

KOMTECH 2024

**Międzynarodowa
Konferencja
Naukowo-Techniczna**

**Górnictwo w dobie
zielonej transformacji**

ISBN 978-83-65593-45-0



Monografia zbiorowa

KOMTECH

Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna

GÓRNICTWO W DOBIE ZIELONEJ TRANSFORMACJI



Gliwice, 2024

Redakcja naukowa:

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

Recenzenci:

dr hab. inż. Witold Biały, prof. ITG KOMAG
dr hab. inż. Stanisław Szweda, prof. ITG KOMAG
dr inż. Grzegorz Debita
dr inż. Jacek Korski
dr inż. Piotr Matusiak
dr inż. Kamil Szewerda
dr inż. Dariusz Michalak

Redaktorzy techniczni:

mgr inż. Bogna Kolasińska
mgr Dorota Wierzbicka
Adrianna Kalita

Projekt okładki:

mgr Aleksandra Strzałkowska

Wydawca:

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

Copyright by Instytut Techniki Górniczej KOMAG

*Monografia opublikowana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa -
- Użycie niekomercyjne 4.0 Międzynarodowe (CC BY-NC 4.0)*

WPROWADZENIE

Drodzy Czytelnicy,

Jest nam niezmiernie miło, przekazać w Państwa ręce kolejne wydanie monografii z cyklu KOMTECH. Tegoroczna edycja, bogata jest w treści poświęcone zagadnieniom naukowym i technicznym związanym z przemysłem górniczym oraz energetycznym. Przedstawione w poszczególnych rozdziałach prace poruszają kwestie związane z efektywnością i bezpieczeństwem pracy maszyn i urządzeń. Ponadto zaprezentowane zostały również innowacyjne rozwiązania, które ukazują potencjał rozwojowy oraz kierunek jaki przybrała transformacja energetyczna.

Pomimo trwającego już dłuższy czas procesu wygaszania i restrukturyzacji górnictwa węgla kamiennego, kopalnie nadal muszą utrzymywać wydobywanie, aby zapewnić surowiec niezbędny dla funkcjonowania wielu gałęzi przemysłu. Nie byłoby to możliwe bez sprawnie działających maszyn górniczych. W kontekście maszyn górniczych pierwszym skojarzeniem jest zazwyczaj kombajn górniczy. Od niezawodności pracy tej maszyny zależy w dużej mierze efektywność procesu wydobywczego. Dlatego tak duży nacisk kładzie się na bezawaryjne i bezpieczne działanie maszyn urabiających. Jedną z częstszych awarii występujących podczas pracy kombajnów ścianowych jest uszkodzenie wałków skrętnych napędów organów urabiających. Takie sytuacje występują przy dużych przeciążeniach, zwłaszcza przy pracy w trudnych warunkach panujących w podziemiach kopalń. W jednej z tegorocznych prac, przeanalizowano przyczyny zrywania bezpieczników mechanicznych – wałków skrętnych oraz podjęto próbę opracowania propozycji jednolitego postępowania po wystąpieniu takich awarii. Celem było umożliwienie szybkiej identyfikacji przyczyn ich występowania. Takie podejście niewątpliwie przyczyni się do zminimalizowania występowania przestojów maszyny, wywołanych tego typu awariami.

Będąc w tematyce niezawodności maszyn i urządzeń górniczych, nie można zapomnieć o roli, jaką odgrywa górnicza sieć elektroenergetyczna. Zasilanie wyrobisk górniczych w energię elektryczną jest w dobie nowoczesnych/zelektryfikowanych i miejscami zautomatyzowanych zakładów górniczych kluczowe i odpowiada za ciągłość i bezpieczeństwo pracy. Warunki środowiskowe panujące w podziemnych wyrobiskach górniczych stanowią znaczące wyzwanie dla bezawaryjnej pracy układów zasilania maszyn i urządzeń górniczych, co często prowadzi do awarii a w konsekwencji do przestojów. Ciekawym rozwiązaniem pozwalającym na zminimalizowanie negatywnego wpływu atmosfery kopalnianej na urządzenia elektroenergetyczne, jest wykorzystanie dwutlenku węgla w postaci stałej jako środka do czyszczenia i utrzymywania w optymalnym stanie technicznym elementów i podzespołów kopalnianej sieci elektroenergetycznej. W rozdziale 2 i 3, znajdą Państwo szczegółowe informacje na temat tej technologii, której główną zaletą jest możliwość używania przy załączonym napięciu. Dodatkowym atutem jest brak konieczności demontowania i transportowania urządzeń elektroenergetycznych poza miejsce ich pracy, celem przeprowadzenia czyszczenia i konserwacji.

