswan D.: Densification of coal fines and mildly torrefied biomass into composite fuel using different organic binders. Heliyon 2019, 5, e02160
- 13. Taulbee D., Patil D.B., Honaker R.Q., Parekh B.K.: Briquetting of Coal Fines and Sawdust Part I: Binder and Briquetting-Parameters Evaluations. Int. J. Coal Prep. Util. 2009. 29, s. 1–22
- Leokaoke N.T., Bunt J.R., Neomagus H.W.J.P., Waanders F.B., Strydom C.A., Mthombo, T.S.: Manufacturing and testing of from intertinite-rich low-grade coal fines using various binders. J. South. Afr. Inst. Min. Metall. 2018. 118, s. 83–88
- 15. Rejdak M., Winkler R., Supernok K., Ignasiak K.: Pelletizing tests of waste anthracite dust. Inz. Ekolog. 2016. 49, s. 100–106
- Rejdak M.; Czardybon A., Ignasiak K., Sobolewski A., Robak, J.: Compaction Studies of Torrefied Willow. J. Ecol. Eng. 2017. 18, s. 183–192
- 17. Robak J., Janusz M., Sobolewski A.: Preparation of lignocellulosic waste for combustion process. Chemik 2012. 66, s. 436–440
- 18. Supernok K., Robak J., Ignasiak K., Szul M.: Preparation of granules made of fine-grained coal fractions for gasification process, Inz. Ekolog. 2018. 19, s. 1–13
- 19. Borowski G., Hycnar J.J.: Utilization of Fine Coal Waste as a Fuel Briquettes. Int. J. Coal Prep. Util. 2013. 33, s. 194–204
- 20. Deniz V.: Production of Water-Resistant Briquettes from a Mixture of an Imported Bituminous Coal and a Turkish Lignite with Copolymer Binder. Int. J. Coal Prep. Util. 2013. 33, s. 26–35
- 21. Deniz V.: A new binder in production of water-resistant briquettes from bituminous coals: Copolymer binder. Energy Sources A Recovery Util. Environ. Eff. 2016. 38, s.1068–1074.
- 22. https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/wymagania-jakosciowe-dla-paliw-stalych-18761765 [dostęp: 30 sierpnia 2022]

Open Access (CC BY-NC 4.0)



- Rejdak M., Robak J., Czardybon A., Ignasiak K., Fudała P.: Research on the Production of Composite Fuel on the Basis of Fine-Grained Coal Fractions and Biomass—The Impact of Process Parameters and the Type of Binder on the Quality of Briquettes Produced, Minerals 2020. 10, 31, https://doi.org/10.3390/min10010031 [dostęp: 22 sierpnia 2022]
- 24. Gałko G., Ignasiak K., Rejdak M., Robak J., Supernok K.: Sprawozdanie IChPW nr 322/2019 z wykonania pracy pt.: "Opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych dla ogrzewnictwa indywidualnego" projekt POIR.04.01.02-00-0038/17 (akronim EKomPell), Etap 2, Zabrze maj 2019
- 25. Hajduk M., Fudała P.: Sprawozdanie JSW Innowacje z wykonania pracy pt.: "Opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych dla ogrzewnictwa indywidualnego" projekt POIR.04.01.02-00-0038/17 (akronim EKomPell), Etap 5, Katowice styczeń 2020
- 26. Bigda J., Billig T., Fryza R., Ignasiak K., Kolon P., Robak J.: Sprawozdanie IChPW nr. 118/2020 z wykonania pracy pt.: "Opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych dla ogrzewnictwa indywidualnego" projekt POIR.04.01.02-00-0038/17 (akronim EKomPell), Etap 8, Zabrze wrzesień 2020
- 27. Polityka Surowcowa Państwa Projekt. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021. https://monitorpolski.gov.pl/M2022000037101.pdf [dostęp: 30 sierpnia 2022]



https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.2

Znaczenie badań i certyfikacji jednostek wytwórczych w ITG KOMAG dla zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii

Andrzej Figiel – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Andrzej Niedworok – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Marcin Talarek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono wymagania formalne i techniczne wynikające z przepisów Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG). Wymóg stosowania w zakładzie wytwarzania energii wyłącznie jednostek wytwórczych, które spełniają wymagania techniczne określone w kodeksie sieci, jest jednym ze sposobów zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej. W rozdziale zaprezentowano również tryb i zasady potwierdzania zgodności jednostek wytwórczych z wymaganiami technicznymi na przykładzie badań i certyfikacji – procesów realizowanych w akredytowanym laboratorium badawczym i akredytowanej jednostec certyfikującej Instytutu KOMAG. Wskazano również na wybrane aspekty bezpieczeństwa, które powinny być uwzględnienie w procesie projektowania jednostek wytwórczych energii.

Słowa kluczowe: jednostki wytwórcze, moduły wytwarzania energii, kodeks sieci, badania, certyfikacja

Impact of testing and certification of generating units at ITG KOMAG for ensuring the security of energy supplies

Abstract: This chapter presents the formal and technical requirements under the provisions of Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators (NC RfG). The requirement to use at a generation facility only generating units that meet the technical requirements set out in the Network Code on Requirements for Generators (NC RfG) is one way to ensure safety of electricity supply. The chapter also presents the procedure and principles for confirming the compliance of generating units with technical requirements on the example of testing and certification - processes carried out at the accredited testing laboratory and accredited certification unit of the KOMAG Institute. It also points out selected safety aspects that should be taken into account in the design process of power generation units.

Keywords: power generation units, power generation modules, network code, testing, certification

1. Wprowadzenie

W celu zapewnienia uczciwych warunków konkurencji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej, bezpieczeństwa systemu oraz integracji odnawialnych źródeł energii elektrycznej ustanowiono w Unii Europejskiej rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci [1], tzw. kodeks NC RfG. Rozporządzenie dotyczy zakładów wytwarzania energii przez operatorów elektroenergetycznych systemów przesyłowych.

Dostosowanie się do wymagań kodeksu sieci, w szczególności ma na celu:

- utrzymanie bezpieczeństwa dostaw energii,
- ustanowienie niedyskryminujących zasad dotyczących dostępu do sieci w ramach wewnętrznego rynku energii elektrycznej,



- zobowiązanie organów regulacyjnych do opracowania obiektywnych i niedyskryminujących przepisów technicznych ustalających minimalne wymogi dotyczące projektu technicznego i eksploatacji modułów wytwarzania energii na potrzeby przyłączenia do systemu przesyłowego,
- ułatwienie integracji odnawialnych źródeł energii,
- przyłączanie do sieci urządzeń charakteryzujących się odpowiednią odpornością, tak aby eliminować zakłócenia (odpowiednia reakcja modułów wytwarzania energii na odchylenia od napięcia referencyjnego 1 dla jednostek względnych pu i częstotliwości znamionowej) oraz pomagać w zapobieganiu poważnym przerwom w dostarczaniu energii elektrycznej oraz umożliwiających łatwe przywrócenie działania systemu po jego załamaniu,
- ustalenie różnych poziomów wymagań dla poszczególnych typów jednostek wytwórczych, określonych w oparciu o poziom napięcia w punkcie przyłączenia oraz ich maksymalną moc wytwórczą.

Wszystkie nowe jednostki wytwórcze wprowadzane do stosowania w zakładach wytwarzania energii muszą spełniać wymagania kodeksu sieci NC RfG. Operatorzy systemu elektroenergetycznego wymagają potwierdzenia spełnienia wymagań zapewniających bezpieczeństwo użytkowania jednostek wytwórczych poprzez dostarczenie certyfikatów zgodności (certyfikatów NC RfG), wydanych przez akredytowane jednostki certyfikujące. Z tego powodu Instytut KOMAG zbudował infrastrukturę badawczą, wdrożył metody badawcze (Laboratorium Badań Stosowanych) oraz program certyfikacji jednostek wytwórczych (Zakład Badań Atestacyjnych Jednostka Certyfikująca) a następnie uzyskał akredytację Polskiego Centrum Akredytacji w odniesieniu do badań i certyfikacji jednostek wytwórczych w oparciu o kryteria kodeksu sieci NC RfG. Podjęte działania umożliwiają uzyskanie certyfikatów zgodności dla jednostek wytwórczych wymaganych przez operatorów systemu elektroenergetycznego w krajowej jednostec certyfikującej.

W dalszych częściach niniejszego rozdziału omówiono wymagania techniczne określone w kodeksie NC RfG, tryb i zasady potwierdzania zgodności jednostek wytwórczych z wymaganiami technicznymi przez akredytowane laboratorium badawcze i akredytowaną jednostkę certyfikującą Instytutu KOMAG oraz wybrane aspekty związane z bezpieczeństwem, które powinny być uwzględnione w procesie projektowania jednostek wytwórczych energii.

2. Wymagania dla modułów wytwarzania energii

Wymagania odnośnie do kodeksu sieci NC RfG dla jednostek wytwórczych różnią się w zależności od poziomu napięcia w punkcie przyłączenia oraz ich maksymalnej mocy wytwórczej. W kodeksie ustalono cztery typy jednostek wytwórczych (modułów wytwarzania energii), oznaczonych jako typy A, B, C i D (Tabela 1). Dla każdego typu określono wymagania, które są uwzględniane podczas projektowania i oceny zgodności jednostek wytwórczych.

Wartości granicz	ne poziomu n	apięcia i pro	ogów mocy	maksymalnej
dla modu	ıłów wytwarz	ania energi	i typu A, B,	C, D

Tabela 1

Typ jednostki wytwórczej (moduł wytwarzania energii)	Α	В	С	D	
Napięcie w punkcie przyłączenia	<110 kV	< 110 kV	< 110 kV	$\geq 110 \text{ kV}$	
Wartość graniczna progu mocy maksymalnej w Europie kontynentalnej0,8 kW1 MW50 MW75 MW					
Wartość graniczna progu mocy maksymalnej w Polsce*0,8 kW0,2 MW10 MW75 MW					
* Wartości zaproponowane przez krajowych operatorów systemów dystrybucyjnych i zatwierdzone przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki (URE) – Decyzja Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki DRE.WOSE.7128.184.3.2018.Z z dnia 16 lipca 2018 r.					



Kodeks sieci NC RfG ustala ogólne wymagania dla każdego typu nowych (wprowadzanych do obrotu handlowego i stosowania) modułów wytwarzania energii. W odniesieniu do modułów wytwarzania energii typu A mają zastosowanie wymagania na poziomie podstawowym, jaki jest niezbędny do zapewnienia zdolności wytwórczych przy ograniczonej, automatycznej reakcji i minimalnej regulacji przez operatora systemu. Ich spełnienie powinno zagwarantować brak znaczącego spadku wytwarzanej energii w określonych stanach pracy systemu, ograniczając tym samym do minimum możliwość wystąpienia zdarzeń krytycznych, jak również konieczność podejmowania szerokiej interwencji podczas zdarzeń krytycznych dla systemu.

Wymagania do modułów wytwarzania energii typu B dotyczą szerszego zakresu automatycznej, dynamicznej reakcji łagodzącej skutki zdarzeń systemowych oraz zapewniają wyższy poziom regulacji przez operatora systemu.

Spełnienie wymagań przez moduły wytwarzania energii typu C zapewnia przewidywalną, stabilną i dynamiczną reakcję w czasie rzeczywistym, zarówno w stanach normalnych, jak i awaryjnych, jaka jest niezbędna do eliminowania zakłóceń w systemie oraz odpowiedniego reagowania na nie, tak aby zapewnić bezpieczeństwo dostaw energii.

Wymagania mające zastosowanie do modułów wytwarzania energii typu D dotyczą instalacji wytwórczych przyłączonych pod sieci pod wyższym napięciem (nie niższym od 110 kV), mające wpływ na regulację i działanie całego systemu. Ich spełnienie powinno zapewniać stabilną pracę wzajemnie połączonych instalacji w ramach jednego systemu przez wykorzystanie potencjału wytwórczego w całej Europie.

W dalszej części rozdziału, zostaną omówione szczegółowe wymagania oraz weryfikacja ich spełnienia w toku badań i certyfikacji prowadzonej przez Instytut KOMAG, jakie powinny spełnić moduły wytwarzania energii typu A i typu B, przyłączone do sieci w sposób niesynchroniczny lub poprzez układy energoelektroniki i które posiadają jeden punkt przyłączenia do systemu przesyłowego, systemu dystrybucyjnego, w tym zamkniętego systemu dystrybucyjnego, lub systemu HVDC (sieci wysokiego napięcia prądu stałego – ang. high voltage direct current) modułu parku energii PPM (ang. Power Park Module).

W zakładzie wytwarzania energii można zastosować wyłącznie moduły wytwarzania energii, które spełniają wymagania kodeksu sieci NC RfG [2].

3. Badania i certyfikacja jednostek wytwórczych

Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej (PTPiREE) - stowarzyszenie zrzeszające operatorów elektroenergetycznych systemów dystrybucyjnych i operatora systemu przesyłowego oraz pracowników branży energetycznej, w ramach wdrażania przepisów kodeksu sieci NC RfG opracowało dokument określający warunki i procedury wykorzystania certyfikatów w procesie przyłączenia modułów wytwarzania energii do sieci elektroenergetycznych [3].

Zgodnie z tym dokumentem certyfikacji podlegają:

- jednostki wytwórcze, zdefiniowane jako najmniejsze zestawy urządzeń i instalacji, które są w stanie generować energię elektryczną niezależnie (i samodzielnie) od innych jednostek rozmieszczonych w ramach modułu wytwarzania energii i/lub zakładu wytwarzania energii (np. w przypadku farmy wiatrowej będzie to pojedyncza turbina wiatrowa),
- komponenty, zdefiniowane jako część jednostki wytwórczej i/lub modułu wytwarzania energii i/lub zakładu wytwarzania energii, niezbędne do zapewniania danej zdolności technicznej całego modułu wytwarzania energii.



Certyfikat komponentu jest wydawany przez upoważnioną jednostkę certyfikującą na podstawie badań typu.

Certyfikat jednostki wytwórczej jest wydawany przez upoważnioną jednostkę certyfikującą na podstawie:

- pełnego testu jednostki wytwórczej (podstawowa metoda),
- testu układu elektrycznego KPT komponentów podlegających testowaniu, wchodzących w skład jednostki wytwórczej.

Dopuszcza się zastąpienie pełnego testu jednostki wytwórczej badaniem typu komponentów (badaniem układu elektrycznego komponentów), wybranych z uwzględnieniem technologii wytwarzania i charakterystyki źródła (panele fotowoltaiczne, turbina wiatrowa, turbogenerator).

W procesie certyfikacji modułów wytwarzania energii preferowane są rzeczywiste badania pomiarowe wielkości fizycznych związanych z daną właściwością, wykonywane przez akredytowane laboratorium badawcze, spełniające wymagania normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02, którego zakres akredytacji obejmuje wykonywane badania. Wyniki i sposób przeprowadzenia badań pomiarowych są jednoznacznie określone i opisane w sprawozdaniu z badań, które na żądanie właściwego operatora systemu powinno być mu dostarczone.

Zakład Badań Atestacyjnych Jednostka Certyfikująca wdrożył program certyfikacji jednostek wytwórczych. Certyfikacja jednostek wytwórczych (modułów wytwarzania energii) jest realizowana w ramach akredytacji udzielonej przez Polskie Centrum Akredytacji (zakres akredytacji nr AC 023), według następujących dokumentów odniesienia:

- rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci [1] - oznaczenie skrótowe dokumentu NC RfG,
- Wymogi Ogólnego Stosowania wynikające z rozporządzenia komisji UE 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci - zatwierdzone decyzją Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki DRE.WOSE.7128.550.2.2018.ZJ z dnia 2 stycznia 2019 r. [4],

– norma PN-EN 50549-1:2019-02 [5].

Podstawą wydania certyfikatu zgodności dla jednostek wytwórczych są badania realizowane przez Laboratorium Badań Stosowanych Instytutu KOMAG, które jako pierwsze laboratorium w Polsce, uzyskało akredytację Polskiego Centrum Akredytacji (zakres akredytacji nr AB 665) w odniesieniu badań jednostek wytwórczych przyłączanych do sieci elektroenergetycznej, zdefiniowanych w kodeksie sieci NC RfG. Infrastruktura badawcza laboratorium umożliwia realizację kompleksowych badań jednostek wytwórczych, takich jak inwertery PV, inwertery współpracujące z turbinami wodnymi i wiatrowymi, w zakresie wymaganym w programie certyfikacji zaakceptowanym przez Polskie Centrum Akredytacji.

Zakres badań, których przeprowadzenie jest konieczne do uzyskania certyfikatu zgodności dla jednostek wytwórczych typu A przedstawiono w tabeli 2.



Lp.	Badanie	Wymagania kodeksu sieci NC RfG	Wymagania normy PN-EN 50549-1: 2019-02
1	Zdolność do zachowania połączenia z siecią oraz pracy w zakresach częstotliwości i okresach określonych w art. 13 ust. 1 lit a ppkt (i) kodeksu sieci NC RfG dla obszaru synchronicznego – Europa kontynentalna.	art. 13 ust. 1 lit a ppkt (i)	pkt 4.4.2
2	Zdolność wytrzymywania prędkości zmiany częstotliwości (ROCOF – ang. Rate of Change of Frequency), df/dt.	art. 13 ust. 1 lit b	pkt 4.5.2
3	Zdolność do aktywowania rezerwy mocy czynnej w odpowiedzi na wzrost częstotliwości w trybie LFSM-O (ang. Limited frequency sensitive mode – overfrequency), przy progu częstotliwości i ustawieniach statyzmu określonych przez właściwego OSP (Operator Systemu Przesyłowego).	art. 13 ust. 2 lit a, c, d, e, f, g	pkt 4.6.1
4	Maksymalny spadek zdolności do generacji mocy przy spadku częstotliwości	art. 13 ust. 4	pkt 4.4.3
5	Zaprzestanie generacji mocy czynnej w ciągu pięciu sekund od przyjęcia polecenia w porcie wejściowym (interfejs logiczny).	art. 13 ust. 6	pkt 4.11.1
6	Warunki, na jakich moduł wytwarzania energii ma zdolność do automatycznego przyłączenia się do sieci – zakresy częstotliwości, w których automatyczne przyłączenie jest dopuszczalne, odpowiednia zwłoka czasowa oraz maksymalny dopuszczalny gradient wzrostu generowanej mocy czynnej.	art. 13 ust. 7	pkt 4.10.2 i 4.10.3

Zakres badań jednostek wytwórczych typu A

Tabela 2

4. Badania jednostek wytwórczych

W celu potwierdzania zgodności jednostek wytwórczych z wymaganiami technicznymi kodeksu sieci NC RfG przeprowadzane są badania laboratoryjne [6, 7, 8]. Opis przebiegu badań, istotnych z punktu widzenia potwierdzenia spełnienia wymagań kodeksu sieci NC RfG, zaprezentowano na przykładzie badań przekształtnika sieciowego typu EW-400-100-1A-H, produkcji ENEL-PC. Badany trójfazowy przekształtnik sieciowy o znamionowej mocy pozornej 100 kVA jest zintegrowany z przekształtnikiem generatorowym typu PTN-SA-100-H, współpracującym z generatorem synchronicznym przeznaczonym do stosowania w elektrowniach wodnych. Zakres badań, wymaganych w programie certyfikacji jednostek wytwórczych, obejmował w szczególności badania zakresu częstotliwości roboczej, badania odporności na szybką zmianę częstotliwości (ROCOF) oraz badania odpowiedzi mocą na podwyższoną częstotliwość (LFSM-O).

4.1. Badania zakresu częstotliwości roboczej

Zgodnie z wymaganiami Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG) – Artykuł 13 p. 1. a) – moduł wytarzania energii musi mieć zdolność do zachowania połączenia z siecią oraz pracy w zakresach częstotliwości określonych w tabeli 3. Badania zakresu częstotliwości roboczej przeprowadzono w odniesieniu do wymagań p. 4.4.2 normy PN-EN 50549-1:2019-02 w punktach stanowiących granice zakresu częstotliwości.



Minimalne czasy, w których moduł wytwarzania energii musi być zdolny do pracy przy różnych częstotliwościach, odbiegających od wartości znamionowej, bez odłączenia od sieci

Tabela 3

Obszar synchroniczny	Zakres częstotliwości [Hz]	Czas pracy
	47,5 ÷ 48,5	określa każdy OSP, ale nie mniej niż 30 minut
Europa kontynentalna	48,5 ÷ 49,0	określa każdy OSP, ale nie mniej niż okres dla 47,5 ÷ 48,5
	49,0 ÷ 51,0	Nieograniczony
	51,0 ÷ 51,5	30 minut

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono spełnienie wymagań zestawionych w tabeli 3. Warunki pracy obiektu badanego w trakcie testów oraz wyniki badań zaprezentowano w tabeli 4.

Wyniki badania zakresu częstotliwości roboczej

Tabela 4

Sekwencja badania	Częstotliwość ¹⁾ f _{EUT} [Hz]	Napięcie ¹⁾ UEUT [V]	Moc wyjściowa ¹⁾ P _{EUT} [kW]	Okres działania (zmierzony)	Spełnienie wymagania		
Test 1	47,50	340,15	100,34	47 min	+		
Test 2	48,51	339,91	100,31	64 min	+		
Test 3	49,02	439,76	100,13	83 min	+		
Test 4	51,50	439,44	100,02	45 min	+		
¹⁾ Wartość uśredniona za okres 1 minuty,							
<i>Test 1:</i> $U_{\text{EUT}} = 0.85 \ U_{\text{n}}$; $f_{\text{EUT}} = 47.5 \ \text{Hz}$, $P_{\text{EUT}} = 1.00 \ S_{\text{n}}$,							
<i>Test 2:</i> $U_{\text{EUT}} = 0.85 \ U_{\text{n}}$; $f_{\text{EUT}} = 48.5 \ \text{Hz}$, $P_{\text{EUT}} = 1.00 \ S_{\text{n}}$,							
<i>Test 3:</i> $U_{\text{EUT}} = 1,1 \ U_{\text{n}}$; $f_{\text{EUT}} = 49,0 \ \text{Hz}$, $P_{\text{EUT}} = 1,00 \ S_{\text{n}}$,							
Test 4: $U_{\rm EUT}$ =	$= 1,1 U_{\rm n}; f_{\rm EUT} = 51,5 H$	$I_{z, P_{EUT}} = 1,00 S_{n}$					

4.2. Badania odporności na szybką zmianę częstotliwości (ROCOF)

Zgodnie z wymaganiami Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG) – Artykuł 13 p. 1. b) – w odniesieniu do zdolności wytrzymania prędkości zmiany częstotliwości, moduł wytwarzania energii musi mieć zdolność do zachowania połączenia z siecią oraz do pracy przy prędkościach zmiany częstotliwości do wartości określonej przez właściwego OSP, chyba, że odłączenie zostało spowodowane zadziałaniem zabezpieczenia dedykowanego do identyfikacji, poprzez analizę prędkości zmian częstotliwości, przy pracy wyspowej. Właściwy operator systemu, w porozumieniu z właściwym OSP, określa nastawy powyższego zabezpieczenia. Badania przeprowadzono w odniesieniu do wymagań p. 4.5.2 normy PN-EN 50549-1:2019-02. Odporność ROCOF oznacza, że jednostki wytwórcze w tej instalacji wytwórczej pozostają połączone z siecią dystrybucyjną i mogą działać, gdy częstotliwość w sieci dystrybucyjnej zmienia się z określoną szybkością [5].



Zarejestrowane podczas badań przykładowe oscylogramy prezentują zachowanie się jednostki wytwórczej przy zmianie częstotliwości z określoną szybkością (rysunki 1 i 2). Zestawienie uzyskanych wyników zaprezentowano w tabeli 5.



Rys. 1. Oscylogram zarejestrowany podczas badań ROCOF jednostki wytwórczej przy wzroście częstotliwości od 48,5 Hz do 51 Hz z szybkością +2,4 Hz/s



Rys. 2. Oscylogram zarejestrowany podczas badań ROCOF jednostki wytwórczej przy spadku częstotliwości od wartości 51 Hz do wartości 48,5 Hz z szybkością -2,4 Hz/s



Wyniki badań odporności na szybką zmianę częstotliwości (ROCOF)

Tabela 5

Napię	cie Ueut [V]	390,48			
Moc wyjściowa P _{EUT} [kW]		100,25			
Numer	Częstotliwo	ość feut [Hz]	Zmiana częstotliwości	zęstotliwości Wynik badania Hz/s]	
pomiaru	Początkowa	Końcowa	[Hz/s]		
1	48,5	51,0	+2,0	Brak odłączenia od sieci	
2	51,0	48,5	-2,0	Brak odłączenia od sieci	
3	48,5	51,0	+2,4	Brak odłączenia od sieci	
4	51,0	48,5	-2,4	Brak odłączenia od sieci	
5	48,5	51,0	+2,6	Odłączenie od sieci	
6	51,0	48,5	-2,6	Odłączenie od sieci	

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono odporność badanego przekształtnika sieciowego na szybką zmianę częstotliwości (ROCOF).

4.3. Badania odpowiedzi mocą na podwyższoną częstotliwość (LFSM-O)

Badania odporności mocą czynną na podwyższoną częstotliwość przeprowadzono w odniesieniu do wymagań p. 4.6.1 normy PN-EN 50549-1:2019-02 oraz art. 13, ust. 2 – NC RfG:

- moduł wytwarzania energii musi mieć zdolność do aktywowania rezerwy mocy czynnej w odpowiedzi na wzrost częstotliwości zgodnie z rysunkiem 1, przy progu częstotliwości i ustawieniach statyzmu określonych przez właściwego OSP,
- zamiast zdolności, o której mowa powyżej, właściwy OSP może zezwolić w ramach swojego obszaru regulacyjnego na automatyczne odłączanie i przyłączanie modułów wytwarzania energii typu A przy różnych poziomach częstotliwości, które w idealnej sytuacji powinny być rozłożone równomiernie, powyżej progu częstotliwości określonego przez właściwego OSP, w przypadku gdy jest w stanie wykazać wobec właściwego organu regulacyjnego, przy współpracy z właścicielami zakładów wytwarzania energii, że wywołuje to ograniczone skutki transgraniczne i umożliwia zachowanie takiego samego poziomu bezpieczeństwa pracy systemu we wszystkich stanach jego pracy,
- próg częstotliwości aktywacji trybu LFSM-O (f_1) musi się mieścić w zakresie 50,2 Hz 50,5 Hz,
- ustawienia statyzmu (s) muszą się mieścić w zakresie 2 12%,
- moduł wytwarzania energii musi mieć zdolność do aktywowania mocy w odpowiedzi na zmianę częstotliwości przy jak najkrótszej zwłoce początkowej. Jeżeli powyższa zwłoka wynosi więcej niż dwie sekundy, właściciel zakładu wytwarzania energii musi ją uzasadnić, przedstawiając właściwemu OSP uzasadnienie techniczne,
- właściwy OSP może wymagać, aby po osiągnięciu minimalnego poziomu regulacji moduł wytwarzania energii miał zdolność do utrzymania pracy na tym poziomie lub dodatkowego zmniejszenia generowanej mocy czynnej,



 moduł wytwarzania energii musi mieć zdolność do stabilnej pracy podczas pracy w trybie LFSM-O. Kiedy tryb LFSM-O jest aktywny, nastawa LFSM-O jest nadrzędna w stosunku do wszystkich innych aktywowanych nastaw mocy czynnej.

Wyniki badań zaprezentowano na rysunkach 3÷6.



Rys. 3. Przebieg czasowy P_{EUT}, f_{EUT} dla badań odpowiedzi mocą czynną na podwyższoną częstotliwość (f₁ = 50,2 Hz, f_{stop} = dezaktywowany, s = 5%, P_{set} > 80% P_n)



Rys. 4. Przebieg czasowy P_{EUT} , f_{EUT} dla badań odpowiedzi mocą czynną na podwyższoną częstotliwość ($f_1 = 50,2$ Hz, $f_{stop} =$ dezaktywowany, s = 5%, $P_{set} = (40 \div 60)\%$ P_n)





Rys. 5. Przebieg czasowy P_{EUT} , f_{EUT} dla badań odpowiedzi mocą czynną na podwyższoną częstotliwość ($f_1 = 50,2$ Hz, $f_{stop} =$ dezaktywowany, s = 12%, $P_{set} = (40 \div 60)\%$ P_n)



 $\begin{array}{l} \mbox{Rys. 6. Przebieg czasowy P_{EUT, f_{EUT dla badań odpowiedzi mocą czynną na podwyższoną częstotliwość $(f_1 = 50,5 \mbox{ Hz}, f_{stop} = dezaktywowany, $s = 5\%$, $P_{set} > 80\%$ P_n) \\ \end{array}$

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono zdolność badanego przekształtnika sieciowego do aktywacji odpowiedzi mocą czynną na podwyższoną częstotliwość przy programowalnym progu częstotliwości f_1 co najmniej między 50,2 Hz i 52 Hz włącznie, z programowalnym statyzmem w zakresie co najmniej od s = 2% do s = 12%.



5. Podsumowanie

Wdrożenie przepisów Rozporządzenia Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG) przyczynia się w sposób istotny do poprawy bezpieczeństwa i niezawodności krajowego systemu energetycznego. Wdrożenie zaleceń kodeksu sieci NC RfG stanowi wyzwanie dla producentów jednostek wytwórczych, którzy w pierwszej kolejności powinni uwzględnić wymagania kodeksu sieci na etapie projektowania. Potwierdzenie zgodności z wymaganiami kodeksu sieci NC RfG powierzono akredytowanym jednostkom certyfikującym. Wymóg uzyskania certyfikatu zgodności (certyfikatu NC RfG) dla nowych jednostek wytwórczych w pewnym sensie wymusił stworzenie infrastruktury badawczej i wdrożenie programów certyfikacji tych urządzeń. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom rynku Instytut KOMAG doprowadził do sytuacji, w której producent jednostek wytwórczych może skorzystać z usług krajowej instytucji oferującej badania pomiarowe oraz ocenę uzyskanych wyników w procesie certyfikacji. Doświadczenia uzyskane podczas badań jednostek wytwórczych, których wybrane wyniki zaprezentowano w niniejszym rozdziale, potwierdzają słuszność ustanowienia i stosowania wymagań kodeksu sieci.

Literatura

- Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci - Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 27.4.2016 L 112/4
- 2. General guidance on compliance verification compliance testing and use of equipment certificates, ENTSO-E guidance doument for national implementation of network codes on grid connection compliance testing and application of equipment certificates in the verification proces, Revised clean version, 30 July 2021
- Warunki i procedury wykorzystania certyfikatów w procesie przyłączenia modułów wytwarzania energii do sieci elektroenergetycznych, wersja 1.2 obowiązująca od 21.04.2021 r. – opracowanie Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej
- 4. Wymogi Ogólnego Stosowania wynikające z rozporządzenia komisji UE 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci - zatwierdzone decyzją Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki DRE.WOSE.7128.550.2.2018.ZJ z dnia 2 stycznia 2019 r.
- Norma PN-EN 50549-1:2019-02 Wymagania dla instalacji wytwórczych przeznaczonych do równoległego przyłączania do publicznych sieci dystrybucyjnych. Część 1: Przyłączanie do sieci dystrybucyjnej nN. Instalacje wytwórcze aż do typu B włącznie
- 6. Chmielowiec K., Topolski Ł., Piszczek A., Hanzelka Z.: Charakterystyki inwerterów fotowoltaicznych w świetle zapisów kodeksu sieciowego oraz wymagań polskich operatorów systemów dystrybucyjnych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 97 NR 4/2021, ISSN 0033-2097
- Paál E., Tatai Z.: "Grid Connected Inverters influence on power quality of Smart Grid," Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, Ohrid, 2010, pp. T6-35-T6-39, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606890
- Yu-Jen L., Pei-Hsiu L., Hong-Hsun L.: Grid-Connected PV Inverter Test System for Solar Photovoltaic Power System Certification, IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, 201



https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.3

Przydomowy wolnoobrotowy kinetyczny magazyn energii – propozycja rozwiązania

Sebastian Janas - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiona została koncepcja mechanicznej części, przydomowego wolnoobrotowego kinetycznego magazynu energii jako urządzenia przeznaczonego do współpracy z małymi OZE montowanymi w indywidualnych gospodarstwach domowych. Przedstawiono wstępne obliczenia wspomagające dobór masy wirującej oraz zakresu obrotów efektywnych. Zaproponowano rozwiązanie konstrukcyjne zobrazowane w postaci trójwymiarowego modelu, który przedstawia w pełni funkcjonalne urządzenie w części mechanicznej. Ze względu na duże obciążenie osiowe, pochodzące głównie od masy wirującej, przeprowadzono wstępne obliczenia łożyska magnetycznego, które pełni rolę łożyska osiowego.

Słowa kluczowe: kinetyczny magazyn energii, przydomowe OZE, energia odnawialna, sprawiedliwa transformacja

Domestic low speed flywheel energy storage - solution proposal

Abstract: This chapter presents the concept of a mechanical part of a backyard low speed flywheel energy storage unit as a device designed to operate with small-scale RES installed in each household. Preliminary calculations supporting the selection of the rotating mass and the range of effective rotations are presented. A design solution in the form of a 3D model, which shows the device fully functional in the mechanical part. Due to the high axial load, mainly from the rotating mass, preliminary calculations were made for the magnetic bearing, which acts as an axial bearing.

Keywords: kinetic energy storage, backyard RES, renewable energy, just transition

1. Wprowadzenie

W dobie dywersyfikacji wytwarzania energii z wykorzystaniem OZE, powstaje konieczność magazynowania nadmiarowych jej ilości. Ważnym aspektem jest również, stabilizacja wytwarzanego napięcia. Powszechnie stosowane OZE (w zakresie wytwarzania energii elektrycznej) w indywidualnych gospodarstwach domowych to panele fotowoltaiczne. Rzadko spotyka się przydomowe elektrownie wiatrowe. Systemy takie nie zawsze jednak pracują poprawnie, szczególnie kiedy następuje przeciążenie odbiorczej sieci energetycznej podczas oddawania energii elektrycznej do systemu energetycznego. Systemy takie również nie produkują energii elektrycznej w formie gotowej do skonsumowania. W takiej sytuacji sprawdzają się magazyny energii, które potrafią gromadzić nadmiarową energię elektryczną, wyrównać chwilowe skoki napięć, aby potem, w krótkim czasie doładować sieć odbiorczą. Energia taka może być gromadzona w postaci ciepła czy energii kinetycznej. W przypadku niedoboru mocy z systemu energetycznego bądź z OZE można wtedy wykorzystać zgromadzoną w magazynie energię i zamienić ją ponownie w prąd elektryczny.

2. Przykłady FESS

Na świecie istnieje wiele rozwiązań kinetycznych magazynów energii. Są one przede wszystkim wykorzystywane w przemyśle oraz elektrowniach OZE. Są to układy rozbudowane o pojemnościach co najmniej kilkuset kWh. Układy o mniejszych gabarytach znalazły zastosowanie w przemyśle samochodowym, jak chociażby w Volvo (rys. 1), gdzie zastosowanie magazynu energii na bazie koła zamachowego może obniżyć zużycie paliwa nawet o 25% [1, 2]. System ten zabudowany jest na tylnej osi. Podczas zwalniania energia hamowania powoduje obracanie się koła zamachowego



z prędkością 60 000 obr min⁻¹. Podczas ruszania obroty koła zamachowego przenoszone są, za pomocą specjalnej przekładni, na tylne koła napędowe. Energia z koła wykorzystana może być do przyspieszenia pojazdu albo do ponownego ruszania. Dzięki takiemu rozwiązaniu samochód najlepiej nadaje się do jazdy miejskiej, gdzie występuje duża ilość cykli hamowania i ruszania.



Rys. 1. Przykład kinetycznego magazynu energii zastosowanego w samochodzie Volvo S60 [1]

Układy kół zamachowych pełniących rolę magazynów energii wykorzystywane są w EZT bądź lekkich lokomotywach. Przy stosowaniu koła zamachowego oszczędność energii osiąga 31%. Działanie takiego magazynu energii również opiera się na odbieraniu energii hamowania i przekazywaniu jej do koła zamachowego. Następnie, podczas ruszania albo podjazdu pod wzniesienie, energia zgromadzona w kole jest odzyskiwana [3]. W ciężkich lokomotywach dalekobieżnych systemy takie się nie przyjęły. Wynika to z bardzo dużej masy lokomotywy, a co za tym idzie dużego zapotrzebowania na energię w trakcie ruszania oraz z bardzo małej częstotliwości hamowań. Innym przykładem wykorzystania FESS może być jedna z linii metra w Los Angeles. Firma VYCON zainstalowała na stacji metra system odzysku energii z hamowania pociagów. Pierwotnie podczas hamowania wytwarzana energia była odprowadzana tzw. trzecią szyną i zamieniana na ciepło w rezystorach hamowania. Obecnie ta sama energia zamieniana jest poprzez maszyne elektryczna na energie kinetyczna koła zamachowego HSFESS. W trakcie ruszania zestawu trakcyjnego następuje przesterowanie układu i pociąg odbiera energię poprzez trzecią szynę. W szczytowych godzinach natężenia ruchu zestawów metra oszczędności sięgają nawet 20%. Z krajowych rozwiązań, Polska firma MEGATECH TECHNOLOGY Sp. z o.o. na swojej stronie informuje o projekcie pt.: "Opracowanie wysokoobrotowego silnika PM BLDC jako magazynu energii kinetycznej wraz z elementami infrastruktury zapewniającej doładowywanie magazynu oraz szybkie odzyskiwanie energii i przetwarzanie jej do formy i parametrów pozwalających na efektywne wykorzystywanie przez standardowe urządzenia" (POIR.01.02.00-00-0326/16 z dnia 29.09.2017 r.) [4].

3. Opis koncepcji

3.1. Obliczenia wstępne

Z uwagi na wprowadzenie kinetycznych systemów magazynowania energii w obszarze przemysłowym, podjęto próbę analizy nad możliwością zastosowania tego typu systemu w gospodarstwach domowych. Na wstępie rozważano dwa przypadki FESS. Niskoobrotowy Kinetyczny Magazyn Energii (LSFESS – ang. Low Speed Flywheel Energy Storage System) z prędkością obrotową masy wirującej do 10 000 obr·min⁻¹ oraz Wysokoobrotowy Kinetyczny Magazyn Energii (HSFESS – ang. High Speed Flywheel Energy Storage System) o zakresie prędkości od około 10 000 obr·min⁻¹ do nawet powyżej 100 000 obr·min⁻¹. Za LSFESS przemawia fakt jego zdecydowanie prostszej konstrukcji, a co za tym idzie zdecydowanie niższych kosztów w stosunku do

Open Access (CC BY-NC 4.0)



HSFESS. Również urządzenia HSFESS są zwykle pięciokrotnie droższe od magazynów niskoobrotowych [5, 6].

Celem identyfikacji obszaru, w którym będzie dokonywany dobór podstawowych parametrów magazynu energii określono serie charakterystyk, które posłużyły do określenia maksymalnej prędkości obrotowej wirnika w odniesieniu do jego masy i średnicy.

Do określenia zakresu prędkości obrotowej masy wirującej przyjęto różnicę energii na początku pracy magazynu i energii końcowej magazynu:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \tag{1}$$

gdzie:

E1- energia początkowa magazynu, Ws,

E2- energia końcowa magazynu, Ws.

Po podstawieniu do zależności (1) wzoru na energię kinetyczną, wynikającą z prędkości kątowych uzyskamy:

$$\Delta E = \frac{I \cdot \omega_1^2}{2} - \frac{I \cdot \omega_2^2}{2} \tag{2}$$

gdzie:

I – moment bezwładności bryły wirującej, kgm²,

 ω_1 – początkowa prędkość kątowa bryły wirującej, rad s⁻¹,

 ω_2 – końcowa prędkość kątowa bryły wirującej, rad s⁻¹.

Aby wyznaczyć prędkość obrotową, przy której wirująca masa będzie miała zgromadzoną maksymalną ilość energii, określono zależność na podstawie wcześniej przedstwionego wzoru na energię kinetyczną oraz zależności na moment bezwładności *I* wirującej bryły:

$$I = \frac{m \cdot R^2}{2} \tag{3}$$

gdzie:

m – masa wirującej bryły, kg,

R – promień wirującej bryły, m,

oraz prędkości kątowej wirującej bryły:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \tag{4}$$

gdzie:

n – prędkość obrotowa bryły, obr \cdot s⁻¹.

Po uwzględnieniu zależności (3) i (4) we wzorze na energię kinetyczną wirującej masy, określono prędkość obrotową [obr·s⁻¹] bryły, przy której wirująca masa będzie miała zgromadzoną maksymalną ilość energii:

$$n_1 = \sqrt{\frac{E_1}{m \cdot (\pi \cdot R)^2}} \tag{5}$$

gdzie:

E₁ – początkowa (zgromadzona) energia kinetyczna, Ws,

m – masa bryły wirującej, kg,

R – promień bryły wirującej, m.

T.1.1.1



Celem określenia obszaru w jakim należy poszukiwać optymalnych parametrów wejściowych, przyjęto zakresy zmiennych dla utworzenia charakterystyk, które zestawiono w Tabeli 1.

		Tabela I
Parametr	Jednostka	Wartość
Ilość oddawanej energii, ΔE	kWh	2 ÷ 6
Rozpatrywany zakres mas bryły wirującej, m	kg	100 ÷ 1000
Zakres średnic wirującej bryły, R	mm	100 ÷ 800



Krzywe doboru wielkości kinetycznego magazynu energii $\Delta \text{E}\left[\text{kWh}\right]$ / D [mm] 6/800 - -6/700 980 6/600 --6/500 880 --6/400 - - 5/700 780 — · 5/600 ---5/500 680 - - 5/400 Masa wirująca [kg] -4/800 580 - - 4/700 - 4/600 ----4/500 480 - - 4/400 -3/800 380 - - 3/700 — · 3/600 280 ----3/500 -- 3/400 -2/800 180 - - 2/700 2/600 80 50000----2/500 0 5000 10000 15000 20000 25000 30000 35000 40000 45000 - - 2/400 Początkowe obroty masy n₁ [obr/min]

Rys. 2. Krzywe doboru podstawowych parametrów kinetycznego magazynu energii w pełnym zakresie przyjętych wartości

Na rysunku 2 przedstawiono zbiór charakterystyk obrazujących masę wirnika magazynu w funkcji obrotów dla poszczególnych pojemności magazynu energii oraz średnic masy wirującej. Biorąc pod uwagę założenie, iż magazyn powinien być prosty w swej formie i konstrukcji oraz ma być



magazynem wolnoobrotowym, powinien przechowywać w sobie ilość energii z zakresu 2÷6 kWh, określono przedział w jakim nastąpi dobór podstawowych parametrów. Dla $\Delta E = 6 kWh$ oraz obrotów minimalnych masy $n_2 = 1 550 obr \cdot min^{-1}$, określony został obszar doboru parametrów magazynu, który przedstawiono na rysunku 3. Dla takich warunków brzegowych dobrano maksymalne wartości obrotów $n_1 = 8 650 obr \cdot min^{-1}$, średnicę D = 800 mm oraz masę wirnika m = 680 kg.



Rys. 3. Wybrany fragment krzywych doboru podstawowych parametrów kinetycznego magazynu energii w zakresie obejmującym przyjęte założenia

3.2. Opis koncepcji

Zaproponowana konstrukcja jest w całości skręcana z części i podzespołów. Największym i najcięższym elementem urządzenia jest masa wirująca, którą w wyniku obliczeń sprawdzających zwiększono do wartości 890 kg.

Bazę urządzenia (rys. 4) tworzy skręcana rama, składająca się z trzech słupów (1), które łączą ze sobą podstawę (2) i zwornik (3). Do górnej płaszczyzny podstawy (2), przykręcony jest korpus (4) dolnego łożyska osiującego (5). Do spodniej płaszczyzny zwornika (3) przykręcony jest korpus górnego łożyska osiującego (6).





Rys. 4. Model 3D koncepcji Kinetycznego Magazynu Energii

Do górnej płaszczyzny zwornika przykręcony został kołnierz mocowania (7) sprzęgła elektromagnetycznego (8) oraz wspornik (9) maszyny elektrycznej (10). W spodniej części podstawy (2) zamocowane są stopki podporowe (11). W łożyskach osiujących (5 i 6) zamocowano masę wirującą (12), która ze sprzęgłem elektromagnetycznym (8) połączona jest za pomocą tulei. Do dolnego czopa masy wirującej przykręcony jest talerz (14) z zespołem magnesów trwałych. W podstawie przymocowany został talerz (16) z drugim kompletem magnesów trwałych. Oba te podzespoły tworzą łożysko oporowe, w którym nie występuje kontakt fizyczny części. Wytworzone siły pola magnetycznego powodują utrzymywanie masy wirującej na szczelinie powietrznej, co wydatnie podnosi sprawność takiego układu. Cała konstrukcja została osłonięta osłonami z litej blachy, podzielonymi na kilka części. Do spodniej płaszczyzny podstawy (2) przykręcona jest osłona dolna (18). Do górnej płaszczyzny zwornika (3) przykręcona została osłona górna (19). Komora z masą wirującą osłonięta została trzema blachami (20) na obwodzie. Maszynę elektryczną (10) osłonięto jedną osłoną w kształcie cylindra (21).

Po wstępnym zaprojektowaniu kształtu masy wirującej zostały przeprowadzone obliczenia weryfikujące ilość oddawanej energii. Na podstawie odczytanego z programu Inventor momentu bezwładności $I_y = 40,21 \text{ kg} \cdot m^2$ zamodelowanej bryły, określona została górna wartość energii od jakiej magazyn zacznie ją oddawać. Ze względu na zaproponowany kształt masy wirującej, jej promień został uśredniony do wartości 0,3 m. Tym samym początkowa prędkość obrotowa bryły zwiększyła się do wartości $n_1 = 10.081 \text{ obr} \cdot min^{-1}$. Po podstawieniu tych wartości do zależności (6):

gdzie:

$$E = \frac{I \cdot \omega^2}{2} \tag{6}$$

I - moment bezwładności zamodelowanej bryły odczytany w programie Inventor, kgm2,

 ω – maksymalna prędkość kątowa bryły 12 (Rys. 4.), rad s⁻¹,

Open Access (CC BY-NC 4.0)



uzyskano wynik E = 22409168,5 J = 6,22 kWh. Ze względu na dużą masę wirującą oraz duże wartości obrotów, weryfikacji poddano również wytrzymałość bryły na rozerwanie z zależności:

 $\sigma_m = \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \tag{7}$

gdzie:

 ρ – gęstość zastosowanego materiału wirującej bryły, kg/m³,

r – uśredniony promień bryły (ze względu na jej kształt), m,

 ω – prędkość kątowa bryły, rad s⁻¹.

Otrzymany wynik naprężeń $\sigma_m = 782,5 MPa$, wyklucza zastosowanie materiałów odlewanych takich jak żeliwa czy staliwa ze względu na zbyt niskie wartości wytrzymałości na rozciąganie. Bliższe zastosowaniu są niektóre stale stopowe konstrukcyjne, których wartości wytrzymałości na rozciąganie przekraczają wartości 1 000 MPa. Trzeba jednak pamiętać, że takie stale swoje wysokie parametry wytrzymałościowe osiągną po obróbce cieplnej, a prawidłowy proces obróbki cieplnej tak dużego elementu, będzie dużym wyzwaniem technologicznym. Wymagania wytrzymałościowe spełniają stopy tytanu, których granica plastyczności przekracza 1 000 MPa. Stosowanie ich jednak spowoduje spadek masy ($\rho = 4 600 \text{ kg/m}^3$), a tym samym konieczność wzrostu prędkości obrotwej wirującej masy celem zachowania założonej ilości energii.

Dla zamodelowanej bryły sprawdzono gęstość energii zgromadzonej w magazynie energii. W tym celu wykorzystano zależność (8), która uwzględnia kształt wirującej bryły. Wartości współczynnika kształtu zestawiono w Tabeli 2.

 $E_{sp} = K \cdot \frac{\sigma_m}{\rho}$

gdzie:

K – współczynnik kształtu bryły wirującej,

σ_m – naprężenia rozrywające, Pa,

 ρ – gęstość materiału zastosowanego na bryły, kg/m³.

Wartości współczynnika K dla wybranych kształtów brył wirujących [6, 7]

Tabela 2



(8)





Celem obliczenia gęstości energii zgromadzonej w masie wirującej o określonym w modelu kształcie, przyjęto wartość współczynnika K = 0,75 na podstawie trzech pierwszych wierszy w Tabeli 2. Po podstawieniu wartości do zależności (8) otrzymano:

$$E_{sp} = 20,9 \ Wh/kg$$

Obliczone powyżej wartości posłużyły jako wstępne parametry wejściowe dla dobrania maszyny elektrycznej. Do obliczeń przyjęto, że rozładowanie magazynu nastąpi w czasie $t_1 = 60 \text{ min}$ z prędkości początkowej $\omega_1 = 1055,75 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ do prędkości końcowej $\omega_2 = 189,6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Tym samym opóźnienie masy wirującej określone zostało według zależności:

$$\varepsilon_h = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t_1} \tag{9}$$

gdzie:

 ω_1 – prędkość kątowa, przy której rozpoczyna się oddawanie energii, rad s⁻¹,

 ω_2 – prędkość kątowa, przy której zakończy się oddawanie energii, rad s⁻¹,

t - czas w jakim ma nastąpić rozładowanie magazynu, s.

Otrzymano:

$$\varepsilon_h = \frac{1055,75 - 189,6}{3600} = 0,24 \ rad/s^2.$$

Czas rozpędzenia masy wirującej do nominalnej prędkości kątowej, przyjęto $t_2 = 150 \text{ min.}$ Rozpędzanie bryły do ω_1 odbywać się będzie z przyspieszeniem \mathcal{E}_r :

$$\varepsilon_r = \frac{\omega_1}{t_2} \tag{10}$$

gdzie:

 ω_1 – prędkość kątowa, przy której rozpoczyna się oddawanie energii, rad s⁻¹,

 $t_2 - czas w$ jakim wirnik osiągnie prędkość kątową ω_1 , s.

Zatem po podstawieniu do zależności (10) otrzymamy $\varepsilon_1 = \frac{1055,75}{9000} = 0,1173 \ rad/s^2$.

Aby osiągnąć prędkość kątową wirowania masy ω_1 w założonym czasie naładowania 150 min, maszyna elektryczna powinna dysponować momentem co najmniej 4,72 Nm.

Ze względu na to, iż analizowany magazyn jest wolnoobrotowy, będzie to determinowało jego zwiększone gabaryty i masę. Pod kątem wytrzymałościowym przeanalizowana została podstawa ramy, na której spierać się będzie całe urządzenie. Rama podparta jest w trzech punktach. Do analizy ramy wykorzystano Metodę Elementów Skończonych. Przeprowadzono ją w środowisku MES w programie Inventor. Założone obciążenie to 15 000 N.




Rys. 5. Mapa naprężeń podstawy ramy

Z przeprowadzonej analizy (rys. 5) wynika, że największe naprężenia występują w miejscu, w którym następuje zmiana krzywizny ramy – przejście płaszczyzny w promień. Zadaniem promienia jest zniwelowanie skupionych naprężeń na ostrej krawędzi, która powstała z przecięcia się płaszczyzny, na której mocowane są stopki (11, rys. 4) z powierzchnią stożka. Wartość naprężeń odczytanych w tym obszarze wynosi 52,3 MPa. Współczynnik bezpieczeństwa dla tego obszaru wynosi 4 co świadczy, że podpora powinna przenieść założone obciążenie.

3.3. Obliczenia siły osiowej w projektowanym łożysku magnetycznym

Celem obniżenia oporów pracy w trakcie wirowania zastosowano łożysko magnetyczne, zbudowane z magnesów trwałych. Przekrój przez łożysko magnetyczne, pełniące rolę łożyska oporowego, w którym uwidoczniono układ magnesów trwałych przedstawia rysunek 6. Rysunek węzła łożyskowego, posłużył do obliczenia siły podporowej, generowanej przez zespół magnesów trwałych łożyska.



Rys. 6. Wymiary przekroju przez zespół łożyska magnetycznego



Przekrój na rysunku 6 wykorzystano budując postać geometryczną, numerycznego modelu łożyska magnetycznego, utworzoną w programie FEM 4.2. Program ten umożliwia obliczenia natężeń linii pola magnetycznego oraz sił odziaływań dla modeli płaskich o zadanej grubości.

Na rysunku 7 przedstawiono cyfrowy model obliczeniowy z kierunkami biegunów magnetycznych dla poszczególnych magnesów trwałych oraz siatkę elementów skończonych. Magnesy w tarczy ułożone są naprzemiennie parami magnetycznymi. Magnesy są wykonane z Neodymu N42. Naprzemienne ułożenie par kilkukrotnie zwiększy siłę oddziaływania między tarczami łożyska.



Rys. 7. Model obliczeniowy z kierunkiem biegunów magnetycznych opracowany w programie FEM 4.2

Wyniki obliczeń numerycznych w postaci mapy z natężeniem pola magnetycznego oraz liniami sił przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Rozkład linii sił pola magnetycznego na tle mapy natężenia pola magnetycznego w łożysku magnetycznym

Na rysunku 9 przedstawiono symulację siły odziaływującej na górną tarczę (zaznaczoną kolorem zielonym). Obliczona siła odziaływania wynosząca 71,3 N odpowiada warstwie magnesów o grubości 1 mm.