Pozostając w tematyce instalacji elektroenergetycznych, dużą uwagę w monografii poświęcono układom wytwarzania i magazynowania energii. Od wielu lat podkreśla się potrzebę opracowywania i wdrażania magazynów energii. Tereny górnicze wyróżniają się istotnymi atutami pod tym względem - ich infrastruktura posiada znaczący potencjał, który może zostać efektywnie zagospodarowany pod kątem magazynowania energii. Jednym z przykładów jest gromadzenie energii w szybach górniczych. Dotychczas pojawiło się wiele koncepcji dotyczących takiego zastosowania szybów kopalnianych,

które z teoretycznego i technicznego punktu widzenia były możliwe do wdrożenia. W rozdziale 8, autorzy dokonali szerokiej analizy tych rozwiązań, wskazując na ich praktyczne ograniczenia oraz niejednokrotnie znikomą użyteczność. Całość podsumowano nową ideą grawitacyjnego magazynu energii w szybie kopalnianym.

Mówiąc o magazynach energii nie sposób pominąć klasycznych elektrochemicznych magazynów, takich jak akumulatory. Od wielu lat, trwają prace nad rozwojem technologii ogniw bateryjnych. Patrząc z perspektywy zastosowania, prym wiodą technologie litowe. Od ponad dekady obserwuje się coraz szersze zastosowanie baterii ogniw litowych w przemyśle górniczym. Doświadczenia z tych lat wykazały, że kluczowym aspektem jest bezpieczeństwo ich eksploatacji. W rozdziale 7, autorzy skupili się na badaniach wybranych ogniw litowych nowej generacji. Zakres badań obejmował w głównej mierze aspekty bezpieczeństwa, ale również kwestie techniczne i organizacyjne związane z ich zastosowaniem w wielu gałęziach gospodarki.

Żeby jednak móc magazynować energię, najpierw trzeba ją wyprodukować. Od kilku lat w Europie, a tym samym w Polsce realizowany jest program sprawiedliwej transformacji. Transformacji w głównej mierze energetycznej, mającej na celu ograniczenie wytwarzania energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł zasilanych paliwami kopalnymi na bardziej ekologiczne rozwiązania. Oczywiście nadrzędnym celem tych działań jest redukcja emisji CO₂ oraz innych pierwiastków emitowanych w procesie spalania paliw kopalnych. Działania te mają na celu spowolnienie postępujących zmian klimatycznych na Ziemi, co w efekcie ma się przyczynić do poprawy zdrowia i jakości życia ludzi. Głównym kierunkiem rozwoju w tym obszarze są odnawialne źródła energii (woda, słońce, wiatr itd.). Np. rozwiązania typu MEW (Małe Elektrownie Wodne), można instalować i eksploatować w sposób stosunkowo bezinwazyjny, z poszanowaniem przyrody. W rozdziale 1 autorzy przeprowadzili przegląd wybranych rozwiązań wysokosprawnych zespołów prądotwórczych dedykowanych małym elektrowniom wodnym. Omówiono charakterystyki elektromechaniczne tych urządzeń oraz opisano miejsce ich instalacji. Przedstawiono również innowacyjną konstrukcję kompaktowego zespołu prądotwórczego.

Biorąc pod uwagę możliwości wykorzystania energii odnawialnej oraz potencjału terenów pogórnich, szczególnie w zakresie wód kopalnianych, nie można pominąć możliwości wytwarzania wodoru. Jest to obecnie kluczowy kierunek rozwoju technologii zarówno w przemyśle energetycznym, jak i transportowym, ciepłowniczym czy motoryzacyjnym. Specjaliści z ITG KOMAG opracowali i skonstruowali autorski egzemplarz elektrolizera alkalicznego, wyróżniający się prostą konstrukcją oraz możliwością uzyskania wysokiego ciśnienia gazu na wyjściu z urządzenia. Dzięki zastosowaniu wyłącznie metody elektrochemicznej uzyskano ciśnienie o wartości 200 barów. Rozwiązanie to umożliwia wyeliminowanie, co najmniej dwóch stopni sprężania (w odniesieniu do istniejących systemów), co przekłada się na cenę oraz awaryjność i bieżącą eksploatację. Tego typu elektrolizer mógłby być częścią większego systemu podłączonego do instalacji OZE oraz przetwarzającego wody kopalniane do celów energetycznych i nie tylko. Szerzej o konstrukcji i właściwościach tego rozwiązania znajdziecie Państwo w rozdziale 9.