Rys. 9. Siła odziaływania między tarczami łożyska magnetycznego dla grubości warstwy magnetycznej 1 mm

Obliczoną siłę dla warstwy o grubości 1mm, zwielokrotniono o grubość zastosowanych magnesów trwałych. Wartość siły w łożysku magnetycznym wyniesie ok. 30,2 kN. Jest to wartość siły pola magnetycznego dla szczeliny 6 mm. Siła ta jest wystarczająca dla projektowanego łożyska obciążonego wirnikiem. Dla wartości obciążenia wynoszącej 10 kN przerwa między tarczami zwiększy się do ok. 10 mm.

4. Podsumowanie

Koncepcja wolnoobrotowego kinetycznego magazynu energii – LSFESS wypełnia istotną lukę w zakresie magazynów energii dedykowanych do indywidualnych gospodarstw domowych. W przypadku zastosowań prosumenckich wysokoobrotowe magazyny energii, użytkowane w warunkach przemysłowych mają bowiem znaczące niedogodności dotyczące bardzo wysokich kosztów eksploatacji i skomplikowanej obsługi [8, 9].

Wymiary gabarytowe LSFESS opracowanego zgodnie z przedstawioną koncepcją umożliwiają jego przemieszczanie przez standardowe przejścia i przejazdy oraz umieszczanie w przestrzeniach, które nie wymagają specjalnego przygotowania. Jedynym problemem w tym przypadku jest masa całkowita urządzenia, większa od 1 000 kg. W LSFESS występuje również zdecydowanie bardziej prosty w obsłudze i kompaktowy system sterowania i nadzoru nad pracą urządzenia. Urządzenie z założenia ma być bezobsługowe ze strony potencjalnego użytkownika. Powinno jednak podlegać corocznemu przeglądowi technicznemu przeprowadzanemu przez wyspecjalizowany serwis.

Gęstość energii zgromadzona w zaproponowanym rozwiązaniu wynosi blisko 21 Wh/kg. W przypadku magazynów wolnoobrotowych, gdzie wirniki wykonuje się najczęściej jako stalowe [4] dla wirujących mas stalowych można maksymalnie osiągnąć ok. 40 Wh/kg. Można zatem wnioskować, że należy przeprowadzić bardziej szczegółowe prace nad kształtem oraz masą wirnika, aby osiągnąć wyższą gęstość energii. Jednakże dla założonych parametrów magazynu może się to okazać trudne do osiągnięcia.

Literatura

 Volvo Cars. Volvo Cars Tests of Flywheel Technology Confirm Fuel Savings of Up to 25 Percent. 2013. https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/pressreleases/48800 (dostęp 28 września 2022).



- 2. https://www.car-engineer.com/flywheel-technology-tested-on-volvo-s60-shows-important-fuel-savings/ (dostęp 28 września 2022).
- 3. https://www.railwayage.com/passenger/rapid-transit/la-metro-vycon-wess-system-saving-energy/ (dostęp 21 października 2021).
- 4. https://mttechnology.pl/ (dostęp 26 lipca 2022).
- 5. Olabi A., Wilberforce T., Abdelkareem M., Ramadan M. Critical Review of Flywheel Energy Storage System. Energies 2021, 14, 2159, str. 29-33. DOI: 10.3390/en-14082159.
- 6. Östergård R. Flywheel energy storage a conceptual study. Uppsala Universitet 2011.
- Ertz G., Twiefel J., Krack M. Feasibility Study for Small Scaling Flywheel-Energy-Storage Systems in Energy Harvesting Systems. Energy Harvesting and Systems 2014 1(3-4): ss. 233–241. DOI: 10.1515/ehs-2013-0010
- 8. Hedlund M., Lundin J., Santiago J., Abrahamsson J., Bernhoff H. Flywheel Energy Storage for Automotive Applications. Energies 2015, 8, str. 10636-10663. DOI: 10.3390/en-81010636
- Khandoker H., Hawkins S. C., Ibrahim R., Huynh C. P., Deng F., Tensile strength of spinnable multiwall carbon nanotubes. Science Direct. Engineering Procedia 10 (2011) 2572-2578 DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.424



https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.4

Badania laboratoryjne mieszalnika systemu UCT

Piotr Dobrzaniecki – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Artur Tarkowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Marek Kalita – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Tomasz Sinka – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Piotr Chondrokostas – 3N Solutions Sp. z o.o. Bartlomiej Janik – 3N Solutions Sp. z o.o. Marek Obrębski – 3N Solutions Sp. z o.o.

Streszczenie: System UCT (underground cleaning technology), oparty na technologii czyszczenia suchym lodem, stosowany przez firmę 3N Solutions, to zestaw urządzeń pozwalający bezpiecznie realizować proces czyszczenia w warunkach kopalń węgla kamiennego w atmosferze zagrożonej wybuchem. Efektem projektu, który KOMAG i 3N Solutions realizuje od 2021 roku, była dokumentacja techniczna każdego z urządzeń systemu UCT. Po fazie produkcyjnej nowe urządzenia trafiły do laboratorium w celu przetestowania. Ten rozdział dotyczy mieszalnika UCT - urządzenia, które przygotowuje mieszankę pokruszonego suchego lodu i sprężonego powietrza. Mieszaninę rozprowadza się na czyszczonej powierzchni za pomocą dyszy. W rozdziale opisano przebieg badań laboratoryjnych mieszalnika firmy UCT. Zawiera również założenia procedur testowych, opis testów i ich wyniki.

Słowa kluczowe: czyszczenie suchym lodem, przemysłowe metody czyszczenia z użyciem suchego lodu, sublimacja CO₂

Laboratory tests of the UCT system's mixer

Abstract: The UCT system (underground cleaning technology), based on cleaning technology using dry ice and used by 3N Solutions company, is a set of devices that allows safely realizing the cleaning process in coal mines conditions in an explosion hazard atmosphere. The effects of a project, which KOMAG and 3N Solutions have realized since 2021, were technical documentation of each device of UCT's system. After the production phase, the new devices have sent to the laboratory for testing. This chapter is related to UCT's mixer - a device that prepares a mixture of crumbled dry ice and compressed air. The mixture is distributed on a cleaned surface using a nozzle. The chapter describes the process of laboratory tests of UCT's mixer. It also contains an assumption of test procedures, a description of tests, and their results.

Keywords: dry ice blasting, industrial cleaning method by using solid CO₂ (dry ice), CO₂ sublimation

1. Wprowadzenie

Mieszalnik, którego badania opisano w niniejszym rozdziale, jest jednym z urządzeń tworzących system UCT (ang. *underground cleaning technology*) – zespół urządzeń do realizacji procesu czyszczenia przy użyciu mieszaniny czyszczącej, która składa się z drobin suchego lodu (zestalonego CO₂) i sprężonego powietrza. System UCT jest ewolucją stosowanej przez firmę 3N Solutions Sp. z o.o.



technologii czyszczenia urządzeń przemysłowych, w tym urządzeń elektrycznych, również pod napięciem. W ramach projektu realizowanego wspólnie przez 3N Solutions Sp. z o.o. i ITG KOMAG powstały rozwiązania poszczególnych urządzeń systemu, w tym omawiany w rozdziale mieszalnik. Należy zaznaczyć, że omawiany system nie jest przewidziany do czyszczenia urządzeń elektrycznych pod napięciem.





Rys. 1. System UCT [1]

W niniejszym rozdziale przedstawiono obiekt badań oraz przedstawiono zakres oraz wyniki prób i testów laboratoryjnych. Rozdział jest kontynuacją omawiania technologii UCT, zapoczątkowanej w [2]. Oprócz szerszego omówienia podstaw związanych z procesem czyszczenia suchym lodem, przedstawiono w nim zalety tej technologii, wstępne założenia dotyczących systemu przeznaczonego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, a także wyniki pierwszych prac badawczych, zrealizowanych w celu określenia warunków brzegowych do procesu projektowania.

2. Obiekt badań

Obiektem badań był mieszalnik, w którym następuje ostateczna faza przygotowania mieszanki czyszczącej. Badaniom został poddany egzemplarz badawczy mieszalnika, który jest prototypem urządzenia, przystosowanym do prowadzenia prac badawczych przy zachowaniu docelowej funkcjonalności.

3. Stanowisko badawcze

Obiekt badań – mieszalnik – ustawiono na hali badawczej ITG KOMAG i podłączono do źródeł energii: elektrycznej i pneumatycznej. Pelet zestalonego CO₂ przechowywano w specjalnym, izolowanym termicznie pojemniku, a wymagane w procesie badawczym porcje pobierano na bieżąco i dostarczano bezpośrednio przed wykonaniem danej próby. Miało to na celu zachowanie możliwie najlepszych właściwości peletu (ograniczenie dostępu do wilgoci, zbrylania się).

Schemat stanowiska badawczego i rozmieszczenie poszczególnych elementów badanego układu przedstawiono na rysunku 2.





Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego i rozmieszczenie poszczególnych elementów badanego układu na hali badawczej ITG KOMAG

Mieszalnik podłączono do źródła energii elektrycznej poprzez szafę wyposażenia elektrycznego systemu UCT (rys. 3).



Rys. 3. Szafa wyposażenia elektrycznego systemu UCT [4]

Z szafy poprowadzono do mieszalnika przewody układu zasilania oraz sterowania. Z mieszalnika do dyszy prowadził przewód pneumatyczny oraz przewód sterowania. Jako źródło energii pneumatycznej zastosowano zespół sprężarki i osuszacza zlokalizowany w samochodzie technicznym dostarczonym przez firmę 3N Solutions Sp. z o.o. Przewód z zespołu sprężarki i osuszacza, przez rotametr (rys. 4) podłączono do mieszalnika.

Open Access (CC BY-NC 4.0)





Rys. 4. Rotametr w układzie pneumatycznym [4]

4. Badania funkcjonalne

Badania były prowadzone według opracowanej metodyki, uwzględniającej zarówno weryfikację uzyskiwanych przez urządzenie parametrów technicznych, jak i funkcjonalności zastosowanych rozwiązań technicznych. Wyniki prac badawczych zawarto w [3, 4, 5].

4.1. Badania rozkładu wielkości cząstek

Cykl badań rozpoczęto od badań rozkładu wielkości cząstek fazy stałej w strumieniu opuszczającym dyszę. Do tego celu użyto analizatora Spraytec model STP5392 (rys. 5).



Rys. 5. Analizator Spraytec STP5392 [4]

Badania rozkładu wielkości drobin fazy stałej CO₂ opuszczającej dyszę prowadzono według następującej procedury: przy ustalonej nastawie ciśnienia w układzie mieszalnika, zmieniano nastawy potencjometru odpowiedzialnego za prędkość obrotową silnika napędowego mieszalnika, co



zmieniało prędkość obrotów tarczy podającej pelet CO₂. Zwiększanie prędkości obrotowej silnika skutkowało wzrostem intensywności podawania drobin suchego lodu zasilającego dyszę.

Podczas badań, w celu dopasowania się do charakteru pracy analizatora, dyszę ustawiono w pozycji jak pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Ustawienie dyszy względem układu detekcji analizatora [4]

Na potrzeby opisywanych badań, do przygotowania wykresu określającego parametry strumienia czyszczącego (rys. 7), zdecydowano się posługiwać średnicą Sautera ("D [3, 2]" na wykresie) jako parametrem najlepiej charakteryzującym rozdrobnienie fazy stałej w strumieniu czyszczącym.



Rys. 7. Wartości średnic zastępczych D [3, 2] (Sautera) drobin fazy stałej (CO₂) w strumieniu czyszczącym w zależności od ciśnienia i obrotów silnika



4.2. Badania zapotrzebowania mieszalnika na powietrze

W ramach prac przeprowadzono również badania mające na celu określenie zapotrzebowania mieszalnika na powietrze. Podczas badań odczytywano wartość przepływu wskazywaną przez rotametr zainstalowany w układzie pneumatycznym oraz wartości ciśnienia powietrza zasilającego mieszalnik. Badania prowadzono dla różnych nastaw ciśnienia układu pneumatycznego mieszalnika.

W efekcie prób uzyskano wyniki, które zaprezentowano w postaci graficznej na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Zapotrzebowanie mieszalnika na powietrze



Rys. 9. Ciśnienie zasilania mieszalnika sprężonym powietrzem (wydajność źródła)

4.3. Badania wydajności masowej mieszalnika

Kolejnym elementem przeprowadzonych prac badawczych było określenie wydajności masowej mieszalnika. Badanie to polegało na określeniu czasu potrzebnego na zużycie określonej porcji zestalonego CO₂ przy określonych wartościach ciśnienia w układzie pneumatycznym mieszalnika oraz nastawie prędkości obrotowej silnika układu napędowego mieszalnika.





W efekcie prób otrzymano wyniki przedstawione na rysunku 10.



p=2 bary		
nastawa silnika	czas	
n=1	10:01	
n=2	5:45	
n=3	3:53	
n=4	3:07	
n=5	2:33	
n=6	2:07	
n=7	1:52	
n=8	1:41	
n=9	1:37	
n=10	1:38	
p=3 bary		
p=3	bary	
p=3 nastawa silnika	bary czas	
p=3 nastawa silnika n=1	bary czas 12:02	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2	bary czas 12:02 6:01	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2 n=3	bary czas 12:02 6:01 4:10	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2 n=3 n=4	bary czas 12:02 6:01 4:10 2:52	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2 n=3 n=4 n=5	czas 12:02 6:01 4:10 2:52 2:23	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2 n=3 n=4 n=5 n=6	czas 12:02 6:01 4:10 2:52 2:23 2:21	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2 n=3 n=4 n=5 n=6 n=7	czas 12:02 6:01 4:10 2:52 2:23 2:21 2:05	
p=3 nastawa silnika n=1 n=2 n=3 n=4 n=5 n=6 n=7 n=8	bary czas 12:02 6:01 4:10 2:52 2:23 2:21 2:05 1:51	
nastawa silnika n=1 n=2 n=3 n=4 n=5 n=6 n=7 n=8 n=9	czas 12:02 6:01 4:10 2:52 2:23 2:21 2:05 1:51 1:43	





p=4 bary		
nastawa silnika	czas	
n=3	4:30	
n=4	3:15	
n=5	2:41	
n=6	2:17	
n=10	1:56	

p=4.5 bara			
nastawa silnika	czas		
n=3	4:23		
n=4	3:25		
n=5	2:47		
n=6	2:37		
n=10	2:02		

Rys. 10. Wydajność masowa mieszalnika [4]



Brak wyników przy nastawie ciśnienia równej 4 i 4,5 bara wynika z faktu, że proces czyszczenia odbywa się najczęściej przy ciśnieniu 2 lub 3 bary, w pełnym zakresie prędkości obrotowej silnika. Przy ciśnieniu 4 i 4,5 bara zdecydowano się sprawdzić urządzenie przy prędkości obrotowej silnika w zakresie od 3 do 6 oraz przy maksymalnej nastawie prędkości obrotowej (10), z uwagi na brak stosowania w praktyce nastaw pominiętych w badaniach.

4.4. Badania wpływu parametrów pracy mieszalnika na efektywność czyszczenia

Badanie miało na celu sprawdzenie w jaki sposób zmiana parametrów regulacyjnych mieszalnika wpływa na proces czyszczenia zabrudzeń na powierzchni kontrolnej. Powierzchnią kontrolną były płytki ceramiczne, pokryte warstwą gładzi gipsowej. Przykładową płytkę testową pokazano na rysunku 11.



Rys. 11. Płytka do testów efektywności procesu czyszczenia [4]

Płytki użyte do badań miały wymiary 330x330x5 mm. Badania polegały na:

- zważeniu i zapisaniu masy płytki przed czyszczeniem (m_{p(1)} w tabelach na rysunku 13),
- poddaniu płytki procesowi czyszczenia z rejestracją czasu czyszczenia (t_c w tabelach na rysunku 13),
- zważeniu i zapisaniu masy płytki po czyszczeniu ($m_{p(2)}$ w tabelach na rysunku 13).

Do ważenia użyto wagi laboratoryjnej, pokazanej na rysunku 12.



Rys. 12. Waga laboratoryjna Steinberg Systems SBS-LW-7500A LCD [4]





p=4 bary 400 5 i 300 2 200 4 5 5 6 nastawa obrotów silnika **p=4.5 bara** 5 i 300 4 astawa obrotów silnika

4 bary р 2 bary р 4 5 6 n n 4 5 6 2109,2 g 2089,6 g mp(1) 2116,4 g **m**_{p(1)} 2089,3 g 2065,3 g 2061,7 g 1911,3 g mp(2) 1925,8 g 1910,7 g 1909 g m_{p(2)} 1930,2 g 1914,5 g 4 min tc 9 min 6 s 6 min 7 s 4 min 9 s tc 6 min 1 s 3 min 9 s 23 s

			P		
р	3 bary			p	4.5 bara
n	4	5	6	n	10
mp(1)	2100 g	2092,2 g	2069,9 g	mn(1)	2078 5 g
mp(2)	1927 g	1910,8 g	1915,7 g	mp(1)	1914 5 g
tc	4 min	4 min	3 min	tc	5 min 15 s
	34 5	115	32.5		

Rys. 13. Wyniki badań czasu trwania procesu czyszczenia w zależności od nastaw mieszalnika [4]

4.5. Badania zjawisk związanych z gromadzeniem ładunków

Jednym z rozważanych zagadnień było potencjalne gromadzenie się ładunków elektrostatycznych na powierzchniach mieszalnika w trakcie jego pracy. W trakcie badań przeprowadzono testy elektryzowania się urządzenia podczas pracy.

Do pomiarów potencjalnego ładunku użyto kulombomierza Schnier HMG 11/02 (rys. 14).





Rys. 14. Kulombomierz Schnier HMG 11/02 [4]

Badania przeprowadzono przy następujących stałych nastawach mieszalnika:

- ciśnienie w układzie pneumatycznym mieszalnika 4,5 bara,
- prędkość obrotowa silnika, nastawa n=10.

oraz przy dwóch ustawieniach urządzenia:

- koła bezpośrednio na posadzce hali badawczej,
- koła na macie izolacyjnej (rys. 15).



Rys. 15. Mieszalnik ustawiony na macie izolującej [4]

Przewód masowy kulombomierza podłączono do punktu masy zlokalizowanego w szafie energetycznej, zasilającej urządzenie.

Badaniami objęto całe urządzenie: korpus, elementy układu przygotowania mieszanki, instalacje elektryczna i pneumatyczna. Przykłady pomiarów pokazano na rysunku 16.



Rys. 16. Badania występowania ładunków na elementach korpusu mieszalnika [4]



Największy ładunek, o wartości 24 nC, wystąpił na złączce wyjściowej przewodu pneumatycznego przy mieszalniku. W pozostałych miejscach objętych sprawdzeniem stwierdzano obecność ładunków o wartościach pomiędzy kilka, a kilkanaście nC.

W przypadku mieszalnika ustawionego na macie izolacyjnej elektrostatyczność w badanych miejscach była na zbliżonym poziomie.

5. Wnioski po badaniach funkcjonalnych

Po przeprowadzeniu opisanych w rozdziale prac badawczych, dotyczących konstrukcji mechanicznej mieszalnika oraz skuteczności działania poszczególnych jego podzespołów stwierdzono:

- działanie układów egzemplarza badawczego mieszalnika jest zgodne z założeniami,
- badania stopnia rozdrobnienia cząstek fazy stałej mieszaniny czyszczącej za pomocą analizatora Spraytec umożliwiły określenie parametrów geometrycznych cząstek zestalonego CO₂ po opuszczeniu dyszy, co w trakcie dalszych prac projektowych pozwoli na dokonanie porównania efektów zmian wprowadzonych do konstrukcji układu przygotowania suchego lodu w mieszalniku lub dyszy,
- maksymalna wartość ciśnienia w układzie pneumatycznym podczas pracy mieszalnika/dyszy, nie przekraczała 4,5 bara (przy ciśnieniu zasilania z kompresora równym 10 bar) z uwagi na zastosowany typ dyszy, która powodowała duży spadek ciśnienia w układzie,
- ograniczenie możliwego do uzyskania maksymalnego ciśnienia 4,5 bara nie powoduje obniżenia funkcjonalności urządzenia,
- wydajność masowa mieszalnika nie ma charakteru liniowego, niezależnie od nastawy ciśnienia,
- testy czyszczenia miały charakter jedynie poglądowy i mogą posłużyć do porównania wydajności testowanego mieszalnika z dotychczas stosowanymi urządzeniami,
- podczas testów gromadzenia się ładunków elektrostatycznych na powierzchniach konstrukcji mieszalnika, przewodów oraz szafy wyposażenia elektrycznego stwierdzono ich obecność maksymalny zarejestrowany ładunek miał wartość 24 nC (złączka przewodu pneumatycznego); norma PN-EN IEC 60079-0:2018-09 w pkt. 7.4.2, w tablicy 10 określa maksymalny dopuszczalny ładunek przenoszony na 60 nC dla urządzeń grupy I lub IIA [6],
- nie stwierdzono gromadzenia się ładunku na dyszy czyszczącej.

6. Podsumowanie

Technologia czyszczenia wykorzystującego suchy lód (scalone CO₂) z powodzeniem wykorzystywana jest w przemyśle do czyszczenia urządzeń elektroenergetycznych. Główną jej zaletą jest możliwość czyszczenia tych urządzeń również pod napięciem, co ogranicza przerwy z zasilaniu zakładów produkcyjnych. Technologia ta może być z powodzeniem zastosowana również do urządzeń eksploatowanych w wyrobiskach górniczych. Wymaga to jednak dostosowania konstrukcji urządzeń systemu do szczególnych wymagań tej branży przemysłu. Firma 3N Solutions Sp. z o.o. wspólnie z Instytutem KOMAG opracowała urządzenia systemu czyszczenia scalonym CO₂ do eksploatacji w górnictwie, w szczególności w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Należy jednak mieć na uwadze, że system UCT w wykonaniu górniczym nie jest przewidziany do użytkowania go podczas realizacji procesu czyszczenia urządzeń elektrycznych pod napięciem.

Open Access (CC BY-NC 4.0)



W trakcie przeprowadzonych badań zrealizowano prace zgodnie z założeniami programu badawczego oraz wytycznymi przyszłego użytkownika systemu czyszczenia. Przeprowadzone badania potwierdziły spełnienie założeń konstrukcyjnych zdefiniowanych na potrzeby projektowania mieszalnika i potwierdziły gotowość jego konstrukcji do zastosowania w podziemnym wyrobisku górniczym w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

Literatura

- 1. Dokumentacja techniczna systemu czyszczenia i konserwacji urządzeń UCT nr W90.389 (praca niepublikowana)
- Dobrzaniecki P. i inni: Technologia czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w warunkach górniczych z zastosowaniem suchych gazów. KOMTECH – Innowacje techniki i technologie w dobie zielonej transformacji, Gliwice 2021, s. 126-138
- 3. Program prób i badań systemu czyszczenia i konserwacji urządzeń UCT nr W90.389AY (praca niepublikowana)
- 4. Badania zespołu przygotowania sprężonego powietrza oraz mieszalnika pod kątem weryfikacji osiągniętych parametrów technicznych sprawozdanie z badań nr 167/BT/2021 (praca niepublikowana)
- 5. Sprawozdanie z badań i prób funkcjonalnych mieszalnika systemu UCT nr W90.389BY (praca niepublikowana)
- 6. Norma PN-EN IEC 60079-0:2018-09 Atmosfery wybuchowe Część 0: Urządzenia Podstawowe wymagania



https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.5

Przegląd literatury pod kątem przyszłego programu badań dotyczącego analizy śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych

Rafał Baron – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Piotr Matusiak – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Aleksander Lutyński – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Marcin Lutyński – Politechnika Ślaska

Streszczenie: W rozdziale zaprezentowany został przegląd literatury oraz zakres przyszłych prac związanych z analizą śladu węglowego produkcji magnesów neodymowych do generatorów turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Zakres tematyczny opracowanego programu badań obejmować będzie przeprowadzenie kompleksowej analizy śladu węglowego generatora turbin wiatrowych (metoda od kołyski aż po grób, z uwzględnieniem recyklingu magnesów neodymowych). Zespół roboczy turbiny wiatrowej, na podstawie opracowanej metodyki demontażu, zostanie zdekompletowany celem zebrania danych o materiałach, elementach będących składowymi zespołu. Na tej podstawie zostanie określona charakterystyka strukturalna oraz ilościowa poszczególnych elementów składowych, a następnie ich ślad węglowy. Prace w założeniu mają na celu określenie śladu węglowego analizowanych podzespołów oraz podjęcie działań ograniczających emisję CO₂.

Słowa kluczowe: analiza śladu węglowego, magnesy neodymowe, turbiny wiatrowe, gospodarka obiegu zamkniętego

Literature review for future research work on analysis of the carbon footprint in manufacture of neodymium magnets

Abstract: The chapter presents the scope of work related to the analysis of carbon footprint in production of neodymium magnets for wind turbine generators, taking into account the principles of circular economy. The scope of testing program includes comprehensive carbon footprint analysis of the life cycle of neodymium magnets for wind turbine generators. The wind turbine working unit using the developed disassembly methodology, will be disassembled to collect data on the materials and components of the unit. On this basis, the structural and quantitative characteristics of each component as well as the carbon footprint will be determined. The research work is intended to determine the carbon footprint of the analyzed components and to take measures to reduce the CO_2 emission.

Keywords: carbon footprint analysis, neodymium magnets, wind turbines, circular economy

1. Wprowadzenie

Obecnie trwająca transformacja energetyczna uwzględnia szereg skutków wynikających z produkcji i późniejszej eksploatacji turbin wiatrowych. Żywotność turbin wiatrowych, wynosi około 20-25 lat. Szacując, że do 2023 r. na całym świecie wycofanych zostanie około 14 000 turbin, o łącznej masie na poziomie 40 000 – 60 000 ton. Ze względu na zmianę generacji turbin wiatrowych (na posiadającą wyższą sprawność), liczba turbin wiatrowych zmniejszy się o jedną trzecią [1]. Konieczne zatem będzie przeprowadzenie procesu recyklingu dla znacznej ilości zużytej elektroniki. Obecnie około 80% masy podzespołów elektrowni wiatrowej poddawana jest recyklingowi, głównie są to stalowe elementy konstrukcyjne fundamentu, elementy gondoli, czy wieża. Powyższe uwarunkowania wymuszają opracowanie technologii recyklingu elementów zebranych wokół zespołu

Open Access (CC BY-NC 4.0)



roboczego turbiny wiatrowej. Przeprowadzenie recyklingu niesie za sobą kosztowne oraz energochłonne procesy, ale co istotne proces ten może ograniczyć ślad węglowy życia danego produktu [1, 2].

W związku z perspektywą transformacji energetycznej i odejścia od energetyki opartej na węglu, przez ostatnie lata ITG KOMAG, opracował liczne projekty związane z odnawialnymi źródłami energii (OZE). Projekty uwzględniały między innymi działania z zakresu recyklingu paneli fotowoltaicznych. We współpracy z Politechniką Śląską, realizowane są liczne projekty badawcze z zakresu ochrony środowiska, rekultywacji terenów zdegradowanych działalnością górniczą oraz innowacyjnego podejścia do wzbogacania węgla kamiennego i kruszyw mineralnych [3, 4, 5, 6, 7]. Efektem prowadzonych działań są publikacje naukowe poświęcone zagadnieniom "zielonej" energii.

Celem programu jest opracowanie algorytmu wyznaczania śladu węglowego dla generatora turbin wiatrowych z uwzględnieniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), który zostanie wykorzystany w innych urządzeniach projektowanych w ramach prac badawczo-rozwojowych przez Instytut. Pozwoli to na wyznaczenie śladu węglowego urządzeń stosowanych w przemyśle polskiego górnictwa węgla kamiennego. Realizacja pracy przyczyni się również do rozszerzenia wiedzy z zakresu ochrony środowiska i mechanizmów GOZ.

Pierwszy etap prac polegał w głównej mierze na przeglądzie literaturowym dotyczącym tematyki podejmowanego zagadnienia harmonogramu prac oraz wyznaczenie metodyki postępowania dla realizowanego programu badawczego.

2. Turbiny wiatrowe

Transformacja energetyczna z gospodarki opartej na węglu na gospodarkę niskoemisyjną wymaga coraz powszechniejszego zastosowania OZE, w tym turbin wiatrowych, których udział w produkcji energii elektrycznej w Polsce (sierpień 2022 r.) osiągnął ponad 5% [8]. Polskie farmy wiatrowe są stosunkowo młode i stanęły przed problemem recyklingu elementów turbin wiatrowych. Realizowane w ramach pracy analizy pozwolą nakreślić prawidłowy sposób gospodarowania odpadów z przemysłu energetycznego, z zastosowaniem zasad GOZ. Wyznaczenie śladu węglowego poszczególnych składowych zespołu roboczego turbiny wiatrowej, poprzez określenie elementów szkodliwie oddziałujących na środowisko oraz recykling ze szczególnym naciskiem na odzysk REE (rare earth elements), bezpośrednio wpłynie na eliminację negatywnych oddziaływań.

Turbiny wiatrowe, składają się z następujących elementów (rys. 1):

- wirnik,
- gondola,
- wieża,
- fundament.

Podział ze względu na budowę turbin wiatrowych, związaną z usytuowaniem turbiny względem osi obrotu:

- turbiny o pionowej osi obrotu,
- turbiny śmigłowe o poziomej osi obrotu [1, 9, 10, 11].





Rys. 1. Budowa elektrowni wiatrowej o poziomej osi obrotu [12, opracowanie własne]

Najważniejszym elementem turbiny wiatrowej jest wirnik, dokonujący zamianę energii wiatru na energię mechaniczną (rys. 2). Na wale osadzony jest wirnik, który napędza generator. W piaście wirnika znajduje się serwomechanizm umożliwiający ustawienie kąta nachylenia łopat (najcześciej stosowane są wirniki trójpłatowe). Na szczycie wieży znajduje się gondola, która ma możliwość obrotu o 360° za pomocą serwomechanizmu, umożliwiając ustawienie turbiny wiatrowej zgodnie z kierunkiem wiatru, w celu uzyskania maksymalnej wydajności [13, 14].



Rys. 2. Zamiana energii wiatru na energię mechaniczną w turbinie wiatrowej [14]



W turbinach wiatrowych wykorzystywane są dwa typy generatorów – synchroniczne lub asynchroniczne.

Generatory synchronicznenie (rys. 3) nie posiadają przekładni, będąc bezpośrednio połączone z wirnikiem turbiny. Ze względu na brak przekładni, a co za tym idzie niewielką prędkość obrotową koła wiatrakowego (max 40 obr/min), generatory tego typu posiadają dużą liczbę par biegunów (do 40 i więcej) [14, 15].

Generatory asynchroniczne (rys. 4) obracają się z prędkością synchroniczną wynoszącą 750 i 1500 obr/min. Celem dostosowania prędkości wirowania maszyny asynchronicznej do prękości obrotowej koła wiatrakowego, wykorzystywane są przekładnie mechaniczne (przełożenie 60x) [14, 16].



Rys. 3. Generator synchroniczny [14]

Rys. 4. Generator asynchroniczny [14]

3. Magnesy neodymowe i pierwiaski ziem rzadkich

W asynchronicznych generatorach turbin wiatrowych wykorzystywane są magnesy neodymowe, należące do rodziny magnesów ziem rzadkich. Są one najsilniejszymi magnesami trwałymi na świecie. Nazywane są również magnesami NdFeB lub NIB, ponieważ składają się głównie z neodymu (Nd), żelaza (Fe) i boru (B). Są stosunkowo nowym wynalazkiem i dopiero niedawno stały się dostępne dla codziennego użytku [17].

Generator w turbinie wiatrowej wykorzystuje zjawisko indukcji magnetycznej. W generatorze znajduje się wirnik z magnesami neodymowymi na statorze. Magnesy te wytwarzają stałe pole elektromagnetyczne. Nieruchome linie tego pola pod wpływem ruchu wirnika (napędzanego siłą wirnika), zostają przerwane, dzięki czemu możliwa jest zamiana energii mechanicznej na energię elektryczną [18].

Pierwiastki ziem rzadkich (zawarte w turbinach wiatrowych) ze względu na swoją wartość rynkową, znajdują się na unijnej liście trzydziestu surowców o krytycznym znaczeniu strategicznym w perspektywie rozwoju zaawansowanych technologii [19]. Z prognoz analityków rynku surowcowego wynika, iż zapotrzebowanie na pierwiastki ziem rzadkich w najbliższych latach będzie rosło, przewyższając popyt na jakikolwiek inny surowiec, podwajając się do 2060 r. [20].



W nowoczesnych turbinach wiatrowych stosowane są magnesy neodymowe (Nd2Fe14B), w skład których wchodzą cenne pierwiastki ziem rzadkich (REE – rare earth elements: neodym dysproz, prazeodym), posiadające kluczowe znaczenie w perspektywie nowoczesnych technologii. W związku z tym istnieje potrzeba opracowania efektywnych metod odzysku tychże pierwiastków, przy uwzględnieniu śladu węglowego, biorąc pod uwagę cały cykl życia produktu (generatora turbiny wiatrowej) [21, 22].

4. Gospodarka o obiegu zamkniętym

Zasady GOZ zakładają minimalizację zużycia surowców oraz powstawania odpadów, przy jednoczesnej redukcji emisji i wykorzystania energii w zamkniętej pętli procesowej. Założenia tego modelu gospodarczego wpisują się w strategię Europejskiego Zielonego Ładu (Green Deal), którego celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. [23, 24].

Program badawczy będzie realizowany z uwzględnieniem zasad Krajowej Inteligentnej Specjalizacji Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (KIS GOZ). Wskazuje on obszary wsparcia dla innowacyjnych prac badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych, związanych ze zrównoważonym zagospodarowaniem zasobów odnawialnych oraz nieodnawialnych. Opracowane rozwiązania posłużą transformacji polskiej gospodarki, poprzez wdrażanie modelu GOZ i koncepcji 6R: Refuse (odmowa), Reduce (ograniczenie), Reuse (ponowne użycie), Recover (naprawa), Recycle (poddanie recyklingowi) i Rethink (analiza co można poprawić) [24].

5. Ślad węglowy stanowiący główny cel badań

Stosując modele GOZ zostanie również określowy ślad węglowy pozyskanego generatora turbiny wiatrowej. W założeniu wprowadzenie zasad GOZ zmniejszy ślad węglowy rozpatrywanego okresu cyklu życia generatora. Celem pracy jest opracowanie algorytmu kompleksowego wyznaczania śladu węglowego dla pełnego cyklu życia generatora turbin wiatrowych w oparciu o metodykę cradle-to-grave ("od kołyski po grób").

Śladem węglowym określamy całkowitą sumę emisji gazów cieplarnianych wyemitowanych w cyklu życia produktu, przez wydarzenie, organizację czy osobę. Wyrażany jako ekwiwalent dwutlenku węgla na jednostkę funkcjonalną produktu (CO_{2eq}/jedn. funkcjonalną) [25]. Na emisję gazów cieplarnianych składają się nie tylko emisje emitowane przez kominy na terenie firmy, ale także emisje związane z wytworzeniem kupowanych przez firmy mediów, surowców i usług [26].

Obliczanie śladu węglowego jest możliwe zarówno w przypadku produktu, jak i usług. Istnieje możliwość obliczeń dla każdego cyklu życia, np. od wydobycia surowców, poprzez produkcję, fazę użytkowania i zagospodarowanie po zakończeniu cyklu życia. Proces pomiaru śladu węglowego produktu wykonuje się zgodnie z międzynarodowymi standardami jak ISO 14067, GHG Protocol Product Standard czy PAS 2050 [26, 27].

Przedmiotem stanowiącym obiekt oceny cyklu życia produktu będzie generator turbiny wiatrowej. Obliczenie śladu węglowego pozwoli na analizę całkowitej emisji gazów cieplarnianych oraz energochłonności procesu (przede wszystkim procesy kruszenia) począwszy od wydobycia surowca, poprzez użytkowanie, do procesu utylizacji [28]. Na tej podstawie określony zostanie wpływ turbin wiatrowych na środowisko naturalne. Przedmiotem analizy pozostaną następujące etapy cyklu życia produktu:

 Produkcja – ślad węglowy wynikający z wydobycia surowca, produkcji rudy w tym procesów chemicznego wzbogacania.



- Użytkowanie ślad pozostawiony poprzez dystrybucję oraz użytkowanie turbin wiatrowych zawierających magnesy neodymowe.
- Utylizacja ślad węglowy powstały w wyniku demontażu i utylizacji tych urządzeń.



Rys. 5. Generator PMzg132-8B KOMEL

Pozyskany generator PMzg132-8B firmy KOMEL (rys. 5), zgodnie z opracowaną metodyką demontażu, zostanie zdekompletowany celem zebrania danych o materiałach, elementach będących składowymi zespołu. Na tej podstawie określona zostanie charakterystyka strukturalna oraz ilościowa poszczególnych elementów składowych, a następnie ich ślad węglowy. Pozwoli to na określenie obszarów dla składowych elementów konstrukcyjnych o wzmożonej emisji śladu węglowego.

Uzyskane wyniki analizy śladu węglowego pozwolą na optymalizację tego procesu w oparciu o założenia GOZ. Koncepcja GOZ, stanowiąca model gospodarczy, w której surowiec powinien pozostać w gospodarce na ile to możliwe, minimalizuje wytwarzanie odpadów i eksploatację surowców. Idea gospodarki o obiegu zamkniętym zastosowana zostanie do analiz wszystkich cyklów życia.

6. Harmonogram prac i ogólna metodyka postępowania

W obecnym etapie prac realizowany jest demontaż generatora oraz grupowanie podzespołów na podstawie grupy materiałowej. Poszczególne materiały, uwzględniając zasady GOZ, zostaną przeanalizowane pod kątem emisji śladu węglowego dla pełnego cyklu życia produktu.

Obliczanie śladu węglowego zostanie przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN ISO 14067:2018-10 Gazy cieplarniane - Ślad węglowy wyrobów - Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji. Wybór tej normy wynika z jej dokładności metodyki obliczeniowej. W odróżnieniu od specyfikacji PAS 2050 norma posiada status międzynarodowy, ponieważ jej twórcy reprezentowali różne kraje [29].



Wszelkie prace związane z projektem związanym z wyznaczeniem śladu węglowego w generatorze turbiny wiatrowej przygotowano w ujęciu harmonogramu czteroletniego (Tablela 1), którego pierwszy rok zakończono w czasie pisania tej publikacji.

Harmonogram realizacji pracy

Tabela 1

Rok	Etapy przygotowania
Ι	Dogłębna analiza literaturowa poruszanego zagadnienia, polegająca na rozszerzeniu wiedzy z zakresu turbin wiatrowych oraz poszukiwanie partnera w sferze wsparcia zaopatrzeniowego w wymagane elementy turbin wiatrowych.
Ι	Dogłębna analiza literaturowa poruszanego zagadnienia, polegająca na rozszerzeniu wiedzy z zakresu pierwiastków ziem rzadkich, cyklu życia produktów (śladu węglowego). Zapoznanie się z przepisami oraz dyrektywami z zakresu poruszanego zagadnienia.
II	Opracowanie sposobu demontażu poszczególnych części składowych pozyskanego generatora, pozwalającej na wyznaczenie śladu węglowego.
II	Opracowanie metody wyznaczania śladu węglowego generatora.
III	Opracowanie technologii recyklingu z uwzględnieniem odzysku pierwiastków ziem rzadkich zawartych w generatorze magnesów neodymowych.
III	Analiza cyklu życia generatora turbiny wiatrowej wraz z wykazaniem zmiennych pozwalających na ograniczenie emisji śladu węglowego.
IV	Analiza śladu węglowego, wynikająca z opracowanej metody recyklingu z uwzględnieniem odzysku cennych pierwiastków ziem rzadkich.
IV	Przygotowanie oraz złożenie pracy doktorskiej, na podstawie uzyskanych wyników.

Plan badawczy zakłada również zadania badawcze, których celem jest wdrożenie przyjętych procedór oraz wytycznych (Tabela 2).

Wdrożone procedury oraz wytyczne

Rok	Zadania badawcze (np.: wykonanie pomiarów, budowa aparatury, wykonanie obliczeń, itp.)
Ι	Wdrożenie przyjętych procedur, zgodnych z obowiązującymi przepisami oraz dyrektywami z zakresu poruszanego zagadnienia.
Π	Wdrożenie procesów, opracowanej metodologii demontażu części składowych pozyskanego generatora oraz przygotowanie stanowiska badawczego (zakup niezbędnych narzędzi umożliwiających realizację demontażu). Wdrożenie wytycznych dotyczących wykorzystywania specjalistycznych programów do wyznaczenia śladu węglowego dla wytypowanego obiektu analiz.
III	Wdrożenie procedur związanych z przeprowadzeniem procesu recyklingu elementów składowych generatora turbiny wiatrowej oraz opracowanej metodologii identyfikującej koncentrację pierwiastków ziem rzadkich w turbinie wiatrowej.
IV	Wdrożenie wytycznych z zakresu ograniczenia emisji śladu węglowego, generowanego przez wykorzystywanie technologii turbin wiatrowych.

Tabela 2



7. Wnioski

Projekt skupia się na zielonej energii i jest powiązany z dotychczas prowadzoną działalnością naukowa ITG KOMAG. Efektem wymogów zmieniającego się rynku oraz dążenia do ciągłego doskonalenia jest realizacja innowacyjnych prac związanych, między innymi, z odzyskiem REE, z wykorzystaniem metod elektrostatycznych oraz magnetycznych. Podjęcie poruszanego badania wynika z koniecznej do przeprowadzenia w Polsce transformacji energetycznej z gospodarki opartej na węglu, na gospodarkę wykorzystującą odnawialne źródła energii, w tym turbiny wiatrowe. Produkcja turbin wiatrowych, ze względu na dużą energochłonność procesu, przyczynia się pośrednio do emisji gazów cieplarnianych oraz wydobycia surowców krytycznych, do których należa REE (zastosowane magnesy neodymowe). Prognozy wskazuja, że zapotrzebowanie na cenne pierwiastki w najbliższych latach będzie rosło szybciej, aniżeli na jakikolwiek inny surowiec, podwajając się do 2060 r. W związku z powyższym istnieje konieczność opracowania efektywnych metod odzysku tychże pierwiastków, przy uwzględnieniu śladu węglowego, biorac pod uwagę cały cykl życia produktu oraz optymalizacji działań w oparciu o zasady gospodarki obiegu zamkniętego – recyklingu. Podjęcie pracy skupionej na jednoczesnym wyznaczeniu śladu węglowego dla generatorów turbin wiatrowych, wraz z zastosowanej GOZ oraz zamiarem odzysku REE, jest nowatorskim podejściem do rozwiązania problemu energochłonności turbin oraz kurczących się złóż cennych pierwiastków. Efektem realizacji w sferze naukowej są i będą publikacje następujących po sobie etapów prac w monografiach naukowych, czasopismach oraz referowanie wyników na konferencjach poświęconych zagadnieniom z zakresu projektu. Opracowania naukowe przyczynią się do rozwoju dziedziny naukowej poprzez wzrost świadomości zaistniałego problemu i optymalizacji metod umożliwiających ograniczenie śladu weglowego demontażu turbin wiatrowych.

Literatura

- 1. https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/recykling-lopaty-turbin-wiatrowych-raport-8792.html [dostęp 23 września 2022]
- 2. Zafar U.: Literature review of wind turbines, Chair of Geotechnical Engineering, Bauhaus Universitat, Weimar, 2018
- 3. Baron R.: Determination of Rare Earth Elements Content in Hard Coal Type 31.1: Management Systems in Production Engineering, 2020 v. 28, no. 4, p. 240–246
- 4. Baron R.: Determination of rare earth elements in power plant wastes. Min. Mach. 2020 nr 4 s. 24-30
- 5. Friebe P.: Tests of neodymium content in selected materials. Min. Mach. 2020 nr 2 s. 38-47
- 6. Baron R.: Assessment of rare earth elements content in the material from mine heaps. Min. Mach. 2021 nr 3 s. 18-27
- 7. Friebe P.: Determining the possibility of using the Polish aggregates for recovery of rare earth elements. Min. Mach. 2021 nr 2 s. 34-43
- 8. https://www.rynekelektryczny.pl/produkcja-energii-elektrycznej-w-polsce/
- 9. Abbott K., et al.: Darrieus Wind Turbine: Construction and Testing, ASAE Tech. Pap.; (United States), 1982 [dostęp 23 września 2022]
- 10. Dick E.: Wind Turbines. Fundamentals of Turbomachines, 2022, pp. 371–396
- 11. Kumar D., Md Noor A.: Vertical Axis Wind Turbine, International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, vol. 10, no. 6, 2022, pp. 4194–4196.



- 12. https://www.google.com/search?q=turbina+wiatrowa+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjN8PHc3bT6A hVxiIsKHTF4BboQ2 [dostęp 23 września 2022]
- 13. Prasad D., et al.: Horizontal Axis Wind Turbine, South Asian Journal of Engineering and Technology, vol. 12, no. 2, 2022, pp. 5–7
- 14. https://instsani.pl/technik-urzadzen-i-systemow-energetyki-odnawialnej/vademecum-energetyki-odnawialnej/energia-wiatru/silownie-wiatrowe/zasada-dzialania-silowni-wiatrowej/ [dostęp 23 września 2022]
- 15. Garduno R.: Modeling a Wind Turbine Synchronous Generator. National Institute of Electricity and Clean Energies, 2013
- 16. Milkić Ž., et al.: Characteristics of a Doubly-Fed Asynchronous Generator Applied in Wind Turbines. Ekonomika Poljoprivrede, vol. 65, no. 1, 2018, pp. 229–241
- 17. https://cordis.europa.eu/article/id/422297-novel-techniques-and-designs-to-handle-limitations-ofwind-turbine-generators/pl [dostęp 23 września 2022]
- 18. http://agroenergetyka.pl/?a=article&id=102 [dostęp 23 września 2022]
- 19. https://www.pgi.gov.pl/aktualnosci/display/12526-mineralne-surowce-krytyczne-nowa-listakomisji-europejskiej.html [dostęp 22 grudnia 2022]
- 20. https://spidersweb.pl/2019/07/zapotrzebowanie-na-metale-ziem-rzadkich-elektronika-gornictwo-kosmiczne.html [dostęp 22 grudnia 2022]
- Balaram V.: "Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact", Geoscience Frontiers, Volume 10, Issue 4, pp. 1285-1303, 2019
- 22. https://cordis.europa.eu/article/id/422297-novel-techniques-and-designs-to-handle-limitations-ofwind-turbine-generators/pl [dostęp 23 września 2022]
- 23. Smol M.: Założenia Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ) w sektorze produkcji sprzętu elektrycznego i elektronicznego (See). Rudy i Metale Nieżelazne, vol. 1, no. 8, 2019, pp. 10–16
- 24. https://smart.gov.pl/images/Zaoenia-do-metodyki-audytu-GOZ_06.06.pdf [dostęp 22 grudnia 2022]
- 25. Kijewska A., Bluszcz A.: Analiza poziomów śladu węglowego dla świata i krajów ue. Systemy wspomagania w inżynierii produkcji zagadnienia energomaszynowe i bezpieczeństwo w górnictwie, vol. 6, no. 2, 2017, pp. 169-177
- 26. https://sozosfera.pl/srodowisko-i-gospodarka/czym-jest-slad-weglowy/ [dostęp 23 września 2022]
- 27. https://www.ey.com/pl_pl/climate-change-sustainability-services/slad-weglowy-i-emisje-gazow-cieplarnianych-nowa-waluta [dostęp 23 września 2022]
- 28. Naziemiec Z., Saramak D.: Analiza energochłonności procesów rozdrabniania kruszyw mineralnych. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. Vol. 134, nr 41, 2012, pp.: 209-220
- 29. Kulczycka J., Wernicka M.: Zarządzanie śladem węglowym w przedsiębiorstwach sektora energetycznego w Polsce bariery i korzyści. Polityka Energetyczna. Tom 18, zeszt 2, 2015, s. 61-72

https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.6

Koncepcja systemu do ograniczania roślinności na liniach kolejowych

Dominik Bałaga – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Marek Kalita - Instytut Techniki Górniczej KOMAG Michał Siegmund - Instytut Techniki Górniczej KOMAG Mariusz Woszczyński - Instytut Techniki Górniczej KOMAG Wojciech Świeca - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przeprowadzono przegląd i analizę obecnie stosowanych rozwiązań do ograniczania roślinności na torowiskach kolejowych używanych w kraju oraz na świecie. Wskazano podstawowe wymagania prawne i dokumenty związane z usuwaniem roślinności na torowiskach kolejowych oraz zaprezentowano model przestrzenny nowego systemu zabudowanego w technologii kontenerowej, opartego o opryskiwanie dwoma bioherbicydami oraz gorącą wodą. Przedstawiono koncepcję układu hydraulicznego i sterowania, odpowiadających za prawidłowe dozowanie środków do usuwania roślinności oraz pracę instalacji opryskującej w oparciu o sygnały z układu detekcji. Omówiono zaproponowany układ zasilania w energię elektryczną pochodzącą z magazynu energii (doładowywanego z instalacji fotowoltaicznej) współpracującego z agregatem prądotwórczym oraz układ detekcji i analizy obrazu. W podsumowaniu zaprezentowano wady i zalety rozwiązania w aspekcie prawdopodobnych zmian w zakresie stosowania środków chemicznych opartych o Glifosat.

Słowa kluczowe: torowisko kolejowe, usuwanie roślinności, glifosat, gorąca woda, bioherbicydy

System concept for vegetation control on railway lines

Abstract: The chapter reviews and analyzes current solutions for vegetation abatement on railroad tracks used domestically and internationally. Basic legal requirements and documents related to vegetation removal on railroad tracks are indicated, and a spatial model of a new system built in container technology, based on spraying with two bioherbicides and hot water, is presented. The concept of the hydraulic and control system, responsible for the correct dosage of vegetation removal agents and the operation of the spraying system based on signals from the sensing system, is presented. The proposed power supply system derived from the energy storage (recharged from the photovoltaic system) cooperating with the generator and the detection and image analysis system is discussed. In conclusion, the advantages and disadvantages of the solution are presented in terms of likely changes in the use of Glyphosate-based chemicals.

Keywords: railway track, vegetation removal, glyphosate, hot water, bioherbicides

1. Wprowadzenie

Z uwagi na bezpieczeństwo ruchu kolejowego, utrudnienia w przesiąkaniu wody, utrudnienia odpływu wody kanałami odwadniającymi, ale i ograniczoną widoczność na przejazdach, rozjazdach oraz zakrętach, wzrost roślinności na torowiskach kolejowych powinien być regularnie kontrolowany poprzez usuwanie roślinności. Konieczność usuwania i niszczenia roślinności na torach kolejowych PKP Polskich Linii Kolejowych S.A. wskazanana jest w warunkach technicznych utrzymywania nawierzchni kolejowych, gdzie powiedziane jest, że "Usuwanie i niszczenie roślinności na całej szerokości pryzmy podsypki i ław torowiska powinno być wykonywane na torach wszystkich klas w ramach konserwacji, jako czynność" [1]. W tym celu dopuszczalne jest stosowanie różnych środków

Open Access (CC BY-NC 4.0)



do jego utrzymania poprzez: wytwarzanie niekorzystnych warunków wegetacji, niszczenie mechaniczne polegające na karczowaniu, koszeniu i pieleniu oraz niszczenie chemiczne, za pomocą środków chwastobójczych (herbicydów) dopuszczonych do stosowania w kolejnictwie. Dyrektywa z 2009 roku wymaga od takich rozwiązań pełną skuteczność stosowania pestycydów dzięki zastosowaniu dokładnego dozowania i równomiernego rozprowadzania pestycydów [2]. Ww. prace realizuje się w ramach konserwacji podtorza na torach wszystkich klas jako czynność niezależną od innych robót, wykonywaną w okresie wczesnej wegetacji roślin, przed ich wyrastaniem i wysypywaniem się nasion (rys. 1).



Rys. 1. Budowa toru kolejowego [3]

Koszenie jest najstarszą i najprostszą techniką usuwania roślinności, jednakże jej skuteczność jest niewielka, ponieważ rośliny szybko odrastają i efekt prac jest chwilowy, co wymaga co najmniej kilkukrotnego powtarzania w sezonie. Koszenie polega na ścięciu roślin poprzez szybkie uderzenie rośliny i spowodowanie jej zniszczenia [4]. Istnieje wiele sposobów na mechaniczne koszenie m.in. za pomocą kosiarek rotacyjnych, kosiarek bijakowych, czy karczownic będących maszynami przystosowanymi do poruszania się po trudnym terenie i do wycinania roślin, z którymi nie poradzą sobie kosiarki. Przykład kosiarki bijakowej zastosowanej na koparce poruszającej się po torach, zaprezentowano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład kosiarki bijakowej na koparce przystosowanej do jazdy po torach kolejowych [5]

Jedną z nowszych technik jest rozwiązanie opracowane przez firmę Zasso Group AG ze Szwajcarii. Rozwiązanie to polega na zastosowaniu wysokiego prądu do pielenia roślin, a efekty są zauważalne już po kilku godzinach. Wysokie napięcie od 3000 V do7000 V oraz natężenie prądu z zakresu od 0,5 A do 1 A, przepływające przez rośliny powoduje uszkodzenie chlorofilu i błon komórkowych roślin, co blokuje przepływ wody [6]. Rozwiązanie oparte o wysokie napięcie (opracowane przez Zasso Group AG)

Open Access (CC BY-NC 4.0)



zastosowane zostało do niszczenia chwastów na torowiskach kolejowych, przez firmę Certis Europe z Utrechtu w Holandii i jest w fazie testów (rys. 3).