Oprócz energii elektrycznej, która dominuje w pracach B+R w obszarze energetycznym istotną rolę odgrywa również energia cieplna. Zapotrzebowanie w ciepło jest powszechne, a wspomniane wcześniej odchodzenie od paliw kopalnych generuje potrzebę opracowywania nowych rozwiązań również w tym obszarze. Przykładem takich rozwiązań jest opisany w rozdziale 4 kocioł elektrodowy. Urządzenie to, choć od wielu lat doskonale znane w przemyśle ciepłowniczym, dotychczas nie doczekało się spektakularnego rozwoju. Kluczowym elementem takiego kotła, jak sama nazwa wskazuje, jest elektroda lub elektrody. To od ich prawidłowego działania zależy efektywność pracy

całego urządzenia. Podstawowym parametrem elektrod na etapie ich doboru lub projektowania jest ich impedancja. Ponieważ mowa tu o bardzo dużych dokładnościach, autorzy skupili się nad opracowaniem precyzyjnej metody jej pomiaru. Przeprowadzono pomiary walidujące opracowaną metodą oraz skorelowano wyniki z istniejącymi rozwiązaniami. Należy nadmienić, że precyzyjny pomiar rezystancji/impedancji ma zastosowanie również w innych gałęziach przemysłu jak np. górnictwo czy budownictwo, co świadczy o potencjale przedmiotowego rozwiązania.

W Monografii KOMTECH 2024, szczególną uwagę poświęcono także procesowi certyfikacji jednostek wytwórczych. Instytut KOMAG jest jak dotychczas jedyną jednostką posiadającą certyfikat PTPiREE na badanie i certyfikowanie jednostek wytwórczych na zgodność z kodeksem sieci NC RfG. Na przykładzie układów kogeneracyjnych, które cieszą się w ostatnim okresie dużym zainteresowaniem na rynku urządzeń elektroenergetycznych, w rozdziale 5 przedstawiono fragment badań niezbędnych do uzyskania odpowiedniego certyfikatu. W badaniach oprócz modelu generatora uwzględniono również zero wymiarowy model silnika spalinowego. Na podstawie wyników badań symulacyjnych sformułowano wnioski dotyczące możliwości analizy pracy jednostek wytwórczych pod kątem ich certyfikacji.

Redakcja pragnie złożyć serdeczne podziękowania autorom i recenzentom za ich wkład w powstanie niniejszej monografii. Wyrażamy nadzieję, że publikacja ta stanie się interesującym materiałem, który pogłębi doświadczenia oraz poszerzy perspektywę inżynierską czytelników zainteresowanych innowacjami technicznymi zarówno w przemyśle ciężkim, jak i w innych dziedzinach.

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

SPIS TREŚCI

1. Przegląd wybranych rozwiązań wysokosprawnych zespołów prądotwórczych do małych elektrowni wodnych.....	1
2. Innowacyjne technologie czyszczenia i konserwacji urządzeń nie tylko w górnictwie - badania przemysłowe i ich wykorzystanie w działalności operacyjnej przedsiębiorstwa.....	11
3. Technologia czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w podziemnych wyrobiskach górniczych z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej.....	25
4. Precyzyjna metoda pomiaru impedancji, stosowana w procesie optymalizacji parametrów elektrycznych pieca elektrodowego.....	41
5. Analiza stanów nieustalonych jednostki kogeneracyjnej - weryfikacja wymagań kodeksu sieci NC RfG.....	50
6. Diagnostyka przyczyn zerwania bezpieczników mechanicznych - wałków skrętnych w kombajnach ścianowych.....	61
7. Badania wybranych ogniw wtórnych nowej generacji.....	70
8. Magazynowanie energii w szybach kopalnianych – grawitacyjny magazyn z ciągnem łańcuchowym.....	81
9. Postać konstrukcyjna elektrolizera alkalicznego jako efekt prac badawczo-rozwojowych realizowanych w ITG KOMAG.....	91
10. Indeks autorów	108