Rys. 3. Rozwiązanie ZassoGroup AG w pojeździe szynowo-drogowym firmy Certis [7]

Najpopularniejszą obecnie metodą do ograniczania roślinności na torowiskach kolejowych, jest opryskiwanie herbicydami. Trwałość herbicydów w środowisku to nawet kilkanaście lat, co stwarza ryzyko obecności pozostałości substancji aktywnych w glebie, wodzie i płodach rolnych. Substancje te zalegające w glebie mogą być przyczyną uszkodzenia wrażliwych roślin następczych lub zostać wymyte do wód gruntowych, a pozostałości herbicydów obecne w roślinach mogą wywierać niekorzystny efekt na zdrowie człowieka. Pomimo to, stosowane są one powszechnie również w kolejnictwie. Służą do tego różnego rodzaju pojazdy opryskowe, które można podzielić na te do pracy na krótkich odcinkach oraz takie do dalekich tras. Rozwiązania stosowane są już od dawna na całym świecie, i to co najmniej od pierwszej połowy XX wieku (rys. 4).



Rys. 4. Pociąg specjalny do chemicznego odchwaszczania torów (1949 r.) [8]

Najnowocześniejszym obecnie ze znanych rozwiązań dalekobieżnych jest rozwiązanie firmy G&G Ltd z Węgier (rys. 5). Rozwiązanie z automatycznym sterowaniem opryskiem, oparte jest na rozpoznawaniu roślin i selektywnym opryskiwaniu herbicydami. Rozwiązanie wymaga obcego środka lokomocji, maszynowni, generatora prądu oraz cysterny [9].





Rys. 5. Zestaw do wykrywania i opryskiwania herbicydami opracowany przez firmę G&G Ltd. [9]

Rozwiązanie doczekało się również wersji kontenerowej, w której znajduje się cała niezbędna infrastruktura do działania układu opryskującego. Do chwili obecnej wyprodukowano czwartą generację systemu natryskiwania bioherbicydów do zastosowania w kolejnictwie, dzięki któremu firma realizuje usługi utrzymywania torowisk w m.in w Szwecji, Norwegi i Danii. W przypadku krótszych tras, ale również ze względu na wysokie koszty ww. rozwiązań, stosuje są mniejsze rozwiązania, dostosowane do potrzeb lokalnych. Rozwiązania te oparte są na układach opryskiwaczy, zamontowanych na pojazdach drogowo-szynowych. Takim przykładem jest ciężarówka drogowo-szynowa typu UNIMOG firmy Mercedes-Benz (rys. 6). Rozwiązanie to wyposażone jest w opryskiwacz PZB 90, system opryskiwania, wspomniane GPS i pojemność zbiorników wynoszącą 3000÷6000 dm³/min.



Rys. 6. Unimog drogowo-szynowy z PZB 90 [10]

Z kolei w Polsce wykorzystywane są opryskiwacze polowe np. firmy Krukowiak z Brześcia Kujawskiego, montowane na wózkach WZB-10, lub platformach PWM-15 (rys. 7). Rozwiązanie opryskiwacza wyposażone jest w zbiornik 1000÷2000 dm³, w belki opryskujące, zbiorniki 3 w 1 (na koncentrat herbicydu, wodę do mieszania z herbicydem oraz wodę do mycia rąk), silnik spalinowy oraz pompę hydrauliczną.

Open Access (CC BY-NC 4.0)





Rys. 7. Opryskiwacz Apollo firmy Krukowiak zabudowany na wózku WZD-10 [4]

Jak wskazuje przegląd rozwiązań, najpowszechniej stosowaną metodą usuwania roślinności wzdłuż torowisk jest usuwanie za pomocą herbicydów, co wynika z warunków ekonomicznych i prostoty wykonywania oprysku. Najczęściej stosowanym herbicydem od lat 70-tych, XX wieku, jest preparat Roundup (dopuszczony do stosowania w kolejnictwie), oparty na glifosacie, który jest organicznym związkiem chemicznym z grupy fosforanów. Związek ten hamuje działanie ważnego enzymu syntezy EPSPS, będącym kluczowym enzymem metabolicznym roślin, powodując zamieranie większości roślin. W 1985 r. Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (Environmental Protection Agency -EPA) zaklasyfikowała środek jako potencjalnie rakotwórczy, co spowodowało szeroko zakrojona dyskusję i serię badań nad bezpieczeństweń jego stosowania. Kilka lat temu Federal Institute for Risk Assessment poddało analizie ponad tysiąc badań związanych z tym środkiem i nie stwierdzono dowodów na rakotwórzczy wpływ glifosatu, czy jego wpływ na zaburzenia płodności czy uszkodzenia płodu. Jednak Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem w 2015 r. zaklasyfikowała glifosat jako substancję prawdopodobnie rakotwórcza (chłoniak nieziarnisty), co spowodowało powrót tematu niepewności dotyczacych bezpieczństwa jego stosowania. Pomimo wielu watpliwości dotyczących stosowania glifosatu, w 2017 r. Komisja Europejska podjęła decyzję o możliwości stosowania glifosatu na następne 5 lat, tj. do grudnia 2022 r. Jednocześnie analizowane sa badania naukowe dotyczące bezpieczeństwa stosowania glifosatu i konsultacje, na podstawie których podjęta zostanie decyzja dotycząca możliwości odnowienia zezwolenia na stosowanie glifosatu w UE do końca 2022 r. W przypadku nieodnowienia zezwolenia, pojawi się problem odchwaszczania torowisk kolejowych realizowany przez spółki kolejowe.

2. Koncepcja systemu ograniczania roślinności rozwijającej się na torach kolejowych

Pojawienie się kwestii korzystnego dla środowiska przyrodniczego wycofania glifosatu z użytkowania, wykorzystywanego do usuwania roślinności na torowiskach kolejowych, przyczyniło się do podjęcia przez ITG KOMAG prac koncepcyjnych nad rozwiązaniem, w które w sposób ekologiczny i skuteczny pozwalałoby na utrzymanie konroli roślinności na torowiskach. Na podstawie przeprowadzonej analizy rozwiązań, kosztów wdrożenia oraz kosztów stosowania, zdecydowano się na opryskiwanie z wykorzystaniem bioherbicydów (substancje przeznaczone do redukcji roślinności i niepowodujące degradacji środowiska) oraz gorącej wody, która będzie dodatkowym ekologicznym sposobem ograniczania wzrostu roślinności. Oba rozwiązania pracować będą zamiennie w zależności od potrzeb i miejsca opryskiwania, z wykorzystaniem odrębnych linii zasilających i rozpylaczy. Zastosowanie gorącej wody przewiduje się wykorzystywać w rejonie peronów osobowych, gdzie opryskiwanie w obecności ludzi jest zabronione.



Analiza środków chemicznych wykazała możliwość opryskiwania preparatów opartych na substancjach pochodzenia naturalnego i biodegradowalnych, takich jak kwas pelargonowy np. Randacol 680 EC oraz kwas octowy. Z kolei na rysunku 8 przedstawiono przykład skuteczności działania gorącej wody względem innych znanych i ekologicznych technik usuwania chwastów (co można przełożyć na usuwanie roślinności), potwierdzająca słuszność dokonanego wyboru w przypadku gorącej wody.



Rys. 8. Skuteczność oraz wydajność stosowania gorącej wody względem innych technik i ekologicznych metod usuwania chwastów [11]

Opracowana koncepcja systemu do ograniczania roślinności na liniach kolejowych oparta została o selektywne dozowanie bioherbicydów lub pary wodnej wyrzucanej z dysz zraszających, na podstawie detekcji i analizy obrazu z kamer monitorujących torowisko kolejowe. Selektywne zastosowanie środków ograniczających rozrost roślinności zoptymalizuje ich zużycie, czym ograniczy koszty utrzymania torowiska w zakresie niedopuszczania do wzrostu roślinności. Z kolei bezobsługowa praca, ograniczy liczbę osób pracujących przy opryskiwaniu roślinności do osoby motorniczego, którego rola ograniczać będzie się do uruchomienia systemu przed wyruszeniem w trasę i nadzoru nad systemem poprzez dostępny monitoring parametrów pracy systemu. System przewidziany jest do zabudowy w technice kontenerowej na platformie PWM-15, współpracującej z wózkiem motorowym WM-15.

System ograniczania roślinności na liniach kolejowych (rys. 9), wykorzystujący dozowanie bioherbicydów i pary wodnej, składa się z:

- 1. Układu detekcji i analizy obrazu.
- 2. Układu hybrydowego zasilania.
- 3. Układu dozowania, rozprowadzenia i oprysku.
- 4. Układu sterowania.
- 5. Kontenera transportowego.





Rys. 9. Koncepcja systemu do ograniczania roślinności na liniach kolejowych - główne układy [4]

Zaproponowane rozwiązanie układu detekcji roślinności składa się z kamer wizyjnych ze specjalistycznymi kamerami termowizyjnymi i multispektralnymi, układ umożliwi precyzyjne określenie miejsc występowania roślinności, rodzaju roślinności, a także oszacowanie jej ilości za pomocą odpowiednio dobranych algorytmów analizy obrazu, w analizowanym obszarze. Uniwersalny i demontowalny system mocowania kamer umożliwi ich zabudowe na kabinie wózka WM-15, a zastosowanie szybkich kamer wizyjnych o szerokim kącie widzenia pozwoli na detekcję roślinności przy zachowaniu założonej prędkości jazdy wynoszącej maksymalnie 15 km/h [10]. Zastosowanie opcjonalnej/dodatkowej kamery termowizyjnej umożliwi przeprowadzenie detekcji również w warunkach niewystarczającego oświetlenia (np. w godzinach nocnych) lub trudnych warunkach pogodowych (np. w mglisty dzień). W odróżnieniu od kamery optycznej kamera termowizyjna pozwala dostrzec więcej szczegółów roślinności ze względu na ich inną pojemność cieplną (zawartość wody), ale również posiada możliwość wykrycia we wczesnych stadiach czynników zaburzających właściwy rozwój roślin, m.in. stres wywołany zasoleniem bądź chorobą roślin [12]. Zastosowanie kamery multispektralnej NDVI/CWSI umożliwi dokładniejszą analizę stanu wzrostu roślinności przy tworzeniu raportu, a jak wskazują badania [13], na ich wzrtost ma wpływ wiele czynników, takich jak: warunki świetlne czy wilgotnościowe, ale także rodzaj roślinności występującej w pobliżu torów kolejowych. Proponowane rozwiazanie znaczaco poprawi efektywność procesu i komfort obsługi. Przykład dobranej kamery multispektralnej do układu detekcji, przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Kamera multispektralna RedEdge-M firmy MICASENSE ze Stanów Zjednoczonych [14, 15]

Energia elektryczna niezbędna do zasilania systemu do walki z roślinnością będzie pochodziła z układu zasilającego. Hybrydowy zespół zasilający będzie składał się z magazynu energii oraz paneli fotowoltaicznych wspomaganych pracą spalinowego generatora prądu. Magazyn energii o sumarycznej pojemności ok. 50 kWh będzie zbudowany z ogniw litowych umożliwiających akceptowalny czas ładowania w stosunku do pojemności i wydajności prądowej ogniw [16]. Zaproponowana wielkość magazynu energii gwarantuje godzinę ciągłej pracy, przy maksymalnej wydajności systemu (ciągły oprysk ze wszystkich dysz). Taki tryb działania instalacji będzie występował sporadycznie i chwilowo,



dlatego przy oprysku selektywnym, magazyn energii wystarczy na kilka godzin pracy. Magazyn energii będzie współpracował z dostępnymi na stacjach i/lub zajezdniach trójfazowymi przyłączami elektrycznymi (o napięciu znamionowym 400VAC). Dodatkową zaletą układu zasilania będzie możliwość doładowywania baterii "zieloną energią" wytwarzaną przez instalację fotowoltaiczną, zabudowaną na kontenerach. Układem wykonawczym systemu jest układ dozowania, rozprowadzenia i opryskiwania, którego działanie uzależnione jest od sygnałów pochodzących z układu sterowania. Zadaniem układu będzie przygotowanie wody, dozowanie bioherbicydów lub gorącej wody, a następnie rozprowadzenie jej do poszczególnych dysz zraszających i wyrzucenie w postaci strumienia zraszającego na wykrytą w danej strefie działania roślinność. Propozycja rozmieszczenia poszczególnych elementów układu, zaprezentowana została na rysunku 11.



Rys. 11. Propozycja rozmieszczenia elementów układu dozowania, rozprowadzenia i oprysku bioherbicydów [4]

Opracowana w ramach koncepcji rama baterii zraszającej, wchodząca w skład układu wykonawczego, pozwala na szybki i bezkolizyjny sposób pozycjonowania dysz względem torowiska, dzięki specjalnie zaprojektowanym prowadnicom umożliwiającym jej wysuwanie i wsuwanie do kontenera. Taki sposób ułożenia baterii z dyszami zraszającymi, pozwala na uzyskanie zasięgu działania oprysku bioherbicydów na odległości 3,5 m \pm 10%, na każdą stronę torowiska licząc od jego osi (rys. 12).



Rys. 12. Wyznaczony zasięg działania systemu oprysku bioherbicydów [4]

Za funkcje sterownicze systemu odpowiedzialny będzie sterownik PLC, zintegrowany programowo z panelem HMI, umożliwiającym obsługę systemu do ograniczania roślinności. Najważniejsze



informacje dostarczane do układu sterowania pochodzić będą z układu detekcji roślinności. Na podstawie tych danych oraz wartości sygnałów z czujników procesowych, układ sterowania będzie realizował algorytm pracy całego systemu, wysterowując odpowiednie zawory hydrauliczne, pompy oraz grzałki. Układ sterowania będzie miał możliwość sterowania radiowego, co umożliwi kontrolę pracy systemu przez maszynistę [12].

Zabudowa rozwiązania koncepcyjnego systemu ograniczania roślinności, oparta została o technikę kontenerową, w postaci dwóch kontenerów (20" i 10"), montowanych na specjalnej ramie nośnej (rys. 13), która będzie miała możliwość zabudowy na platformie PWM-15. Opracowana rama posiada naroża gniazdowe typu Twist-lock, co ułatwia ich montaż z kontenerami.



Rys. 13. Model 3D zabudowy kontenerowej z wykorzystaniem kontenera 20" oraz 10" [4]

Na dachach kontenerów umieszczono panele fotowoltaiczne, które wchodzą w skład hybrydowego zespołu zasilającego systemu. Technika kontenerowa oprócz zalet wynikających z możliwości transportu różnymi środkami transportu, pozwoli na zabudowę i ochronę przed działaniem czynników atmosferycznych układów przygotowania i dystrybucji mediów roboczych systemu (bioherbicydów i gorącej wody), układu sterowania i zasilania (rys. 14).



Rys. 14. Propozycja rozmieszczenia poszczególnych układów systemu w kontenerach przeznaczonych do zabudowy na platformie PWM-15A [4]



3. Zasada działania systemu

Praca systemu ograniczania roślinności będzie realizowana na podstawie algorytmów zaimplementowanych w sterowniku PLC. Sterownik, przetwarzając informację z układu detekcji roślinności oraz z czujników procesowych, będzie sterował odpowiednimi zaworami hydraulicznymi, odpowiedzialnymi za dostarczenie cieczy opryskowej do dysz rozpylających (jednej z dwóch mieszanin bioherbicydów lub gorącej wody). Po wprowadzeniu nastaw oraz uruchomieniu systemu przez operatora, dalsza praca systemu będzie odbywała się w sposób autonomiczny, bez bezpośredniego udziału człowieka (rys. 15).



Rys. 15. Wizualizaja oprysku bioherbicydów przez system, na chwasty znajdujące się wokół torowiska [4]

Automatyczne działanie systemu opiera się w pierwszej fazie o kamery, które będą stanowić kluczowy element systemu detekcji roślinności. Ich celem będzie pozyskiwanie i przesyłanie obrazu do komputera, w którym będzie dokonywana analiza i detekcja roślinności w rejonie torowiska. Na jej podstawie układ sterowania systemu zdecyduje, w które miejsce zostanie podana przygotowana mieszanina bioherbicydów/gorąca woda do ograniczania roślinności. System sterowania w przypadku wykrycia roślinności posiada możliwość uruchamiania 1÷7 grup dysz, po ok. 5 szt. w grupie. Schemat hydrauliczny układu przestawiono na rysunku poniżej (rys. 16).



Rys. 16. Schemat hydrauliczny systemu do ograniczania roślinności, z wykorzystaniem bioherbicydów oraz gorącej wody [4]



Każda dysza będzie posiadać niezależny elektrozawór umożliwiający szybki oprysk danego preparatu. Pompy podające środki chemiczne na każdą z grup dysz niezależnie, będą sterowane analogowo, co umożliwia zmianę proporcji przygotowywanego roztworu, w zależności od rodzaju i stężenia zastosowanego koncentratu. Gorąca woda dostarczana będzie pompą ze zbiornika, w którym temperatura wynosić będzie ok. 95°C. Woda będzie podgrzewana w zbiorniku do temperatury 80°C, korzystając z energii elektrycznej z zewnętrznej sieci energetycznej (na stacji). Po nagrzaniu wody, układ sterowania będzie podtrzymywał temperaturę, za pomocą układu regulacji. Woda tuż przed opryskiem, podgrzewania będzie za pomocą grzałek zabudowanych bezpośrednio przy dyszach opryskowych. Zasilanie systemu realizowane będzie z magazynu energii, który będzie ładowany tanią energią z sieci na stacji i jednocześnie doładowywany z instalacji PV. Po wyczerpaniu energii w magazynie, nastąpi uruchomienie generatora spalinowego. Zakładając, że system ograniczania roślinności nie będzie pracował cały czas z pełną wydajnością, magazyn akumulatorowy pozwoli zapewnić energię elektryczną nawet na kilkanaście godzin pracy systemu odchwaszczania torowisk.

4. Parametry pracy systemu odchwaszczania torowisk

Opracowana koncepcja systemu do ograniczania roślinności na liniach kolejowych, oparta na dozowaniu bioherbicydów i gorącej wody, charakteryzuje się następującymi parametrami:

	Parametry techniczne systemu:	
-	max. długość kontenerów:	11,0 m
-	max. szerokość kontenerów:	3,0 m
-	max. wys. kontenerów:	3,0 m
-	pojemność magazynu energii:	50 kWh
-	masa systemu:	max. 10500 kg
-	moc instalacji PV:	3,3 kWp
-	praca systemu w warunkach dziennych i nocnych:	tak
	Parametry układu hydraulicznego:	
-	ciśnienie do opryskiwania bioherbicydów:	p = 0,8 MPa
-	ciśnienie do opryskiwania gorącej wody:	p = 0,9 MPa
-	natężenie przepływu (woda+bioherbicyd):	$Q_{max} = 87,5 \text{ dm}^3/\text{min}$
-	natężenie przepływu (woda gorąca):	$Q_{max} = 10 \text{ dm}^3/\text{min}$
-	zbiornik wody zimnej do bioherbicydów:	3000 dm ³
-	zbiornik wody gorącej:	500 dm^3
-	zbiornik koncentratu bioherbicydów:	2000 dm^3
-	szerokość oprysku:	7,0 m.

Tak zaproponowane rozwiązanie kontenerowego systemu ograniczania roślinności nie przekracza wymiarów dostępnych do montażu na platformie PWM-15. Na rysunku 17 przedstawiono maksymalne wymiary kontenerów oraz wymiary platformy wózka motorowego PWM-15.



Rys. 17. Maksymalne wymiary zestawu kontenerowego oraz wymiary platofromy PWM-15A [4]


Opracowane w ramach projektu rozwiązanie systemu do walki z roślinnością zostało wyposażone w dwa zbiorniki o pojemności 1000 dm³ każdy (dla dwóch bioherbicydów), co pozwoli osiągać zasieg 90 km, bez konieczności ich uzupełniania. System wymagał będzie uzupełniania jedynie wody na stacjach pośrednich. Zbiornik wody o wielkości 3000 dm³, dobrano posiłkując się przeprowadzoną analizą obecnie stosowanych rozwiązań w Zakładach Linii Kolejowych opryskiwaczy typu Krukowiak, która nie przekracza 2000 dm³. Również przy doborze pojemności znaczenie miał fakt o ograniczonej ładowności platformy PWM-15 (12,4 t). Przy najmniej korzystnym założeniu, że objętość 5% kwasu octowego będzie wynosić 500 dm³/h, to przy pełnym oprysku oznacza wydatek wody wynoszący 87,5 dm³/min, przy prędkości 15 km/h. To pozwala na realizację oprysku bioherbicydów przez 34 min, czyli 8,5 km. W przypadku gorącej wody, założono zbiornik 500 dm³, który przy założonym wydatku 10 dm³/min, pozwalał będzie na pracę układu przez 50 min, czyli 12,5 km pracy. W rzeczywistości zasięg systemu będzie kilkukrotnie większy dzięki zastosowaniu detekcji i selektywności oprysku.

5. Podsumowanie

Podjęcie w ITG KOMAG tematyki usuwania roślinności na torowiskach kolejowych wymagało przeanalizowania dyrektyw, rozporządzeń oraz norm, które pozwoliły poznać przyszłe środowisko pracy systemu odchwaszczania torowisk oraz wady i zalety rozwiązań stosowanych obecnie w kolejnictwie [1, 2, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. Przeprowadzony szeroki przegląd literatury dotyczący sposobów walki z roślinnością na torowiskach oraz sposobów wykorzystywanych w rolnictwie do usuwania chwastów, umożliwił zapropnowanie najkorzystniejszego rozwiązania. Mając na uwadze taki stan rzeczy, opracowano koncepcję innowacyjnego systemu łączącego dwa sposoby do ograniczania roślinności, który może być stosowany na polskim oraz światowym rynku kolejowym.

Nowością w opracowanym systemie jest możliwość zastosowania w kolejnictwie w skali wielkoobszarowej bioherbicydów na bazie kwasów organicznych, w zastępstwie do tej pory używanych oprysków z glifosatem jako substancją czynną. Opracowana koncepcja systemu do ograniczania roślinności, jest przystosowana do rozpylania na liniach kolejowych dwóch bioherbicydów (kwasu pelargonowego oraz kwasu octowego, lub innych) oraz traktowania roślinności gorącą wodą.

Obecnie stosowany ciągły oprysk chemicznymi środkami zawierającymi glifosat, powoduje szkody dla środowiska naturalnego i zawyżone koszty oprysku. Z punktu widzenia kolejnictwa, kluczową nowością systemu jest zastosowanie nowego typu selektywnego oprysku niepożądanej roślinności wyłącznie w miejscach, które wymagają stosowania takich środków. Realizowane będzie to poprzez opracowany układ wykrywania, który składać będzie się ze specjalistycznych kamer współpracujących z inteligentnym układem analizy obrazu. Na podstawie informacji o wykryciu roślinności w danej strefie, system pozwalać będzie na precyzyjne podawanie środka chwastobójczego w ściśle określony obszar torowiska.

Funkcjonalność opracowanego systemu pozwoli na zwalczanie roślinności o każdej porze i niemal w każdym miejscu linii kolejowej, łącznie z torowiskami zlokalizowanym przy peronach osobowych, bez konieczności czasowego wyłączania ich z dostępności dla podróżnych (przy zachowaniu odpowiednich wymogów bezpieczeństwa). Zaproponowana koncepcja została zaprojektowana w taki sposób, aby pozwolić na wygodny transport systemu na pojazdach kolejowych, dzięki umieszczeniu go w odpowiednio przygotowanych standardowych kontenerach. Rozwiązanie to oprócz wygodnego transportu i przechowywania systemu na kolei, umożliwi transport systemu po drogach publicznych, w razie potrzeby. Kontenerowa budowa systemu, w razie awarii platformy transportowej, pozwalać będzie również na bezkolizyjną i szybką jej zmianę, bez konieczności dodatkowych prac modernizacyjnych.

Zasilanie urządzeń systemu ograniczania roślinności będzie realizowane przez hybrydowy układ zasilania bazujący na magazynie energii oraz panelach fotowoltaicznych wspomaganych generatorem prądu. Będzie to pierwsze tego typu rozwiązanie w skali polskiego rynku i rynków zagranicznych, gdzie część zielonej energii będzie mogła być magazynowana w nowoczesnych, wysokosprawnych bateriach litowych.



Istotą systemu jest automatyczna praca, która pozwoli na zmniejszenie do niezbędnego minimum czynności związanych z jego obsługą, co może przyczynić się do redukcji kosztów po stronie spółek realizujących oprysk torowisk.