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.1>

Przegląd wybranych rozwiązań wysokosprawnych zespołów prądotwórczych do małych elektrowni wodnych

Jan Mikoś - Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

Stanisław Gawron - Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

Petr Bogatyrev - Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono wybrane przykłady rozwiązań wysokosprawnych zespołów prądotwórczych, przeznaczonych do małych elektrowni wodnych. Każdy z omawianych zespołów został zaprojektowany, wykonany oraz przebadany w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Górnośląskim Instytucie Technologicznym, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych. Dla wybranych zespołów prądotwórczych przedstawiono charakterystyki elektromechaniczne oraz opisano miejsce zainstalowania. Cechą wspólną wszystkich rozwiązań jest wysoka sprawność energetyczna oraz eliminacja przekładni, co w przypadku elektrowni wodnej przynosi szereg korzyści. W publikacji, opisano zalety modernizacji istniejących elektrowni wodnych. Przedstawiono również innowacyjną konstrukcję kompaktowego zespołu prądotwórczego, która została zastrzeżona patentem UP RP - patent PL 228937.

Słowa kluczowe: małe elektrownie wodne, generatory elektryczne z magnesami trwałymi, wysokosprawne zespoły prądotwórcze

Overview of selected solutions of high-efficiency generators for small hydropower plants

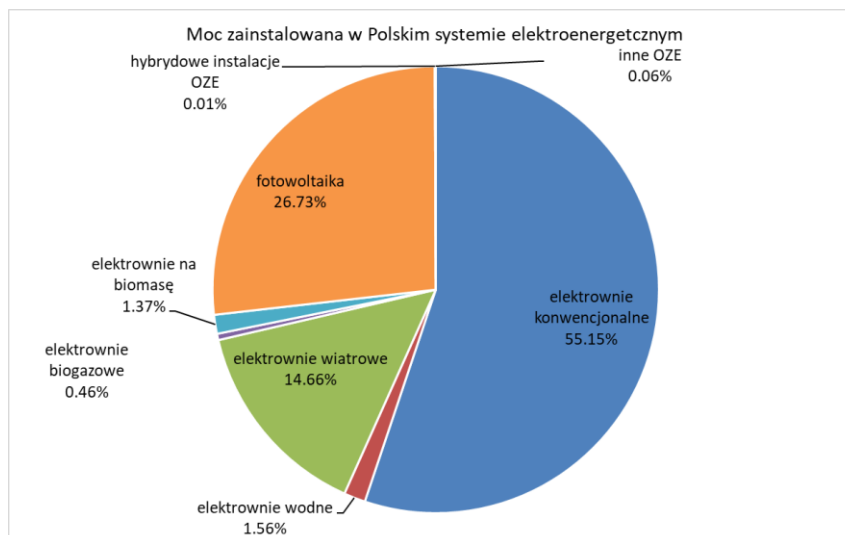
Abstract: The chapter presents selected examples of solutions of high-efficiency generator sets designed for small hydroelectric power plants. Each of the discussed units has been designed, manufactured and tested at the Łukasiewicz Research Network – Upper Silesian Institute of Technology, Center for Drives and Electrical Machines. For selected generator sets, electromechanical characteristics were presented and the place of installation was described. A common feature of all solutions is high energy efficiency and the elimination of gears, which in the case of a hydroelectric power plant brings a number of benefits. The publication describes the advantages of modernization of existing hydroelectric power plants. An innovative design of a compact generator set, which has been registered under the patent of the Patent Office of the Republic of Poland - patent PL 228937, was also presented.

Keywords: small hydroelectric power plants, permanent magnet electric generators, high-efficiency generator sets

1. Wprowadzenie

Dążenie Europy do neutralności klimatycznej wymusza na Państwach Europejskich inwestowanie w odnawialne źródła energii (OZE). Uchwalenie pakietu klimatycznego „FIT for 55” przewiduje redukcję emisji gazów cieplarnianych o 55% do 2030 roku. Obecnie w Polsce głównym źródłem energii elektrycznej w dalszym ciągu są elektrownie węglowe. Wywiązanie się z „FIT for 55” prowadzi do bardzo dużych inwestycji w OZE, w przeciwnym razie ceny energii elektrycznej będą bardzo wysokie. Energetyka wodna w Polsce odpowiada za ok. 1,5% energii wytworzonej oraz mocy zainstalowanej w całym systemie elektroenergetycznym [1]. W Polsce warunki hydrologiczne do pozyskiwania energii elektrycznej z cieków wodnych nie należą do korzystnych w porównaniu, np. do Norwegii, Szwecji czy Albanii [2]. Istnieje natomiast duży potencjał do zagospodarowania

niewykorzystanej infrastruktury do budowy małych elektrowni wodnych (MEW), definiowanych jako obiekty o łącznej mocy zainstalowanej do 10 MW [3, 4]. Potencjał elektrowni wodnych w Polsce jest szacowany na ok. 13,7 TWh/rok, z czego potencjał mniejszych rzek oraz cieków wodnych jest szacowany na ok. 1,6 TWh.



Rys. 1. Moc zainstalowana w Polskim systemie elektroenergetycznym – dane ze stycznia 2024 r. [1]

Budowa MEW na ciekach wodnych w istniejących już obiektach, takich jak np. oczyszczalnie ścieków, może zwiększyć udział energetyki wodnej w systemie elektroenergetycznym oraz zmniejszyć zapotrzebowanie na energię elektryczną samych obiektów. Zgodnie z inwentaryzacją przeprowadzoną w 2012 roku przez Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, w Polsce istnieje ok. 14 tys. obiektów o piętrzeniu wody na poziomie, co najmniej 0,7 m, z czego zagospodarowanych do wytwarzania energii elektrycznej jest zaledwie ok. 4,5 % [5].

W ramach europejskiego projektu RESTOR Hydro opracowano mapę, na której zdefiniowano ponad 50 tys. potencjalnych lokalizacji MEW w Europie z czego, aż 8,5 tys. zlokalizowanych jest w Polsce [6]. Raport "Małe elektrownie wodne w Polsce" podaje, że w Polsce istnieje 775 małych elektrowni wodnych z czego znaczna większość to elektrownie o mocy zainstalowanej poniżej 0,5 MW. Ten sam raport szacuje, że potencjał techniczny w Polsce do wykorzystania w małych elektrowniach wodnych wynosi ok. 1500 MW mocy zainstalowanej. Obecna moc zainstalowana w MEW wynosi 286 MW, co wskazuje na ok. 20% wykorzystania dostępnego krajowego potencjału technicznego.

W obiektach MEW wolnoobrotowe generatory synchroniczne z magnesami trwałymi coraz częściej znajdują uznanie, głównie ze względu na wyższą sprawność energetyczną, możliwość eliminacji przekładni mechanicznej i wyższą sterowalność, pozwalającą na lepsze wykorzystanie aktualnych warunków hydrologicznych danego cieków wodnego [7].

Konstrukcja obwodu elektromagnetycznego wirnika generatora z magnesami trwałymi ma kluczowy wpływ na uzyskiwane parametry i charakterystyki eksploatacyjne, wartości indukowanego napięcia oraz poziom współczynnika THD napięcia fazowego i międzyfazowego.

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane rozwiązania zespołów prądotwórczych, wykorzystujących prądnice z magnesami trwałymi.