Literatura

- 1. Instrukcja Id-1 PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. "Warunki techniczne utrzymania nawierzchni kolejowych", §57.1
- 2. DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2009/128/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania na rzecz zrównoważonego stosowania pestycydów
- Godyń A., Doruchowski G., Hołownicki R., Świechowski W. (2012).: Badania opryskiwaczy kolejowych – wyzwania i możliwości ich realizacji. Prezentacja PDF. W: http://arc.inhort.pl/files/program_wieloletni/wykaz_publikacji/obszar1/Badania%20opryskiwacz y%20kolejowych.pdf
- Bałaga D., Kalita M., Siegmund M., Bidas M., Wójcicki M., Hylla P.: "Koncepcja systemu do zwalczania roślinności na liniach kolejowych oparta na dozowaniu bioherbicydów i pary wodnej". Praca statutowa ITG KOMAG E/BUC-29655/OR1 (niepublikowana). Gliwice, maj 2022
- 5. https://www.certis-railservice.de/en/our-solutions/mechanical-vegetation-control [dostęp 04 listopada 2022]
- 6. https://profitechnika.pl/profi/articles/aktualnosci-profi/zasso-xpower-czyli-pradem-w-chwasty-2340054 [dostęp 04 listopada 2022]
- 7. ttps://www.certis-railservice.de/en/our-solutions/new-and-alternative-methods [dostęp 04 listopada 2022]
- 8. http://www.drehscheibe-foren.de/foren/read.php?17,3865936,3865936 [dostęp 04 listopada 2022]
- 9. https://www.gesgkft.hu/en/projektjeink/construction-of-the-5th-generation-railway-weed-control-train/ [dostęp 04 listopada 2022]
- 10. https://www.certis-railservice.de/en/our-solutions/chemical-vegetation-control [dostęp 04 listopada 2022]
- 11. https://www.eko-odchwaszczanie.pl [dostęp 04 listopada 2022]
- 12. Sabat R., Konopacki P., Hołownicki R., Kurpaska S., & Latała H. (2013).: Zastosowanie termowizji do badań rozkładu temperatury w tunelach foliowych wyposażonych w akumulatory ciepła. Inżynieria Rolnicza, 17(3, t. 1), 345-354
- 13. Hutniczak A., Urbisz A., Urbisz A., & Strzeleczek Ł. (2022).: Factors Affecting Plant Composition in Abandoned Railway Areas with Particular Emphasis on Forest Proximity. Diversity, 14(12), 1141. https://doi.org/10.3390/d14121141
- Świeca W. i inni: "Analiza rozwiązań sprzętowo-programowych na potrzeby opracowania układu detekcji roślinności w obrębie torowiska za pomocą systemów." Praca statutowa ITG KOMAG E/BUC-29655/OR3 (niepublikowana). Gliwice, kwiecień, 2022
- 15. https://dronavista.pl/pl/kamery-multispektralne/5967-kamera-multispektralna-micasenserededge-m.html [dostęp 04 listopada 2022]



- 16. Woszczyński M.: "Analiza rozwiązań sprzętowo-programowych na potrzeby opracowania układu sterowania systemu zwalczania roślinności na liniach kolejowych". Praca statutowa ITG KOMAG E/BUC-29655/OR3 (niepublikowana). Gliwice, kwiecień, 2022
- 17. DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY 2009/127/WE z dnia 21 października 2009 r. zmieniająca dyrektywę 2006/42/WE w odniesieniu do maszyn do stosowania pestycydów
- 18. Rozporządzenie MRiRW z dnia 13 grudnia 2013 r. w sprawie potwierdzania sprawności technicznej sprzętu przeznaczonego do stosowania środków ochrony roślin (Dz.U. 2013 poz. 1686; tekst jednolity Dz.U. 2021 poz. 775)
- Rozporządzenie MRiRW z dnia 18 grudnia 2013 r. w sprawie wymagań dotyczących sprawności technicznej sprzętu przeznaczonego do stosowania środków ochrony roślin (Dz.U. 2013 poz. 1742; tekst jednolity Dz.U. 2016 poz. 760)
- 20. Rozporządzenie MRiRW z dnia 31 marca 2014 r. w sprawie warunków stosowania środków ochrony roślin (Dz. U. 2014 poz. 516)
- 21. PN-EN ISO 16122-1:2015-07 Maszyny rolnicze i leśne Badania kontrolne opryskiwaczy w sferze użytkowania Część 1: Postanowienia ogólne
- 22. Załącznik do zarządzenia Nr 9/2009. Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009 r.; https://www.plk-sa.pl/files/user_upload/Id-3.pdf [dostęp 04 listopada 2022]



https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.7

Koncepcja zastosowania oprogramowania narzędziowego przemienników częstotliwości w celu analizy i poprawy pracy zespołów napędowych maszyn górnictwa odkrywkowego

Mariusz Jabłoński - Politechnika Łódzka Piotr Borkowski - Politechnika Łódzka

Streszczenie: Rozdział opisuje zagadnienia dotyczące możliwości wykorzystania funkcjonalności oprogramowania narzędziowego komercyjnych przemienników częstotliwości do diagnostyki i analizy pracy falownikowego zespołu napędowego składającego się z przemiennika częstotliwości, silnika indukcyjnego klatkowego, napędzającego system elektromechaniczny przeniesienia napędu oraz obciążenia. Na podstawie wykonanych rejestracji ruchowych podczas pracy zespołów napędowych oraz identyfikacji parametrów schematu zastępczego silników indukcyjnych i nastaw regulacji w strukturze algorytmu sterowania, w badanych układach napędowych, określono wpływ w/w czynników na dynamikę pracy zespołów napędowych i dokonano diagnostyki pracy napędów elektromechanicznych maszyn górnictwa odkrywkowego. Analizowane zespoły napędowe z silnikami indukcyjnymi współpracowały z napędami komercyjnymi o sterowaniu skalarnym lub wektorowym. Otrzymane wyniki poddano analizie i wykorzystano do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych. Przedstawiono możliwość wykorzystania informacji uzyskanych bezpośrednio z systemu sterowania do dokonania korekt nastaw lub zmian charakteru reakcji na wymuszenia. Zaprezentowano najciekawsze wyniki pomiarów i obliczeń.

Słowa kluczowe: diagnostyka, napęd elektromechaniczny, silnik indukcyjny, falownik, algorytm sterowania, maszyna górnictwa odkrywkowego

The concept for using frequency converters tool software to analyze and improve the operation of drive units in opencast mining machines

Abstract: The chapter describes the issues related to the possibility of using the functionality of commercial frequency converters and utility software for diagnostics and analysis of the operation of the inverter drive unit consisting of a frequency converter, a squirrel-cage induction motor, a driven electromechanical drive and load transmission system. On the basis of the motion registrations made during the operation of the drive units and the identification of parameters of the equivalent scheme of induction motors and control settings in the structure of the control algorithm in the tested drive systems, the impact of the above-mentioned factors on the dynamics of the drive units was determined and the work of electromechanical drives of opencast mining machines was diagnosed. The analysed drive units with induction motors cooperated with commercial drives with scalar or vector control. The obtained results were analysed and used to carry out simulation calculations. The possibility of using the information obtained directly from the control system to make corrections of settings or changes in the nature of the reaction to excitation was presented. The most interesting results of measurements and calculations were presented.

Keywords: diagnostics, electromechanical drive, induction motor, inverter, control algorithm, surface mining machine

1. Technika cyfrowego sterowania, regulacji, monitorowania i diagnostyki

Obecnie większość maszyn górnictwa odkrywkowego (MGO) wyposażona jest w układy napędowe zawierające przemienniki częstotliwości VFD (Variable-Frequency Drive) i silniki indukcyjne (IM - Induction Motors) prądu przemiennego (AC - Alternative Current). Wynika to z prostoty konstrukcji i łatwości regulacji prędkości silnika indukcyjnego oraz zastosowania do zasilania falowników napięcia (voltage inverters) z tranzystorami IGBT (ang. Insulated Gate Bipolar Transistor), wyposażonych w procesory sygnalizacyjne realizujące skalarne i wektorowe algorytmy sterowania. Pozwalają one na precyzyjną regulację prędkości obrotowej oraz momentu napędowego silnika poprzez zastosowanie metod sterowania, opartych na polowo-zorientowanym opisie parametrów silnika i parametrów



funkcyjnych falownika. Powyższe wymusza konieczność znajomości parametrów zastępczego schematu silnika indukcyjnego oraz funkcjonalności sterowania falownikiem (rys. 1). Z pomocą przychodzą wbudowane, automatycznie realizowane metody identyfikacji parametrów zastępczych silnika oraz parametrów funkcyjnych falownika. Znajomość ww. parametrów jest wymagana do konfiguracji implementowanych algorytmów sterowania. Dzięki temu mamy możliwość zdefiniowania potrzebnych parametrów zastępczych modelu silnika, wykonania strojenia nastaw regulatorów prędkości i prądów oraz diagnostyki całego układu sterowania. Do realizacji ww. zadań potrzebne jest oprogramowanie narzędziowe udostępniane przez producenta oraz wiedza z dziedziny maszyn i napędów elektrycznych oraz teorii sterowania.



Rys. 1. Schemat przemiennika częstotliwości VFD z falownikiem napięcia, członem pośrednim napięcia stałego i silnikiem indukcyjnym z pomiarem prądu i prędkości [1]

Podczas procedury uruchamiania zespołu napędowego falownik-silnik, podawane są podstawowe informacje znamionowe i konfiguracyjne. Proces regulacji i związana z nim obróbka poszczególnych sygnałów odbywa się cyfrowo za pomocą układu mikroprocesorowego DSP (Digital Signal Processor). Natomiast wszystkie pozostałe dostępne składowe toru sygnałowego dla wybranego algorytmu, według którego odbywa się sterowanie, przedstawione są w dokumentacji napędu w postaci wielu stron ilustrujących schematy blokowe poszczególnych bloków realizujących określone zadania w całym procesie układu sterowania [2].

2. Budowa i oprogramowanie napędów VFD firmy Siemens

Aktualnie w napędach maszyn górnictwa odkrywkowego pracują przemienniki różnych producentów. Nasze prace koncentrowały się wokół rozwiązań firmy Siemens, która poza wieloma innymi rozwiązaniami, jest również dostawcą następujących rozwiązań serii napędów elektrycznych: SIMOVERT MASTERDRIVES, MICROMASTER oraz SINAMCS G/S (rys. 2).





Rys. 2. Przegląd napędów i oprogramowania napędów VFD stosowanych w MGO [2]

Do wymienionych przemienników, producent dostarcza do obsługi bezpłatne oprogramowanie narzędziowe: Drive Monitor dla napędów z rodziny SIMOVERT i oprogramowanie STARTER dla napędów z rodziny SINAMICS i MICROMASTER. Oprogramowania pracują na różnych platformach systemów operacyjnych. Instalowane na komputerach klasy PC, służą do konfigurowania i ustawiania parametrów napędów oraz umożliwiają parametryzację komunikacji przemysłowej i komunikację diagnostyczną z napędami za pomocą interfejsu szeregowego RS232, RS485 lub PROFIBUS DP.

W jednostkach tych zastosowano graficzny system reprezentacji algorytmów i struktur sterowania, który w uporządkowany i zrozumiały sposób przedstawia bardzo rozbudowaną strukturę działania. Zastosowano tzw. technologię BICO (BInector – COnnector), która reprezentuje logiczne połączenia sygnałów. Dostarczona dokumentacja [2, 3, 4] zawiera znormalizowaną numerację sygnałów wejściowych i wyjściowych BICO, opis algorytmów sterowania i bloków funkcyjnych – rysunek 3.



Rys. 3. Przykład opisu bloku funkcyjnego regulatora PI w technologii BICO dla SIMOVERT MASTERDRIVES [2]

Dzięki tym danym istnieje możliwość modelowania sposobu, w jaki realizowane jest sterowanie, aby spełnić wymagane warunki użytkownika. Jest to możliwe dzięki łączeniu bloków poszczególnych łączników ze sobą i ustawieniu parametrów poszczególnych bloków.





Rys. 4. Przykład opisu sygnałów w technologii BICO dla SINAMICS i MICROMASTER [2]

Z uwagi na zaimplementowaną funkcjonalność, istnieje również możliwość badania i rejestracji przebiegów lub archiwizacji charakterystyk czasowych (DriveMonitor i STARTER) oraz częstotliwościowych (STARTER), uzyskanych z konektorów cyfrowo przetworzonych danych np. prądu stojana silnika i jego składowych, prędkości obrotowej silnika, momentu obrotowego silnika czy sygnałów błędów i alarmów (rys. 4).

3. Dobór trybu pracy i algorytmu sterowania do wymagań aplikacji

Rozwój układów wielkiej skali integracji VLSI (very large scale of integration) oraz ultrawielkiej skali integracji ULSI (ultra large scale of integration) spowodował również rozwój automatyki przemysłowej i implementacji w zakresie algorytmów sterowania. Wszechobecna i szeroko rozpowszechniona technika cyfrowa obecnie oferuje znaczne ułatwienia w odniesieniu do projektów realizowanych w technice analogowej, a funkcje wykonywane cyfrowo dają dużą możliwość diagnostyki, rozbudowy i kontroli algorytmów sterowania oraz zapewniają łatwą aktualizację oprogramowania. Powyższe możliwości pozwalają zmniejszyć liczbę zastosowanych składników oraz umożliwiają zoptymalizowanie projektu układowego – rysunek 5.



Rys. 5. Opis parametru funkcyjnego nr p1300, odpowiedzialnego za wybór algorytmu sterowania dla przemiennika SINAMICS, 1-19 U/F, 20-23 FOC [2]



Firma Siemens już w latach 90-tych opracowała technologię BICO, co pozwoliło na opis parametrów funkcyjnych przemienników SIMOVERT, MICROMASTER i w najnowszych generacjach SINAMICS (rys. 2). O ile w klasycznym rozwiązaniu SIMOVERT do dyspozycji użytkownika pozostawały trzy algorytmy skalarne i trzy wektorowe, o tyle w napędach MICROMASTER seria 4 (MM4) i SINAMICS, do dyspozycji mamy łącznie ponad 10 różnych wariantów do wyboru. Dla VFD Micromaster seria 4 mamy do wyboru aż osiem algorytmów skalarnych i cztery algorytmy pracy wektorowej - FOC. Wybrany parametrem P1300 rodzaj sterowania ma wpływ na procesy zachodzące w całej aplikacji, gdyż często jakość sterowania ma wpływ na jakość procesu technologicznego. Natomiast, taka konstrukcja działania VFD wymaga od użytkownika bardzo dobrej znajomości technik regulacji prędkości obrotowej silników oraz interdyscyplinarnej wiedzy technicznej, gdyż nieprawidłowe nastawy mogą być niebezpieczne, zarówno dla ludzi, jak również dla maszyn i urządzeń w projektowanej czy uruchamianej aplikacji.

Idąc dalej śladem nastaw parametru P1300 dla MM4 należącego do tzw. napędów standardowych VFD z silnikami indukcyjnymi, dla użytkownika dostępne są algorytmy sterowania: skalarny - U/f (napięcie/częstotliwość) – rysunek 6 oraz polowo-zorientowany FOC (Field Oriented Control) – rysunek 7.



Rys. 6. Schemat algorytmu skalarnego na przykładzie przemiennika MICROMASTER SERIA 4, [1, 2, 3]

W zakresie sterowania polowo-zorientowanego mamy do wyboru SVC (Sensorless Vector Control), FOC (Field Oriented Control) i TC (Torque Control). Na rysunku 7 przedstawiono schematu algorytmu funkcjonalnego wykonanego w technologii BICO dla realizacji wybranego na etapie parametryzacji algorytmu sterowania. Należy pamiętać, że silnik indukcyjny jest obiektem nieliniowym a jego odwzorowanie w algorytmie sterowania jest realizowane za pomocą schematu zastępczego o parametrach skupionych. Warunkiem jest zbudowanie odpowiedniej bazy danych i jej aktualizacja. Na podstawie wykresu wskazowego silnika i schematu zastępczego typu T, wyodrębniono dwa główne robocze modele zastępcze silnika EMF (model siły elektromotorycznej) i CM (model prądowy). Model prądowy działa do około 10% wartości zadanej (dla SVC zdana funkcja liniowa), powyżej tej wartości przełącza się do modelu EMF. Algorytm do działania nie wymaga pomiaru prędkości obrotowej, która jest estymowana z pomiaru prądu. Koncepcja modelu EMF nie wymaga pomiaru prędkości obrotowej wału silnika. Model ten jest również mniej "wrażliwy" na zmianę temperatury, a w szczególności na

zmianę rezystancji wirnika pod wpływem zmiany temperatury silnika. Wydajność modelu EMF silnie zależy jednak od zmian rezystancji stojana silnika w zakresie niskich częstotliwości. Wykorzystanie tego modelu w przypadku układu z zamkniętą pętlą regulacji prędkości zapewnia dokładniejszą identyfikację parametrów maszyny oraz możliwość generowania maksymalnego momentu napędowego już praktycznie przy zerowej prędkości obrotowej.



Rys. 7. Schemat blokowy algorytmu SVC dla MICROMASTER 440 z silnikiem indukcyjnym [2, 4]

W klasycznym układzie napędowym silnika zasilanego z VFD, pracującego według wybranego algorytmu sterowania, można wyróżnić następujące elementy i bloki funkcyjne (rys. 7): regulatory składowych prądu stojana, modele zastępcze podłączonego silnika, regulator EMF, układ modulacji impulsów, układy do transformacji współrzędnych dla sterowanych wielkości. Na poziomie regulacji prądów i napięć są uwzględniane przebiegi w czasie, przesunięcia fazowe i częstotliwości. Na poziomie przełączeń tranzystorów, wielkości wyjściowe z regulatorów pradu i napięcia przetworzone zostają na sygnały bezpośrednio sterujące przekształtnikiem. Układ sterowania jest układem zamkniętym, w którym są kolejno wykorzystywane sygnały uchybu regulatora prędkości i regulatorów składowych prądu stojana. Minimalizując wartość uchybu można uzyskać odtworzenie wielkości zadanej. W większości układów napędowych sterowanie sprowadza się do nastawiania i stabilizacji prędkości obrotowej. Dla tak opracowanych algorytmów w maszynach prądu przemiennego konieczna jest kontrola napięć i prądów w trzech fazach, uwzględniająca współzależności fazowe, co jest realizowane przez zastosowanie pomiaru bezpośredniego, transformacji współrzędnych i metody orientacji wektora pola regulowanych wielkości w układzie odniesionym do przestrzennego układu trójfazowego. Zmierzone wartości są następnie dostarczane do modelu silnika, gdzie odbywa się obliczenie wewnętrznych sygnałów sprzężeń zwrotnych. Przedstawiona metoda FOC polega na wyznaczeniu składowych prądu stojana silnika: składowej Isd (odpowiedzialnej za generowanie strumienia) oraz składowej Isq (odpowiedzialnej za generowanie momentu obrotowego). Dodatkowo konieczny jest pomiar lub ocena położenia kątowego sprzężonego wektora strumienia w maszynie, gdzie wymagana jest informacja o zmiennych stanu. Potrzebne są niedostępne pomiarowo (lub trudno dostępne) informacje takie jak np. strumień w wirniku silnika indukcyjnego. Z uwagi na powyższe opracowano metody SVC, w odniesieniu do algorytmów odtwarzających niedostępne pomiarowo zmienne stanu,



które umożliwiają zastąpienie rzeczywistego pomiaru wielkości fizycznej metodą pośrednią opartą na łatwo mierzalnych zmiennych (np. pomiar prądu stojana). Każde przełączenie sekcji mocy jest bezpośrednio zależne od stanu elektromagnetycznego silnika i jest określane na podstawie obliczeń strumienia stojana i momentu obrotowego silnika.

4. Cyfrowa rejestracja sygnałów BICO dla wybranych algorytmów sterowania

Dużą pomocą dla użytkownika, szczególnie przydatną w trakcie uruchamiania jest rejestrator przebiegów elektromechanicznych – Trace, stanowiący integralną część napędu. Jest on dostępny dla SIMOVERT i SINAMICS, gdzie przy zastosowaniu techniki BICO, Trace pozwala na rejestrację stanów dynamicznych, analizę, diagnostykę, zapis i graficzną prezentację wybranych przebiegów sygnałów (w programie DriveMonitor lub STARTER) w formie wykresu mierzonych wielkości jako np. wartości procentowe z układu odniesienia parametrów przekształtnika w funkcji czasu – rysunek 8.



Rys. 8. Wybór sygnałów i ustawienia rejestratora Trace w SIMOVERT MASTREDRIVES CUVC przy wykorzystaniu oprogramowania narzędziowego DriveMonitor [4]

Wybrane sygnały to sygnały konektorowe (sygnały cyfrowe K16-bit lub K32-bit), które mogą pochodzić zarówno ze struktury wewnętrznej wybranego algorytmu sterowania pracą VFD lub mogą zostać wprowadzone jako dane PZD (dane procesowe), dostarczane z dowolnego węzła np. sieci komunikacyjnej PROFIBUS. Użytkownik określa czas próbkowania oraz czas wykonywania pomiarów, gdzie najkrótszy czas dyskretyzacji wynika z bazowego czasu próbkowania karty sterującej pracą przekształtnika. Domyślnie czas ten dla SIMOVERT wynosi $t_p=1.2$ ms. Komunikacja pomiędzy komputerem a przekształtnikiem jest realizowana w zależności od zastosowanego interfejsu poprzez sieć PROFIBUS lub za pomocą komunikacji szeregowej USS z łączem RS232/RS485 [4].

Oprogramowanie DriverMonitor lub STARTER pozwala nie tylko na wizualizację wyników w postaci wykresów czasowych, ale daje także możliwości ich bezpośredniej archiwizacji. Uzyskane informacje stanowią podstawowy zbiór informacji dla serwisu uruchamiającego i pozwalają zarejestrować przebiegi zarówno rozruchowe, jak również podczas pracy ciągłej silnika: prędkość, moment, prąd, zwłaszcza w stanach dynamicznych i aplikacjach specjalizowanych. Na podstawie tych danych można optymalizować nastawy i dostosowywać napęd VFD do aplikacji, np. regulator



prędkości, prądu, położenia, co pozwoli na realizację określonych zadań z możliwie najlepszym wykorzystaniem napędu i zapewni bezpieczeństwo aplikacyjne.

5. Identyfikacja nastaw parametrów podłączonych silników

Z uwagi na stopień zaawansowania napędów VFD, producent zaimplementował procedury identyfikacji nastaw parametrów funkcyjnych i parametrów zastępczych modeli silnika. Na podstawie tzw. "biegu identyfikacyjnego" uzyskujemy potrzebne informacje opisujące napęd.



Rys. 9. Identyfikacja w stanie zatrzymanym silnika indukcyjnego: a) nastawa wstępna prądu magnesującego Im=0%, b) nastawa wstępna prądu Im=10%, P100=3, sterowanie SVC [5]

Procedura składa się najczęściej z kilku testów, w zależności od rodzaju wybranego algorytmu sterowania i zastosowanego sprzężenia zwrotnego i obejmuje: pomiar parametrów w stanie zatrzymanym, pomiar parametrów w stanie jałowym, optymalizację nastaw regulatorów i testy



półprzewodników. Wymagane parametry identyfikowane są na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w układzie pracującym wyłącznie dla potrzeb testowych i wymagają weryfikacji. Procedura ta nie jest wymagana dla niektórych algorytmów skalarnych. Identyfikacja parametrów z rysunku 9 odbywa się według zaawansowanych metod [5] w stanie zatrzymanym wirnika (stand-still), co przypomina próbę zwarcia pomiarowego, jako odpowiedź prądowa na wymuszenie napięciowe. Aplikacja i układ napędowy muszą przed uruchomieniem zostać dokładnie rozpoznane i poddane parametryzacji w wybranym algorytmie. Do tego celu służy odpowiednio dobrana przez producenta procedura parametryzacji. Wymagane są dane z tabliczki znamionowej silnika, parametry zastępcze modeli i nastawy regulatorów. Identyfikacja ma kilka etapów i wylicza podstawowe parametry np. modelu silnika dla polowo-zorientowanych algorytmów sterowania: rysunki 9, 10, 11.



Rys. 10. Bieg identyfikacyjny silnika indukcyjnego dla próby biegu jałowego: a) nastawa wstępna prądu magnesującego Im=0%, b) nastawa wstępna prądu magnesującego Im=10%, P100=4, sterowanie FOC [5]



W sytuacji, kiedy próbę można wykonać na ruchu silnika, jego parametry schematu zastępczego znajdujące się w gałęzi poprzecznej, zostaną zidentyfikowane dokładniej podczas biegu bez obciążenia – "no load" (rys. 10). Na rysunku 10 można zauważyć, jaki wpływ na przebieg identyfikacji oraz finalne nastawy mają błędnie wprowadzone skrajne warunki początkowe – rys. 10b). Przebieg próby jest odmienny, widoczne są oscylacje w przebiegach, wydłuża się czas próby, a skrajnie może dojść do sytuacji, w której próbę będzie trzeba powtórzyć. Generalnie, bieg identyfikacyjny z rysunków 10 i 11 pozwala na określenie rezystancji uzwojeń, indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń, stanu nasycenia rdzenia oraz inercji układu.



Rys. 11. Bieg identyfikacyjny silnika indukcyjnego dla próby optymalizacji nastaw regulatorów: a) nastawa wstępna prądu magnesującego Im=0%, b) nastawa wstępna prądu magnesującego Im=10%, P100=4, sterowanie FOC [5]

Dodatkowo na rysunku 11 przedstawiono dostępny test optymalizacji nastaw regulatora prędkości i przyspieszeń, mający zastosowanie tylko w trybie sterowania wektorowego FOC. Parametryzowany VFD może również wykonać autotest i test czujnika prędkości oraz test półprzewodników. Na rysunku 11 daje się zauważyć negatywny wpływ na przebieg identyfikacji oraz finalne nastawy, błędnie

wprowadzone warunki początkowe z celowo zaniżonym prądem magnesującym (rys. 11 b). Widoczne są oscylacje w przebiegach dla wartości Im=10%, układ zupełnie inaczej buduje bazę informacji, czas próby się wydłuża, a skrajnie może dojść do błędu i próba zostanie zatrzymana (rys. 11a).

6. Nastawy parametrów funkcyjnych i uruchomienie zespołu napędowego

Podczas badań diagnostycznych wykonano szereg pomiarów dotyczących stanów rozruchu i hamowania silnika dla różnych algorytmów sterowania. Poniżej zestawiono najciekawsze wyniki pomiarów zarejestrowanych podczas rozruchu układów VFD w module Trace.

6.1. Algorytmy sterowania skalarnego dla SIMOVERT VC

Dla sterowania skalarnego regulacja prądu stojana jest realizowana za pomocą zmian składowej I_{sq} (podobnie jak w sterowaniu wektorowym). Odbywa się to przy takim wyborze wartości prądu stojana I_{sd} , jaka wynika z aktualnej wartości strumienia zależnej od zadanych zmian stosunku U/f, a finalnie składowa I_{sq} reprezentuje prąd stojana pomniejszony o składową I_{sd} odpowiedzialną za strumień silnika.

Rysunek 12a) prezentuje sterowanie z pomiarem wartości chwilowej – UFC. Sterowanie to jest realizowane jako sterowanie częstotliwości z podporządkowanym obwodem regulacji prędkości z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego. Metoda ta umożliwia regulację momentu z zadaną dokładnością. Sterowanie tego typu stosuje się dla napędów indywidualnych z silnikami indukcyjnymi, które przy kompensacji poślizgu nie osiągają dostatecznej dokładności regulacji prędkości. Wartość chwilowa prędkości jest mierzona poprzez przetworniki analogowe lub cyfrowe.

Z kolei rysunek 12b) przedstawia sterowanie bez pomiaru prędkości obrotowej – UFO. Zmiennymi sterującymi są wielkości powstające poza silnikiem, takie jak napięcie i częstotliwość. Wartość zadana obu sygnałów podawana jest do układu falownika wytwarzającego przebieg PWM (Pulse With Modulation), którego podstawowa harmoniczna jest sinusoidą, przekazywaną dalej do obwodu stojana. Istotnym elementem tego algorytmu sterowania jest brak konieczności stosowania pętli sprzężenia zwrotnego od prędkości wału. Sterowanie to jest wykorzystywane w napędach indywidualnych i grupowych przy małej i średniej dokładności stabilizacji prędkości.