2. Wybrane wysokosprawne zespoły prądotwórcze dedykowane do małych elektrowni wodnych

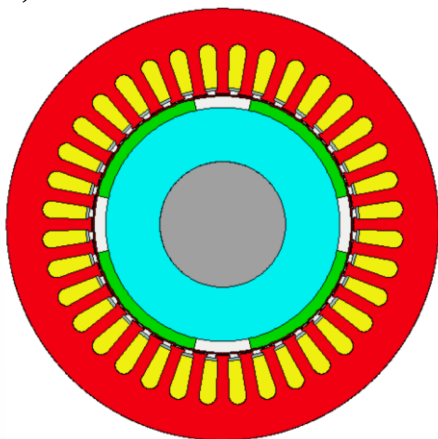
W rozdziale 2 opisano wybrane generatory z magnesami trwałymi dedykowane do małych elektrowni wodnych. Głównym parametrem, na który zwracano szczególną uwagę była sprawność generatora. W przypadku elektrowni wodnych, kilkuprocentowa różnica w sprawności może przełożyć się na istotne zyski finansowe w skali roku. Podczas tworzenia biznesplanu i określania stopy zwrotu inwestycji może to mieć kluczowe znaczenie i zachęcić przyszłego inwestora do podjęcia decyzji o modernizacji i zmianie generatorów indukcyjnych na wysokosprawne generatory z magnesami trwałymi. Przedstawione zespoły prądotwórcze pracują w małych elektrowniach wodnych bezprzekładniowo, co zmniejsza awaryjność i zwiększa sprawność całej elektrowni wodnej. Wszystkie prądnice z magnesami trwałymi zostały zaprojektowane, wykonane oraz przebadane w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Górnośląskim Instytucie Technologicznym w Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych. Omawiane zespoły prądotwórcze pracują obecnie na istniejących obiektach lub są przygotowywane do przyłączenia do systemu elektroenergetycznego. Część z nich została wykonana w trakcie realizacji projektów badawczych finansowanych ze środków krajowych, pozostałe zostały wykonane na zlecenie komercyjne dla prywatnych przedsiębiorców.

2.1. Hydrogenerator o mocy 9,9 kVA

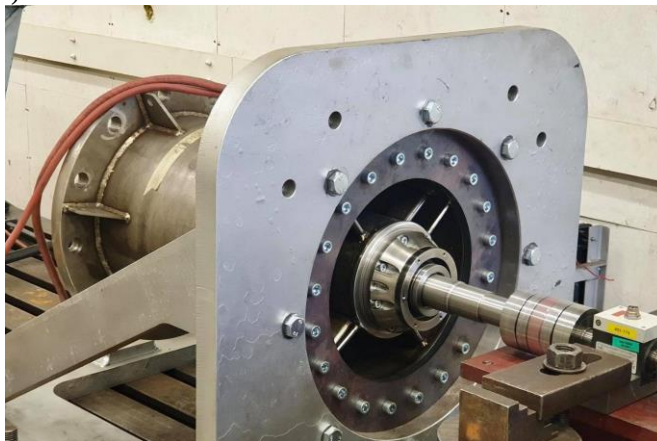
Projekt generatora o mocy 9,9 kVA został wykonany dla prywatnego inwestora. Jest to konstrukcja o najmniejszej mocy znamionowej dedykowana dla energetyki wodnej, wykonana w Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych. W rozwiązaniu zastosowano innowacyjne rozwiązanie, w którym prądnica sprzężona z turbiną Kaplana została umieszczona wewnątrz rury na cieku wodnym. Miejszem zainstalowania elektrowni wodnej jest zaporą w Wapiennicy, gdzie w rurociągu, w którym umieszczono zespół prądotwórczy, woda płynie 24 h/dobę zaopatrując stację uzdatniania wody. Obwód elektromagnetyczny prądnicy został wykonany z czterema parami biegunów magnetycznych, częstotliwości pracy wynoszącej 100 Hz oraz na napięcie znamionowe wynoszące 460 V.

Na rysunku 2 przedstawiono model obwodu elektromagnetycznego oraz fizycznie wykonaną maszynę na stanowisku badawczym.

a)



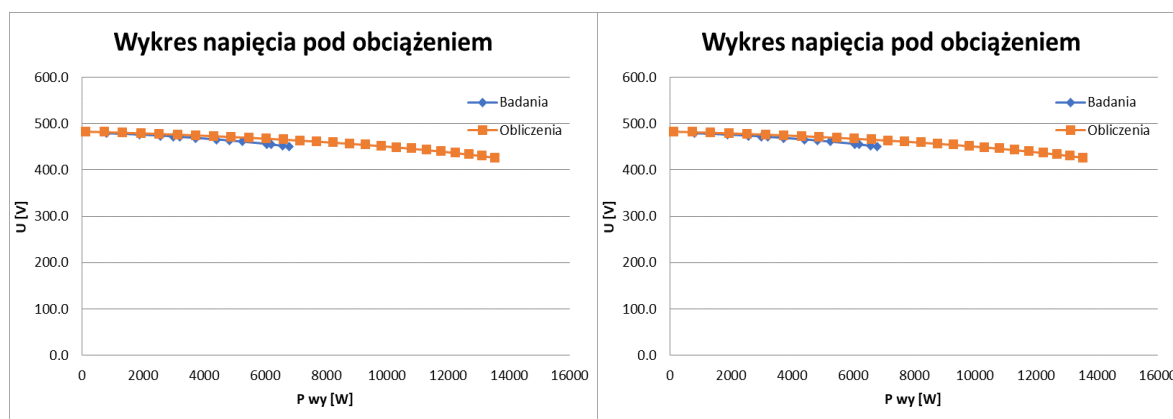
b)