Zaś na rysunku 12c) zaprezentowano sterowanie w napędach maszyn włókienniczych – UF2. Algorytm jest podobny do układu sterowania częstotliwości UFO, ale bez pętli regulacji częstotliwości i kompensacji poślizgu. Sterowanie jest wykorzystywane w napędach indywidualnych i grupowych przy wymaganej dużej dokładności stabilizacji prędkości.

Porównując przebiegi charakterystyk sterowania skalarnego uzyskane na podstawie dostępnych w programie karty CUVC sterującej pracą przekształtnika SIMOVERT metod sterowania częstotliwościowego U/f=const (algorytmy sterowania z rys. 12), najlepsze rezultaty pozwala uzyskać sterowanie procesu rozruchu przy zastosowaniu obwodu sprzężenia prędkości UFC. Układ tak skonfigurowany pozwala na szybkie rozpędzenie silnika przy zachowaniu zadanej maksymalnej wartości prądu stojana określonej parametrem funkcyjnym.





Rys. 12. Przebiegi dynamiczne prądu, prędkości i napięcia z rozruchu silnika Sg90L4 sterowanego z falownika w układzie skalarnym: a) UFC, b) UFO, c) UF2 [5]



6.2. Algorytmy regulacji polowo-zorientowanej dla SIMOVERT VC

Odmiany tego rodzaju regulacji stosuje się do silników indukcyjnych w napędach indywidualnych i grupowych z obciążeniem sprzężonym mechanicznie. Przy takiej regulacji dynamika napędu z silnikiem indukcyjnym staje się porównywalna z napędem prądu stałego.



Rys. 13. Przebiegi dynamiczne prądu, prędkości i napięcia z rozruchu silnika Sg90L4 sterowanego z falownika w układzie: a) SVC, b) FOC, c) TC [5]

Na rysunku 13a) zaprezentowano regulację częstotliwości (bez czujnika prędkości) - SVC. Jest to najbardziej uniwersalny sposób regulacji polowo-zorientowanej, odpowiedni dla układów napędowych z silnikami indukcyjnymi, przy szerokim zakresie wymagań aplikacyjnych oraz wymagań, co do dynamiki układu.

Z kolei na rysunku 13b) przedstawiono regulację prędkości z czujnikiem prędkości - FOC. W tym przypadku dynamika napędu z silnikiem indukcyjnym staje się porównywalna z dynamiką napędu prądu stałego, co jest możliwe dzięki ciągłemu pomiarowi sygnału prędkości, estymacji momentu oraz regulacji prędkości, momentu i składowych prądu stojana. Dokładność regulacji FOC zależy od stopnia zaawansowania opisu modelu silnika oraz wyznaczenia aktualnej wartości momentu.

Zaś na rysunku 13c) pokazano regulację momentu z czujnikiem prędkości - TC (odmiana DTC). Układ stosuje się przy wysokich wymaganiach odnośnie dynamiki napędu, a szczególnie w sytuacji, kiedy wymagana jest realizacja zadanego przebiegu momentu napędowego. Podczas wykonywania diagnostyki pracy napędów VFD stwierdzono, że ważną rolę odgrywają ustawione parametrycznie wartości ograniczeń. Poprawny i uzasadniony technicznie wybór nastaw parametrów do ograniczeń wartości maksymalnych prądu i momentu (w granicach bezpieczeństwa, wynikających z nastaw oraz danych znamionowych silnika i przekształtnika).

6.3. Diagnostyka proces rozruchu na przykładzie sterowania wektorowego

Przebieg procesu rozruchu silnika przy sterowaniu polowo-zorientowanym realizowany przez SIMOVERT MD VC możemy podzielić na dwa etapy. Pierwszy z nich to wzbudzanie maszyny, etap związany z koniecznością wytworzenia odpowiedniego strumienia w silniku.



Rys. 14. Rozruch silnika Sg90L4 w układzie algorytmu SVC i czasie rozruchu tr=2s, [5, 6, 7]

Układ dokonuje tego podając na uzwojenia prąd stały, reprezentowany przebiegiem składowej I_{sd}, gdzie wartość wstępna uzyskiwana jest z identyfikacji, a po czasie, zatwierdzonym parametrem, pojawia się składowa I_{sq} i narasta wartość zadana częstotliwości. W celu diagnostyki pracy napędu, dokonano rejestracji przebiegów rozruchowych (rys. 14). Na powyższym rysunku dokładnie widać podstawowe ograniczenia sterowania SVC, które dotyczą precyzyjnego obliczenia aktualnego położenia wektora strumienia wirnika dla małych częstotliwości (Etap 1). Do chwili, gdy operacja ta stanie się możliwa, układ przeprowadza proces rozpędzania wstępnego (Etap 2). Brak kontroli pola na tym etapie jest



wyraźny. Można zaobserwować, iż w przedziale czasowym od chwili startu do osiągnięcia Etap 3 i przełączenia na model SEM, przebieg jest modelowy i wyidealizowany oraz wyraźnie odbiega kształtem i wartością od przebiegu rzeczywistego. Przekroczenie zakresu zmiany modelu (model SEM) zapewnia skuteczną realizację obliczeń na podstawie pomiaru prądów fazowych. Konsekwencją tego są powstające na początku rozruchu wahania i oscylacje. Z tego względu diagnostyka pracy i poprawne przeprowadzanie procesu identyfikacji parametrów schematu zastępczego silnika oraz dokonanie optymalizacji nastaw regulatorów jest kwestią zasadniczą. Pomiary w układach ze sprzężeniem prędkości (rys. 13b) wyraźnie wskazują, że stosując sprzężenie zwrotne, tego ograniczenia możemy uniknąć. Sterowanie polowo-zorientowane zapewnia realizację narzuconych ograniczeń z dokładnością parametrów wyznaczonych przez zastępczy model silnika i to bez konieczności wprowadzania dodatkowych korekt. Procesy rozruchowe silników pracujących w algorytmie ze sprzężeniem zwrotnym prędkościowym pozwalają określić aktualny strumień oraz stan elektromagnetyczny silnika w każdej chwili czasowej.

6.4. Diagnostyka pracy algorytmu sterowania

Na rysunku 15 mamy przebieg rozruchowy silnika, który po wstępnej analizie przebiegów, pozwala na stwierdzenie, że składowa I_{sd} prądu stojana (strumień), nie została określona poprawnie w wybranym algorytmie sterowania. Przemiennik poddano przed rejestracją procedurze automatycznej identyfikacji, ale VDF Micromaster nie posiadają możliwości rejestracji Trace. Pomiary wykonano jednak za pomocą przemiennika SIMOVERT MD VC, który rejestrował dane z Micromaster 440 po sieci PROFIBUS [4].



Rys. 15. Rejestracja sieciowa przebiegów rozruchowych silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika MICROMASTER 440 [4, 8]

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów, zauważamy, że niewłaściwy dobór nastawy prądu magnesującego I_m (składowa I_{sd} prądu stojana), ma zasadniczy wpływ na przebieg procesów rozruchowych a jego poprawne określenie stanowi istotny problem. Zjawisko to objawia się zmianą charakteru i wydłużeniem elektromagnetycznych procesów przejściowych. Generowane są również opóźnienia w procesie rozruchu. Na rysunku 15 zauważamy, że od chwili podania sygnału START, opóźnienie trwa około 0,5 s. Dla napędów dużych mocy, takie opóźnienia będą sięgały nawet kilku sekund. W przypadku sterowania FOC elementem, który ma zasadnicze znaczenie będzie dokładność wyznaczenia wartości rezystancji stojana uzwojenia. Jeśli rzeczywista wartość rezystancji będzie mniejsza od wartości wprowadzonej do modelu, układ sterowania dopasowuje parametry początkowej fazy rozruchu do zadanych warunków, odpowiednio zwiększa napięcie w celu skompensowania spadku



napięcia na rezystancji uzwojeń. W konsekwencji prędkość wirnika w czasie, w którym rozpoczyna się jego obliczenie na podstawie prądów fazowych, jest większa niż potrzeba procesu sterowania w tym punkcie. Na podstawie badań modelu zastępczego ze stałymi parametrami silnika indukcyjnego w stanach dynamicznych widać, że jego zachowanie jest zbliżone do odpowiedzi silnika rzeczywistego pomimo przyjęcia w modelowaniu takich uproszczeń jak pominięcie wpływu histerezy, przyjęcie stałego nasycenia obwodu magnetycznego oraz pominięcie zmian przesunięcia prądu w uzwojeniach wirnika – rysunek 16.



Rys. 16. Zmiana parametrów schematu zastępczego badanego silnika Sg90-L4, po wprowadzeniu wybranej charakterystyki termicznej [9]

Na rysunku 16 przedstawiono graficznie zmiany zarejestrowanych parametrów schematu zastępczego silnika, wybranych z modelu temperaturowego z załączoną funkcją adaptacji temperatury silnika. W opisanym przypadku silnik nie posiada czujnika temperatury, a jej zmiany są symulowane funkcją zaprogramowaną charakterystyką klasycznego czujnika PT100, tak aby można tworzyć dowolną termiczną charakterystykę pracy, a następnie wprowadzać ją do modelu temperaturowego, realizując w ten sposób funkcję adaptacji zmian parametrów ze względu na symulowane zmiany temperatury. Dzięki temu możemy diagnozować zachowanie napędu MGO pracującego w różnych warunkach pogodowych.

7. Zastosowanie sieci PROFIBUS do badań i diagnostyki układów napędowych

Przemienniki SIMOVERT MD VC mają mocno rozbudowane funkcje diagnostyczne, dzięki którym są niezastąpione w rozwiązaniach specjalizowanych czy nietypowych, gdzie konieczny jest wkład własny w postaci twórczej pracy intelektualnej. Dodatkowo, zastosowanie sieci PROFIBUS oraz szybkiej komunikacji cyklicznej w układach sterowania z prędkością transmisji rzędu 12 Mb/s, pozwalają sterować napędami VFD w czasie rzeczywistym. Urządzenia stosowane w przemyśle posiadają interfejs PROFIBUS lub aktualnie PROFINET, co daje możliwość pracy peryferyjnej





i pozwala na rejestrację oraz analizę stanów dynamicznych w tych węzłach sieci, które były dotychczas niedostępne. Jako przykład diagnostyki napędów wybrano serię MICROMASTER, która również jest produkcji firmy SIEMENS, ale należy do tzw. napędów standardowych. Napędy te posiadają technikę BICO (binektor-konektor), szereg rozbudowanych algorytmów sterowania, zaawansowane metody identyfikacji obiektowej, ale nie posiadają modułu kontrolnego Trace. W ten sposób komfort pracy i możliwość diagnostyki dla użytkownika uruchamiającego napęd MICROMASTER jest mocno zaniżony. Natomiast w przypadku trudności ruchowych nie ma możliwości oceny i dokonania badań stanów dynamicznych. Autorzy postanowili zaprezentować cyfrową funkcjonalność diagnostyki z wykorzystaniem sieci komunikacyjnych, aby wykonać badania i analizę przebiegów sygnałów pochodzących zarówno z wewnętrznej struktury sterowania badanego napędu MICROMASTER 440 jak i z dowolnego węzła sieci PROFIBUS. Rejestrowane sygnały są przebiegami w funkcji czasu, a do pomiarów wykorzystano moduł Trace w napędzie SIMOVERT MASTERDRIVES CUVC oraz szybką transmisję danych poprzez sieć PROFIBUS. Należy zaznaczyć, że ze względu na krótkie czasy próbkowania i wymiany danych, uzyskane przebiegi z badań stanów dynamicznych pozwalają na poprawną interpretację zachodzących zjawisk [5, 6].



Rys. 17. Konfiguracja sieci PROFIBUS DP do wymiany danych komunikacyjnych z MICROMASTER440 poprzez SIMATIC S7 do SIMOVERT CUVC - sieciowa diagnostyką pracy napędu Micromaster 440 [2, 10]

Na rysunku 17 przedstawiono konfigurację sieci PROFIBUS wspartej o elementy projektu hardware stworzonego w programie SIMATIC STEP 7. W tej konfiguracji jeden z przekształtników SIMOVERT MD VC, z uwagi na wbudowaną możliwość rejestracji przebiegów, jest wykorzystywany jako element rejestratora danych PZD pochodzących z sieci PROFIBUS. Pełni on tylko funkcję rejestratora z łącznym czasem próbkowania rzędu pojedynczych milisekund (czas próbkowania napędu i wymiany danych poprzez sieć ok. 0,8 ms). Sterownik PLC wysyła do napędów SIMOVERT i MICROMASTER po dwa słowa: słowo sterujące i prędkość zadaną, a odbiera dwa słowa z napędu SIMOVERT i osiem słów z napędu MICROMASTER. Słowa odbierane z napędu SIMOVERT są w tym przypadku mało istotne. Wszystkie interesujące nas informacje znajdują się w napędzie MICROMASTER. Musimy zatem tak skonfigurować ten napęd, aby siecią PROFIBUS były wysyłane żądane sygnały do sterownika PLC. Dane PZD wysyłane z przemiennika MICROMASTER są odbierane przez przemiennik SIMOVERT. Mechanizm ten wykorzystuje transmisję SLAVE-to-SLAVE. W ten sposób przemiennik SIMOVERT MD VC cyklicznie odczyta wysyłane słowa z napędu MICROMASTER. Dane PZD zostaną po odbiorze przez bufor karty CUVC przemiennika SIMOVERT zapisane w rejestratorze Trace i mogą być następnie poddane obróbce cyfrowej.





Na rysunku 18 przedstawiono zarejestrowane przebiegi rozruchowe pracy silnika indukcyjnego zasilanego z Micromaster 440. W połowie cyklu nastąpiła zmiana obciążenia na wale silnika. Zauważamy wzrost prądu pobieranego przez silnik oraz zmniejszenie częstotliwości wyjściowej. Zmienia się także częstotliwość wyjściowa, co widać wyraźnie w przebiegach fazowego prądu chwilowego. Analizując przebieg prądu wyjściowego również rozdzielimy stan rozruchu i generacji składowej Isd, a następnie zmianę modeli i pracę składowej Isq.



Rys. 18. Rejestracja przebiegów elektromechanicznych podczas zmiany obciążenia silnika zasilanego z przekształtnika MICROMASTER 440 [11]

Dzięki poprawnej konfiguracji możemy dokonać rejestracji zarówno rozruchu, jak również pracy napędu VFD podczas cyklu wydobywczego oraz monitorować całodobowo zmiany wielkości elektromechanicznych. Narzędzie będzie pomocne w doborze nastaw regulacji oraz diagnostyce układu sterowania.

Zaproponowana metoda pozwala na uzyskanie alternatywnego narzędzia diagnostycznego nie tylko dla napędów produkcji Siemens. Dotyczy ona szczególnie przypadku takiej konfiguracji, gdy w sieci PROFIBUS mamy zainstalowane napędy różnych producentów i choćby jeden napęd SIMOVERT/ SINAMICS, które pozwolą na rejestrację i wyświetlanie danych procesowych PZD. Takie narzędzie ma duże znaczenie dla serwisu i działań prewencyjnych. Jest też bardzo pomocne w przypadku optymalizacji nastaw parametrów regulacji i zastosowaniach niestandardowych, jak również pozwala na lepsze zrozumienie algorytmów sterowania w systemach napędowych różnych producentów [4].

8. Diagnostyka napędów elektromechanicznych maszyn górnictwa odkrywkowego za pomocą metod i narzędzi wykorzystujących cyfrowe algorytmy sterowania

Na rysunku 19 przedstawiono przebiegi wielkości charakterystycznych VFD dla SIMOVERT MD VC oraz sterowanego silnika, zarejestrowane w module Trace za pomocą oprogramowania DriveMonitor firmy Siemens. Przebiegi pozwalają dokonać diagnostyki pod względem nastaw parametrów schematu zastępczego oraz nastaw regulacji napędu VFD.

Rys. 19. Przebiegi procesu rozruchu silnika o mocy P_N = 160 kW zainstalowanym w aplikacji kopalnianej: algorytm wektorowy FOC ze sprzężeniem prędkościowym, rejestracja za pomocą DriveMonitor [12]

Rysunek 19 przedstawia cykl pracy silnika, gdzie:

KOMTECH 2022

- przebieg nr 1 to prędkość zadana, podana w % prędkości synchronicznej (k. turkusowy),
- przebieg nr 2 to prędkość aktualna, podana w % prędkości synchronicznej (k. czerwony),
- przebieg nr 3 to napięcie silnika, podane w % napięcia znamionowego (k. pomarańczowy),
- przebieg nr 4 to prąd silnika, podany w % prądu znamionowego (k. brązowy),
- przebieg nr 5 to moment silnika, podany w % momentu znamionowego (k. zielony),
- przebieg nr 6 to składowa Isd (strumień), podana w % prądu znamionowego (k. niebieski),
- przebieg nr 7 to składowa Isq (moment), podana w % prądu znamionowego (k. purpurowy),
- przebieg nr 8 to uchyb regulacji, podana w % prędkości synchronicznej (k. szary).

Z uwagi na widoczne drgania i oscylacje, dla wprawnego specjalisty napędów VFD, z rysunku 19, wynika konieczność weryfikacji nastaw prądu magnesującego, nastaw regulatora prędkości oraz wybranego algorytmu sterowania.

Na rysunku 20 przedstawiono przebiegi wielkości charakterystycznych VFD dla SINAMICS G150 oraz sterowanego silnika, zarejestrowane w module Trace za pomocą oprogramowania STARTER firmy Siemens. Przebiegi pozwalają dokonać diagnostyki pod względem nastaw parametrów schematu zastępczego oraz nastaw regulacji napędu VFD.



Rys. 20. Zestawienia przebiegów procesu rozruchu silnika o mocy $P_N = 160$ kW zainstalowanym w aplikacji kopalnianej: algorytm wektorowy FOC ze sprzężeniem prędkościowym, rejestracja za pomocą STARTER [10]

Na rysunku 20 i w tabeli 1 przedstawiono wielkości zarejestrowane podczas cyklu pracy rozruchu i zatrzymania napędów VFD z dwoma silnikami indukcyjnymi pracującymi w napędzie jazdy.

Wielkości zarejestrowane podczas cyklu pracy rozruchu i zatrzymania napędów VFD z dwoma silnikami indukcyjnymi pracującymi w napędzie jazdy [10]

Tabela 1

Wielkość zarejestrowana podana w [%] danej znamionowej:	Silnik nr 1 kolor krzywej	Silnik nr 2 kolor krzywej
prędkość aktualna w % prędkości synchronicznej	pomarańczowy	błękitny
prąd silnika w % prądu znamionowego	granatowy	jasno-zielony
składowa Isd (strumień) w % prądu znamionowego	czerwony	zielony
składowa Isq (moment) w % prądu znamionowego	fuksja	jasno-niebieski

Z uwagi na widoczne drgania i zmianę składowej Isd po rozruchu, dla wprawnego specjalisty napędów VFD, z rysunku 20, wynika konieczność weryfikacji nastaw modelu zastępczego silnika, nastawy prądu magnesującego, nastaw regulatora prędkości oraz wybranego algorytmu sterowania. Długie opóźnienia w pętlach sprzężenia zwrotnego mogą spowodować chwilowe utraty stabilności układów regulacji MGO, a drgania i oscylacje mogą skutkować częstymi uszkodzeniami elektromechanicznymi. Zastosowanie sterowania źle dobranego do obiektu regulacji może powodować również zagrożenie dla pracy ludzi i działania maszyn MGO.

9. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i zgromadzonych doświadczeń autorzy zaproponowali możliwość efektywnego wykorzystania narzędzi wbudowanych w strukturę zarządzania pracą

KOMTECH 2022



komercyjnych napędów VFD dla wybranych algorytmów sterowania z silnikami indukcyjnymi. Do dyspozycji przeszkolonego użytkownika pozostają narzędzia i metody w dziedzinie czasu i częstotliwości, do diagnozowania napędów VFD stosowanych w MGO. Diagnostyka cyfrowa napędów elektromechanicznych pozwala zarówno służbom utrzymania ruchu, jak również badaczom na:

- Wykonywanie raportów stanu zerowego, po oddaniu maszyn do ruchu i ciągłą weryfikację raporty z uruchamiania z podaniem zidentyfikowanych parametrów zastępczych, metod doboru nastawy regulacji i doboru algorytmu oraz zarejestrowanymi charakterystykami ruchowymi.
- Monitoring najważniejszych wielkości charakterystycznych dla napędów VFD i silników IM.
- Przeprowadzanie audytów rozpoznawczych i kontrolnych pod względem oceny zachowania się układu podczas pracy wydobywczej.
- Przeprowadzanie okresowych rejestracji dla MGO, które były uruchomiane w oparciu o falownikową technikę napędową – działania kontrolne i prewencyjne.
- Wykonywanie analiz awarii czy uszkodzeń zespołów elektromechanicznych, pojawiających się na obiektach
- Wykonywanie rejestracji charakterystyk rozruchowych z weryfikacją otrzymanych danych w dziedzinie czasu i częstotliwości.
- Weryfikację opóźnień powstających w pętlach regulacji np. sprzężenia zwrotnego, które mogą powodować utratę stabilności regulacji układów napędowych MGO.
- Dokonanie weryfikacji zidentyfikowanych parametrów schematu zastępczego i nastaw prądu magnesującego oraz nastaw regulatorów z poziomem ograniczeń.
- Weryfikację zmian w oprogramowaniu np. adaptację nastaw uwzględniających pory roku i zmiany parametrów podłoża oraz parametrów zastępczych silników napędowych.
- Monitorowanie poprawy właściwości regulacyjnych (uwzględnienie zmian parametrów silnika pod wpływem temperatury), w ekstremalnych warunkach pracy urządzenia.
- Weryfikację właściwego doboru pod względem mocy dla systemów napędowych oraz wartości granicznych zarówno dla stanów statycznych, jak również dynamicznych.
- Optymalizację zużycia energii elektrycznej napędów VFD i silników poprzez właściwy dobór algorytmu do obiektu i właściwą parametryzację z doborem nastaw i monitorowaniem zmian.

Dla newralgicznych maszyn, sugerujemy zastosowanie np. dodatkowych urządzeń rejestrujących za pomocą sieci PROFIBUS lub PROFINET, które będą pełniły rolę akwizytora danych, co pozwoli na wykonywanie rejestracji roboczych i zbudowanie bazy danych i opracowanie środków zaradczych [11].

Podsumowując, możliwość cyfrowej diagnostyki pracy napędów VFD, pod względem jakości regulacji z uwzględnieniem nastaw parametrów odwzorowujących model silnika i podstawowe cechy zespołu napędowego jest kwestią bardzo ważną dla maszyn MGO. Nie możemy tutaj jednak wyłącznie bazować na procedurach tzw. auto-tuningu, czy automatycznej identyfikacji, bez stosownej wiedzy pozwalającej na weryfikację otrzymanych danych, gdyż tak skonfigurowane maszyny będą stanowiły realne zagrożenie w dalszej eksploatacji. Opisywane zagadnienia wymagają wiedzy, doświadczenia, stosownych podstaw naukowo-technicznych, a przede wszystkim wyobraźni, cierpliwości i odpowiedzialnego podejścia do sterowania maszyn, w których każda zmiana niewłaściwie wykonana może skutkować poważną awarią lub uszkodzeniem maszyny czy nawet systemu MGO.

Literatura

 Jabłoński M.: Algorytmy sterowania napędem elektrycznym w realizacjach aplikacyjnych z zastosowaniem współczesnej techniki falownikowej. Biuletyn Techniczno--Informacyjny Oddziału Łódzkiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Nr 2/2020 (89), Wrzesień 2020, ISSN 2082-7377



- 2. Dokumentacja i katalogi SIEMENS dla SIMOVERT MASTERDRIVES VC, MICROMASTER 420, 440, SINAMICS S120, S150, G120, G150
- 3. Blaschke F.: "Das Verfahren der Feldorientierung zur Regelung der Asynchronenmaschine". Siemens Forschungs- und Entwicklungsberichte, Vol. 1, pp. 184-193, 1972
- 4. Jabłoński M., Grasewicz P.: Diagnostyka napędów w sieci PROFIBUS. MASZYNY, TECHNOLOGIE, MATERIAŁY TECHNIKA ZAGRANICZNA e-zeszyt (pdf) 2006-2
- 5. Jabłoński M.: Analiza parametrów funkcyjnych oraz modyfikacja algorytmów sterowania polowozorientowanego napędu falownikowego z silnikiem indukcyjnym. Praca doktorska, PŁ 2006
- 6. Błaszczyk Ł., Jabłoński M.: Konfiguracja, diagnostyka i wymiana danych procesowych w teleinformatycznych sieciach przemysłowych. Technika zagraniczna maszyny, technologie, Mat. Sigma-Not
- 7. Uchroński Ł., Jabłoński M.: Wymiana danych procesowych w aplikacjach przemysłowych. Technika zagraniczna maszyny, technologie, materiały Sigma-Not
- 8. Jabłoński M., Borkowski P.: Industrial implementations of control algorithms for voltage inverters supplying induction motors. ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING. VOL. 70(2), pp. 475–491 (2021)
- Jabłoński M., Anuszczyk J.: Współczesne algorytmy sterowania maszyn górnictwa odkrywkowego w przykładach aplikacyjnych. VII Międzynarodowy Kongres Górnictwa Węgla Brunatnego 2011 "Węgiel Brunatny - Energia - Rozwój"
- Jabłoński M., Machtałowicz S., Krajewski P.: Rola i znaczenie profili aplikacyjnych PROFIdrive w świetle nowoczesnych rozwiązań przeznaczonych do zastosowania w systemach napędów urządzeń górnictwa odkrywkowego. Instytut Górnictwa Odkrywkowego "Poltegor-Instytut". Czasopismo Górnictwo Odkrywkowe. Rocznik 2008. Tom R. 49/2, nr 6. Strony 70-75
- 11. Jabłoński M.: II Konferencja Naukowo-Techniczna Elgor 2007. Napędy urządzeń górnictwa odkrywkowego: Optymalizacja struktur sterowania nowoczesnych napędów elektrycznych na przykładzie Sinamics S120
- Jabłoński M., Borkowski P.: Wymiana systemów sterowania wraz z implementacją cyfrowej falownikowej techniki napędowej w maszynach górnictwa odkrywkowego, KOMTECH 2020, ISBN 978-83-65593-22-1



https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2022.8

Analiza porównawcza wyników pomiarów przyrostów naprężeń eksploatacyjnych w odniesieniu do modeli MES na przykładzie ramy kabiny

Artur Konewecki - Elektrometal S.A.

Krzysztof Rozwadowski - Kopalnia Soli "Wieliczka" S.A.

Szymon Molski - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Rafał Pasek - Kopalnia Soli "Wieliczka" S.A.

Streszczenie: W szybie zabytkowej Kopalni Soli "Wieliczka", do transportu turystów został zaprojektowany i zabudowany układ dwóch dźwigów. Każde z tych urządzeń może transportować niezależnie 21 osób. Z obserwacji służb utrzymania ruchu wynika, że konstrukcja ramy jest niezwykle sztywna a występujące odkształcenia są pomijalne. Rama kabiny charakteryzuje się największą sztywnością ze wszystkich elementów układu będących w ruchu. W celu weryfikacji zasadności zabudowy zwartej i sztywnej konstrukcji ramy, wykonano jej cyfrowy model geometryczny i przeprowadzono analizy numeryczne związane z obciążeniami eksploatacyjnymi. Następnie w warunkach eksploatacyjnych dokonano szeregu pomiarów rzeczywistych zmian naprężeń w konstrukcji ramy dźwigu zainstalowanego w szybie zabytkowej Kopalni Soli "Wieliczka", podczas zmiennych warunków eksploatacyjnych. Analiza otrzymanych wyników pozwoliła na podjęcie próby oceny parametrów konstrukcyjnych zastosowanej ramy kabiny.

Słowa kluczowe: pomiary, dźwig, Metoda Elementów Skończonych (MES), naprężenia, zbrojenie, rama kabiny

Comparative analysis of the measurement results of operating stresses increments in relation to FEM models, based on the cabin frame

Abstract: In the shaft of the historic "Wieliczka" Salt Mine, two lifts for transport of tourists were designed and built. Each of these devices can move 21 people independently. The observations of maintenance services show that the frame structure is extremely rigid and the deformations occurring are negligible. The cab frame has the highest rigidity of all moving system components. In order to verify the legitimacy of the compact and rigid structure of the frame, its digital geometric model was made and numerical analyzes related to operating loads were carried out. Analysis of the results allowed assessing the structural parameters of the cabin frame used.

Keywords: measurements, lift, Finite Element Method (FEM), stresses, reinforcement, cabin frame

1. Charakterystyka dźwigów

Ogólna charakterystyka techniczna urządzeń dźwigowych zabudowanych w szybie Regis (rys.1) przedstawiona została w rozdziale monografii z konferencji KOMTECH 2021 [1]. Przy wysokości podnoszenia urządzenia h = 127,7 m czas jazdy kabiny to 80 s, natomiast czas postoju to 50 s. Po uwzględnieniu czasów zamykania i otwierania drzwi oraz wsiadania i wysiadania statystycznego pasażera, teoretyczna przepustowość jednego urządzenia dźwigowego w szybie "Regis" wynosi 567 osób na godzinę.





Rys. 1. Tarcza szybu "Regis" z zabudowanymi urządzeniami [2]

2. Analiza i modelowanie konstrukcji ramy kabinowej

Na podstawie dokumentacji technicznej zamontowanego dźwigu oraz inwentaryzacji wykonanej w szybie "Regis" opracowano w oprogramowaniu Autodesk Inventor model 3D ramy dźwigu typu CF25(TP). Zamodelowana rama kabiny dźwigu składała się z dwóch symetrycznych belek górnych, dwóch belek dolnych oraz dwóch cięgieł łączących belki górne i dolne. Masa samej ramy została oszacowana na poziomie 547 kg. Do przeprowadzenia analizy statycznej wykorzystano oprogramowanie firmy Autodesk Nastran 2021. Na rysunku 2 przedstawiono trójwymiarowy model ramy kabiny dźwigu z punktami podparcia (zaznaczonymi na czerwono), siłą pochodzącą od wyposażenia i masy transportowanej F1 (kolor zielony), oraz sił pochodzących od wyzwolenia chwytaczy kabinowych (kolor fioletowy).

Rama dźwigu została zaprojektowana i wykonana ze stali konstrukcyjnej węglowej. Materiał konstrukcyjny ramy to blachy w gatunku stali S235JR według normy [3] o Re=235 MPa i Rm=340 MPa. Na podstawie tablic [4, 5] stosowanych do obliczeń wytrzymałościowych można odczytać, iż dla stali S235 wytrzymałość zmęczeniowa wynosi:

Z_{go} = 170 MPa (wytrzymałość zmęczeniowa na zginanie w cyklu wahadłowym),

Zro = 130 MPa (wytrzymałość zmęczeniowa na rozciąganie w cyklu wahadłowym),

Z_{so} = 100 MPa (wytrzymałość zmęczeniowa na skręcanie w cyklu wahadłowym).







Rys. 2. Przestrzenny model geometryczny ramy kabiny CF25(TP) - obciążenia i utwierdzenia

3. Analiza ramy kabinowej MES – obciążenie statyczne

Analiza dokumentacji technicznej pozwoliła na wyodrębnienie wszystkich elementów wyposażenia, które wpływają na obciążenie ramy.

Przyjęte całkowite obciążenie elementów nośnych konstrukcji ramy kabiny dźwigu wynika z łącznej masy w układzie wynoszącej 3923 kg z uwzględnieniem obciążenia użytkowego kabiny o wartości 1600 kg. W celu uproszczenia modelu obliczeniowego dokonano podziału tego obciążenia na dwie równe siły i przyłożono je do belek dolnych ramy kabiny, symulując w ten sposób najbardziej niekorzystny przypadek działania obciążenia. Przyjęty układ obciążenia siłami skupionymi został zastosowany celowo, powodując podczas analiz rozpatrywanie trudniejszych warunków pracy ramy kabiny. Każda z dwóch belek dolnej części ramy kabiny została obciążona siłą F = 19242 N.

Siatka elementów skończonych modelu przestrzennego składa się łącznie z 6856009 węzłów i 4136661 elementów. W wyniku przeprowadzonej statycznej liniowej analizy wytrzymałościowej przy użyciu przestrzennego modelu geometrycznego można zauważyć nieznaczne odkształcenia w zakresie sprężystym konstrukcji ramy.



Rys. 3. Przemieszczenia ramy kabinowej, belki górne [mm]



W górnej części ramy kabiny (belki górne) można zaobserwować całkowite przemieszczenia rzędu 0,3 mm, w okolicy połączenia belek głowicy z cięgłami, co zostało przedstawione na rysunku 3. Większościowy udział przemieszczeń znajduje się w osi Y. Natomiast w cięgłach obserwowane są maksymalne przemieszczenia w zakresie sprężystym w połowie ich długości, co obrazuje rysunek 4. Maksymalne, całkowite przemieszczenia cięgieł odnotowano na poziomie około 0,63 mm. Ze względu na długość zastosowanych cięgieł oraz działające siły rozciągające i momenty zginające pochodzące od belek górnych i dolnych, przemieszczenia w poszczególnych osiach ulegają rozkładowi. Przemieszczenia w osi X wynoszą około 0,52 mm natomiast w osi Y około 0,36 mm. Wielkości otrzymanych przemieszczeń w osi Z są pomijalne i osiągają wartości dziesięciotysięcznych milimetra.



Rys. 4. Przemieszczenia ramy kabinowej: belek górnej dolnej i cięgieł [mm]

W dolnej części ramy kabinowej (belki dolne) odnotowano największe całkowite przemieszczenie rzędu 3,306 mm. Jednak wynik ten nie można uznać za rzeczywisty ze względu na przyjęte w analizie obciążenie modelu siłą skupioną, gdy w rzeczywistości belki dolne ramy odbierają w układzie obciążenie ciągłe od elementów konstrukcyjnych. Uproszczenie to wynika z potrzeby analizy i sprawdzenia najbardziej niekorzystnego obciążenia belki w jej geometrycznym środku względem osi X. Jednak pomimo niekorzystnego rozłożenia sił przyjętego w symulacji otrzymane przemieszczenia na belkach dolnych można uznać za nieznaczne.





Rys. 5. Przemieszczenia ramy kabinowej, belki dolne [mm]

Na rysunku 5 widoczne są wyniki analizy dla przemieszczeń całkowitych belki dolnej kabiny, które oscylują w okolicy 1 mm. Udział przemieszczeń w poszczególnych osiach wynosił: dla osi X około 0,5 mm, dla osi Y około 0,9 mm oraz dla osi Z około 0,4 mm. Przemieszczenia belek dolnych ramy kabiny są stosunkowo niewielkie ze względu na zastosowaną płytę mocującą liny wyrównawcze, usztywniającą w znaczanym stopniu jej dolną część.



Rys. 6. Mapa naprężeń zredukowanych ramy kabinowej, belki górne i cięgła [MPa]

W wyniku przeprowadzonej analizy rozkładu naprężeń zredukowanych w ramie kabiny dźwigu na znacznej powierzchni naprężenia nie przekraczają wartości 50 MPa, co można zauważyć na rysunkach 6 i 7. Wykazane miejscowe koncentracje naprężeń wynikają z nacisków powierzchniowych połączeń śrubowych. Koncentracje naprężeń zredukowanych belki dolnej i cięgła, otrzymaną w wyniku analizy przedstawiono na rysunku 8.





Rys. 7. Mapa naprężeń zredukowanych ramy kabinowej, belki dolne i cięgła [MPa]



Rys. 8. Mapa naprężeń zredukowanych ramy kabinowej, belki dolne i cięgła [MPa]

Do modelowania połączeń śrubowych ramy kabinowej został wykorzystany moduł obliczeniowy Bolt oprogramowania Autodesk Nastran 2021. Program generuje wirtualne połączenia śrubowe, przez co naprężenia w samych otworach wynikające z małego zagęszczenia siatki są znaczne i znane. Przeprowadzona analiza wykazała, iż rozwiązanie konstrukcyjne zaproponowane przez producenta w celu rozłożenia nacisków powierzchniowych, polegające na zastosowaniu podkładek kwadratowych o znacznej powierzchni przylegania, spełnia swoje konstrukcyjne zadanie. W związku z tym nie rozpatrywano przyrostów naprężeń związanych z naciskami powierzchniowymi przy połączeniach śrubowych, co przedstawiono na rysunku 8. W celu lepszego uwidocznienia rozkładu naprężeń skala wyświetlana na rysunkach 6 i 7 została obniżona do 100 MPa, natomiast na rysunku 8 została zachowana jako skala wynikowa.





Rys. 9. Mapa naprężeń: a) normalnych w osi X, b) normalnych w osi Y, c) normalnych w osi Z, d) zredukowanych wg hipotezy Hubera – Misesa, [MPa]

Rozkład naprężeń normalnych w osi X (rys. 9a) oscyluje w zakresie od -25 MPa do 50 MPa. Większe koncentracje naprężeń można zauważyć przy otworach w części dolnej ramy na rysunku 9a. Przyczyny tych lokalnych wzrostów naprężeń zostały wyjaśnione powyżej i zostaną wzięte pod uwagę. Analizując rozkład naprężeń normalnych w poszczególnych osiach X, Y oraz Z można zauważyć, że ich wartości w zasadzie nie przekraczają przyrostów ±50 MPa (rys. 9a-d).



4. Analiza ramy kabinowej MES – wyzwolenie chwytaczy

Wykonano także podobną analizę rozkładu naprężeń w ramie kabinowej dźwigu podczas zdarzenia eksploatacyjnego związanego z zadziałaniem urządzenia bezpieczeństwa - chwytaczy kabinowych.

Układ obciążeń został dobrany analogicznie jak podczas analizy statycznej. Każda z belek dolnych z ostała obciążona siłą 19242 N. Dodatkowo na połączeniu belek dolnych z cięgłami w miejscu mocowania chwytaczy, obciążono układ maksymalnymi siłami pochodzącymi od samych chwytaczy. Siły te pokazano na rysunku 2, gdzie w dolnej części strzałi skierowane są w górę, wzdłuż osi Y. Zastosowano dwa chwytacze ślizgowe model: SGB04, których zadziałanie jest wyzwalane przez linkę ogranicznika prędkości. Chwytacze posiadają również wpięty kontakt w obwód bezpieczeństwa dźwigu. Siła przenoszona przez parę chwytaczy kabinowych to 46783 N. W związku z tym, w każdym z dwóch węzłów, w którym zabudowane są chwytacze przyłożono siłę o wartości 23392 N.



Rys. 10. Przemieszczenia ramy kabinowej, belki górne z uwzględnieniem siły pochodzącej od zadziałania chwytaczy [MPa]

W wyniku dokonanej analizy można stwierdzić, iż w górnej części ramy kabiny zaobserwano całkowite przemieszczenia rzędu dziesiątych części milimetra. Występuje ono w okolicy połączenia belki głowicy z cięgłami, co zostało przedstawione na rysunku 10. Większościowy udział przemieszczeń znajduje się w osi Y. Natomiast w cięgłach ramy kabinowej możemy zaobserwować maksymalne przemieszczenia w zakresie sprężystym w trzech czwartych ich długości, co obrazuje rysunek 11. Maksymalne całkowite przemieszczenia cięgieł ramy odnotowano na poziomie około 0,3 mm. W tym wypadku główna składowa przemieszczenia jest w osi X i wynosi 0,29 mm, a w pozostałych osiach sięgają dziesięciotysięcznych części milimetra. Można zauważyć, iż przemieszczenie cięgieł nastąpiło w kierunku do środka ramy kabinowej.





Rys. 11. Przemieszczenia ramy kabinowej, cięgła z uwzględnieniem siły pochodzącej od zadziałania chwytaczy [mm]

W dolnej części ramy (belka dolna) odnotowano największe całkowite przemieszczenie, jako składowa przemieszczeń w osiach X, Y i Z, w wymiarze 2,937 mm. Wynik ten podobnie jak poprzednio nie jest wartością rzeczywistą ze względu na przyjęcie obciążenia modelu siłą skupioną, gdy w rzeczywistości belki odbierają w układzie obciążenie ciągłe od elementów konstrukcyjnych. Pomimo niekorzystnego rozłożenia sił, przemieszczenia na ramie dolnej są również niewielkie. Na rysunku 12 widoczne są średnie przemieszczenia całkowite jako składowa przemieszczeń w osiach X, Y i Z, w wymiarze około 1 mm, z udziałem przemieszczeń w osiach: X od -0,1 mm do 0,1 mm, Y od -1,7 mm do 0,1 mm oraz w osi Z od -2,3 mm do 2,3 mm. Również w tym wypadku – zadziałania chwytaczy bezpieczeństwa - przemieszczenia belek dolnych są znikome ze względu na zastosowaną płytę mocującą liny wyrównawcze, usztywniającą w znaczanym stopniu dolną część ramy kabiny.



Rys. 12. Przemieszczenia ramy kabinowej, belki dolne z uwzględnieniem siły pochodzącej od zadziałania chwytaczy [mm]



W wyniku przeprowadzonej analizy rozkładu naprężeń zredukowanych w ramie podczas działania chwytaczy kabinowych, pomimo przyłożonego znacznie większego obciążenia siłą pochodzącą od wyzwolonych chwytaczy, na znacznej powierzchni konstrukcji ramy kabinowej naprężenia nie przekraczają 50 MPa, co można zauważyć na rysunkach 13 i 14. Nieznaczne zwiększenia wartości naprężeń można zauważyć w miejscu zamocowania chwytaczy w okolicy dolnej belki ramy kabiny, jednak wartości te również nie przekraczają 50 MPa.



Rys. 13. Mapa naprężeń zredukowanych ramy kabinowej, belki górne i cięgła z uwzględnieniem siły pochodzącej od zadziałania chwytaczy (ograniczenie wyświetlania 50 MPa)



Rys. 14. Mapa naprężeń zredukowanych ramy kabinowej, belki dolne i cięgła z uwzględnieniem siły pochodzącej od zadziałania chwytaczy [MPa]

Otrzymany w wyniku analizy komputerowej rozkład naprężeń normalnych w osi X (rys. 15a) oscyluje w zakresie od -30 MPa do 15 MPa. Naprężenia dodatnie w tej osi obserwujemy głównie na górnej półce belek dolnych, co odzwierciedla odkształcenia w tym zakresie i tam lokalnie stwierdzono ich wzrosty do wartości 40 MPa. Rozkład naprężeń w osi Y (rys. 15b) oscyluje w granicach od -20 MPa do 20 MPa. Rozkład naprężeń w osi Z (rys. 15c) oscyluje w granicach od -5 MPa do 20 MPa, gdzie jedynie przemieszczenia dodatnie odnotowano na zaokrągleniach belek dolnych ramy kabiny. Można



zauważyć, że wartości rozkładu naprężeń normalnych w poszczególnych osiach X, Y oraz Z nie przekraczają przyrostów ±40 MPa. To spostrzeżenie potwierdza zaprezentowany na rysunku 15d rozkład naprężeń zredukowanych ramy kabiny wg hipotezy Hubera - Misesa. Widać, iż na większości konstrukcji ramy naprężenia zredukowane z pewnością nie przekraczają wartości 50 MPa.



Rys. 15. Mapa naprężeń: a) normalnych w osi X, b) normalnych w osi Y, c) normalnych w osi Z, d) zredukowanych wg hipotezy Hubera - Misesa z uwzględnieniem siły pochodzącej od zadziałania chwytaczy, [MPa]


5. Układ pomiarowy

W celu weryfikacji wartości naprężeń otrzymanych w wyniku analizy numerycznej dla modelu ramy kabinowej dokonano również pomiarów na rzeczywistym obiekcie dźwigowym.

Punkty zabudowy mostków tensometrycznych na ramie kabiny zostały oznaczone na rysunku 16 natomiast opis został przedstawiony w materiałach pokonferencyjnych w postaci rozdziału monografii KOMTECH 2021 [1].



Rys. 16. Lokalizacja punktów pomiarowych na ramie kabiny CF25(TP) [6]

Przyjęte oznaczenia tensometrów zabudowanych na ramie kabiny prezentuje tabela 1.

Oznaczenia	tensometrów	zabudowany	ch na	ramie	kahinv
Oznaczema	tensometi ow	Zabuuowany	сп па	ranne	Kabiny

		Tabela 1.	
Przyjęte oznaczenie	Nazwa	Położenie na ramie	
P1	Tensometr 1	Belka górna (patrz poz. 1 rys.16)	
P2	Tensometr 2		
P3	Tensometr 3		
P4	Tensometr 4	Cięgło (patrz poz. 2 rys. 16)	
P5	Tensometr 5	Belka dolna (patrz poz.3 rys 16.)	
P6	Tensometr 6		
P7	Tensometr 7		



6. Wyniki pomiarów ramy kabinowej

W planowanym eksperymencie pomiarowym założono cztery etapy badania. Każdy z etapów badania był odmienny, co do zasady funkcjonowania dźwigu osobowego. Pierwszy etap to badania podczas przejazdu rewizyjnego kabiny dźwigu wzdłuż wysokości szybu. Jazda rewizyjna odbywa się w reżimie ograniczonej prędkości do 0,3 m/s z możliwością natychmiastowego zatrzymania się oraz bez obciążenia masą transportowaną (Q = 0,0 kg).

Drugi etap badań został wykonany podczas przejazdu kabiny z prędkością nominalną. Jazda normalna dźwigu odbywa się z prędkością 4 m/s bez obciążenia masą transportowaną Q = 0,0 kg.

Trzeci etap badań obejmował rejestracje zmian naprężeń w punktach pomiarowych ramy kabiny dźwigu podczas jazdy w trybie normalnej z prędkością 4 m/s z obciążeniem masą transportowaną Q = 1600 kg.

Ostatni - czwarty etap badań to jazda kabiny dźwigu z 80% obciążeniem (Q = 1280 kg) i awaryjne hamowanie wyzwolone podczas normalnej prędkości jazdy 4 m/s. Wszystkie pomiary przeprowadzono podczas ruchu kabiny w obu kierunkach.

Przykładowe wykresy z odczytanymi zmianami naprężeń zarejestrowane przez poszczególne tensometry rozmieszczone w wybranych punktach ramy kabinowej podczas badań w pierwszym etapie prezentuje rysunek 17, a przebiegi otrzymane w drugim etapie badań prezentuje rysunek 18.







Analiza wszystkich zarejestrowanych wyników pomiarów wskazuje, że rzeczywiste zmiany naprężeń w elementach konstrukcyjnych ramy dźwigu są nieznaczne. Maksymalne zmierzone zmiany naprężeń w elementach konstrukcji nośnej ramy kabiny zmierzono tensometrem P3 i wyniosły one ok. 98 MPa (rys. 17). Z racji, że charakter pracy urządzenia ma znamiona pracy mieszanej, dlatego przyrosty naprężeń pojawiają się w kierunku zginania i skręcania konstrukcji a ich wartości nie przekraczają 60 MPa [1].

Reasumując podczas analizy uzyskanych wyników badań zauważono, iż konstrukcja nośna kabiny dźwigu pracuje w bardzo niewielkim zakresie wytrzymałości dla zastosowanego do jej budowy materiału co świadczy o tym, że wytrzymałość całej ramy jest wysoka. Fakt ten bezpośrednio wpływa na masę wszystkich elementów. Wykorzystanie metod numerycznych do oszacowania nadmiarowości materiału konstrukcyjnego znacząco może przyczynić się do zmniejszenia kosztów budowy urządzenia dźwigowego przy zachowaniu założonego poziomu bezpieczeństwa.

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono, iż przyrosty naprężeń w kierunku zginania i skręcania przekrojów nośnych są bardzo niewielkie w stosunku do wytrzymałości materiału zastosowanego do wykonania ramy kabinowej. Przyrosty te podczas obciążeń eksploatacyjnych na całej ramie nie przekraczają wartości 60 MPa, natomiast przy hamowaniu awaryjnym nie przekraczają 50 MPa.

Podczas badań modelowych zauważono, iż naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera -Misesa w znacznym zakresie układu nośnego nie przekraczają 50 MPa. Zwiększona koncentracja naprężeń następuje przy połączeniach śrubowych oraz w miejscu osadzenia sworzni kół linowych. Uzyskane w symulacji komputerowej miejscowe wzrosty wartości naprężeń powyżej 100 MPa są spowodowane uproszeniem modelu obliczeniowego i reprezentują naciski powierzchniowe, jakie są



wywierane przez łby oraz nakrętki śrub montażowych. W rzeczywistości zjawisko to wyeliminowane zostało przez zastosowanie kwadratowych podkładek rozpraszających (rys. 8). Aspekt wytrzymałości zmęczeniowej nie zostaje tu podjęty ze względu na uzyskane wyniki poniżej znamionowych wartości parametrów zmęczeniowych dla gatunku stali S235, z której wykonana została rama kabiny dźwigu. Zaprezentowane w rozdziale wyniki obliczeń numerycznych wykonane w programie Autodesk Nastran 2021 niosą ze sobą aspekt inżynierskich obliczeń. W przypadku tworzenia nowych konstrukcji przedmiotowe obliczenia należy traktować jako mocno przybliżone, które obrazują zakres i sposób rozkładu naprężeń i mogą posłużyć do rozwoju nowych konstrukcji ram dźwigów. W celu dokładnego zobarazowania rozkładu naprężeń w odniesieniu do otrzymanych wyników należy opracować model i wykonać obliczenia w bardziej zaawansowanym programie obliczeniowym opartym na MES.

Należy zauważyć, że środowisko funkcjonowania urządzenia dźwigowego jest odpowiednio przygotowane i wilgotność w szybie nie przekracza 6 g/kg. Skład chemiczny atmosfery w szybie jest zbliżony do składu powietrza na zewnątrz szybu "Regis", ponieważ to pionowe wyrobisko górnicze jest szybem wdechowym. System przygotowania powietrza wtłaczanego pozwala usunąć wilgoć. Środowisko, w którym funkcjonuje dźwig jest nisko korozyjne. Rozpatrując wyniki pomiarów uzyskanych w procesie badań na funkcjonującym obiekcie oraz wyników analiz modelowych stwierdzono, iż konstrukcja ramy kabinowej typu CF25(TP) z dwoma kołami linowymi jest przewymiarowana. Fakt ten ma bezpośredni wpływ na efekt zużycia energii w układzie, w szczególności w przypadku jazdy kabiny w górę z pełnym obciążeniem. Przedstawiony zatem proces badawczy pozwala stwierdzić przewymiarowanie zastosowanej konstrukcji ramy kabinowej dźwigu eksploatowanego w szybie Regis.

Zatem planując kolejne inwestycje w szybach górniczych polegające na zabudowie w nich klasycznych urządzeń dźwigowych, wydaje się zasadnym zwrócenie uwagi również aspekt wytrzymałościowy zastosowanej ramy kabinowej. Jednocześnie należy również określić i uwzględnić w doborze panujące w szybie warunki środowiskowe. Każda implementacja urządzenia dźwigowego w pionowym wyrobisku górniczym wymaga indywidualnego podejścia do zagadnienia transportowanych mas w układzie, w odniesieniu do bezpieczeństwa konstrukcji.

Literatura

- 1. Rozwadowski K., Konewecki A., Molski Sz., Pasek R.: Analiza pomiarów zmian naprężeń ramy kabiny i wybranych elementów zbrojenia szybowego instalacji dźwigowej zabudowanej w szybie górniczym "Regis" w Kopalni Soli Wieliczka, Gliwice, 2021
- 2. Commissioning documentation for special transport facilities in the Regis Shaft. Wieliczka Salt Mine, 2012.International Conference in Safety of Mine Hoist Installations, Ustroń 2012
- 3. PN-EN 10025:2002 Wyroby walcowane na gorąco z niestopowych stali konstrukcyjnych Warunki techniczne dostawy (norma wycofana)
- 4. Kocańda S. J., Szala S.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych: PWN, Warszawa, 1985
- 5. Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 2004
- 6. Konewecki A., Rozwadowski K., Molski Sz., Pasek R., Zuski Z.: Aspekty metrologiczne procesów pomiarowych wybranych elementów instalacji dźwigowej zaimplementowanej w szybie górniczym, Gliwice, 2020



INDEKS AUTORÓW

Bałaga Dominik (rozdz. 6)	Lutyński Aleksander (rozdz. 5		
Baron Rafał (rozdz. 5)	Lutyński Marcin (rozdz. 5)		
Bigda Joanna (rozdz. 1) Borkowski Piotr (rozdz. 7)	Matusiak Piotr (rozdz. 5) Molski Szymon (rozdz. 8)		
Czardybon Agata (rozdz. 1)	Niedworok Andrzej (rozdz. 2)		
Dobrzaniecki Piotr (rozdz. 4)	Obrębski Marek (rozdz. 4)		
Figiel Andrzej (rozdz. 2)	Pasek Rafał (rozdz. 8)		
Fudała Piotr (rozdz. 1)	Rozwadowski Krzysztof (rozdz. 8)		
Ignasiak Karina (rozdz. 1)	Siegmund Michał (rozdz. 6) Sinka Tomasz (rozdz. 4)		
Jabłoński Mariusz (rozdz. 7)			
Janas Sebastian (rozdz. 3) Janik Bartłomiej (rozdz. 4)	Świeca Wojciech (rozdz. 6)		
Kalita Marek (rozdz. 4, 6) Konewecki Artur (rozdz. 8)	Talarek Marcin (rozdz. 2) Tarkowski Artur (rozdz. 4) Woszczyński Mariusz (rozdz.6)		