Rys. 2. Model obwodu elektromagnetycznego: a) obwód elektromagnetyczny hydrogeneratora 9,9 kVA, b) hydrogenerator przygotowany do badań laboratoryjnych [źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

Ze wstępnych wyliczeń inwestora moc generatora powinna wynosić ok. 6 kVA, jednakże po uruchomieniu obiektu turbina była w stanie generować i dostarczyć ok. 10 kW mocy. Z tego powodu przeprowadzono dodatkowe obliczenia sprawdzające możliwość przeznaczenia generatora na moc o 10 kVA. Uzyskana sprawność energetyczna prądnicy przy tej mocy wynosi 92%. Generator jest omywany wodą przepływającą przez rurociąg, dzięki czemu posiada bardzo dobre warunki chłodzenia i zwiększenie mocy generatora było możliwe.

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki elektromechaniczne prądnicy.



Rys. 3. Charakterystyka napięcia oraz sprawność energetyczna w funkcji mocy elektrycznej
[źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

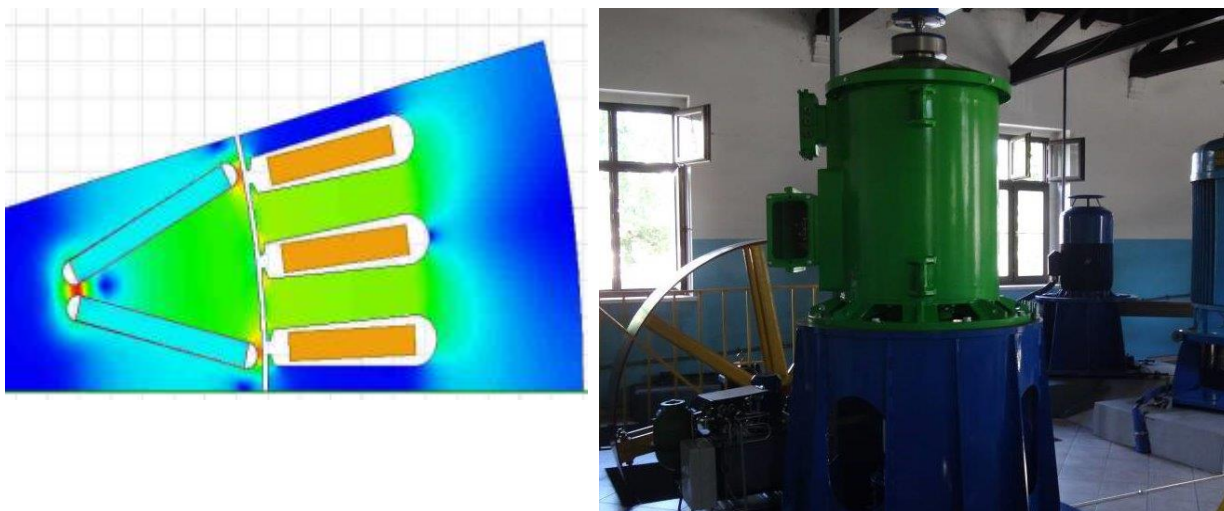
Wyznaczone charakterystyki potwierdzają, że generator może pracować, przy zwiększonej mocy. Uzyskano dużą zbieżność wyników obliczeniowych z wynikami badań laboratoryjnych. Po zrealizowaniu badań, generator został uruchomiony na zaporze w Wapiennicy. Maszyna rozpoczęła pracę w 2020 roku. Średnia roczna produkcja energii elektrycznej z hydorozespołu, dla 2-letniego okresu eksploatacji, wynosi 35000 kWh. Taka produkcja wynika między innymi z problemów mechanicznych turbiny oraz okresami suszy występującymi podczas pracy elektrowni wodnej na przestrzeni dwóch lat. W skali roku hydorozeespół może pracować nawet w okresie ok. 6500 godzin, osiągając sumaryczną sprawność na poziomie 73,6% (sprawność turbiny - 80%, sprawność generatora - 92%). Średnio można wtedy uzyskać ok. 47800 kWh energii. Przyjmując cenę za 1 kWh w 2024 r. na poziomie co najmniej 0,69 zł/kWh (bez VAT i akcyzy), pod warunkiem zużycia jej na potrzeby własne - roczna wartość produkcji energii elektrycznej wynosi ok. 24 255 zł. Koszt instalacji i uruchomienia turbiny na wodociągu wyniósł ok. 200 tys. zł. Tak więc zwrot nakładów inwestycyjnych powinien zatem nastąpić po ok. 9 latach. Choć obserwując poziom wzrostu cen energii elektrycznej można się spodziewać jego skrócenia [8].

2.2. Hydrogenerator o mocy 160 kVA

Hydrogenerator o mocy 160 kVA został zaprojektowany i wykonany w ramach projektu badawczego finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) pod tytułem „Wysokosprawne zespoły prądotwórcze dla małych hydroelektrowni”.

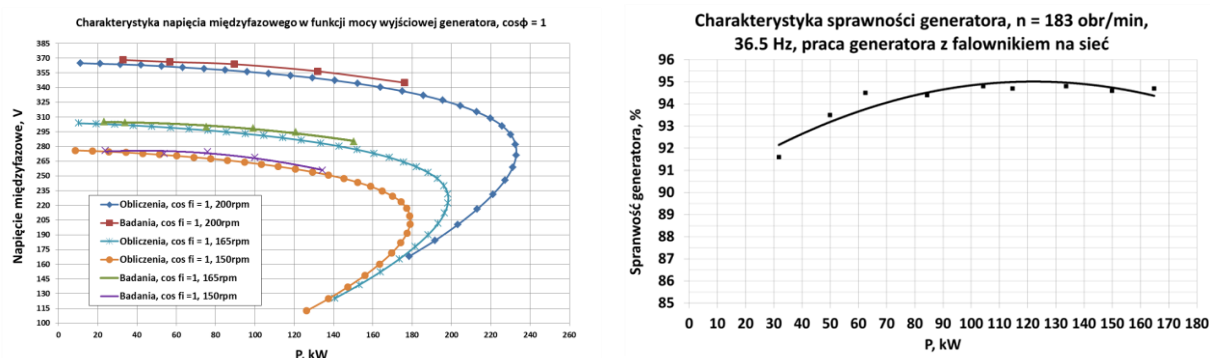
Przedmiotem prac było zaprojektowanie, wykonanie i montaż w elektrowni wodnej nowego systemu hydroenergetycznego składającego się z niskoobrotowego, wysokosprawnego generatora z magnesami trwałymi oraz falownika. System został zaistalowany bezpośrednio w miejscu modernizowanego istniejącego hydrogeneratora indukcyjnego. Modernizacja hydrogeneratora indukcyjnego na hydrogenerator z magnesami trwałymi na wyspie młyńskiej w Bydgoszczy może

przynieść zysk roczny (zakładając 1600 zł/MWh oraz prace 8000 h/rok) na poziomie 165 tysięcy złotych. Obwód elektromagnetyczny hydrogeneratora oraz jego instalację na wyspie młyńskiej w Bydgoszczy przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Obwód elektromagnetyczny hydrogeneratora oraz jego instalacja na wyspie młyńskiej w Bydgoszczy
a) obwód elektromagnetyczny hydrogeneratora 160 kVA, b) hydrogenerator zainstalowany w elektrowni wodnej
[źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

Prądnica pracuje przy zmiennej prędkości obrotowej w zakresie od 150 do 200 obr/min. Na rys. 5. przedstawiono charakterystyki zmierzone podczas badań laboratoryjnych hydrogeneratora.



Rys. 5. Charakterystyka napięcia oraz sprawność energetyczna w funkcji mocy elektrycznej
[źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

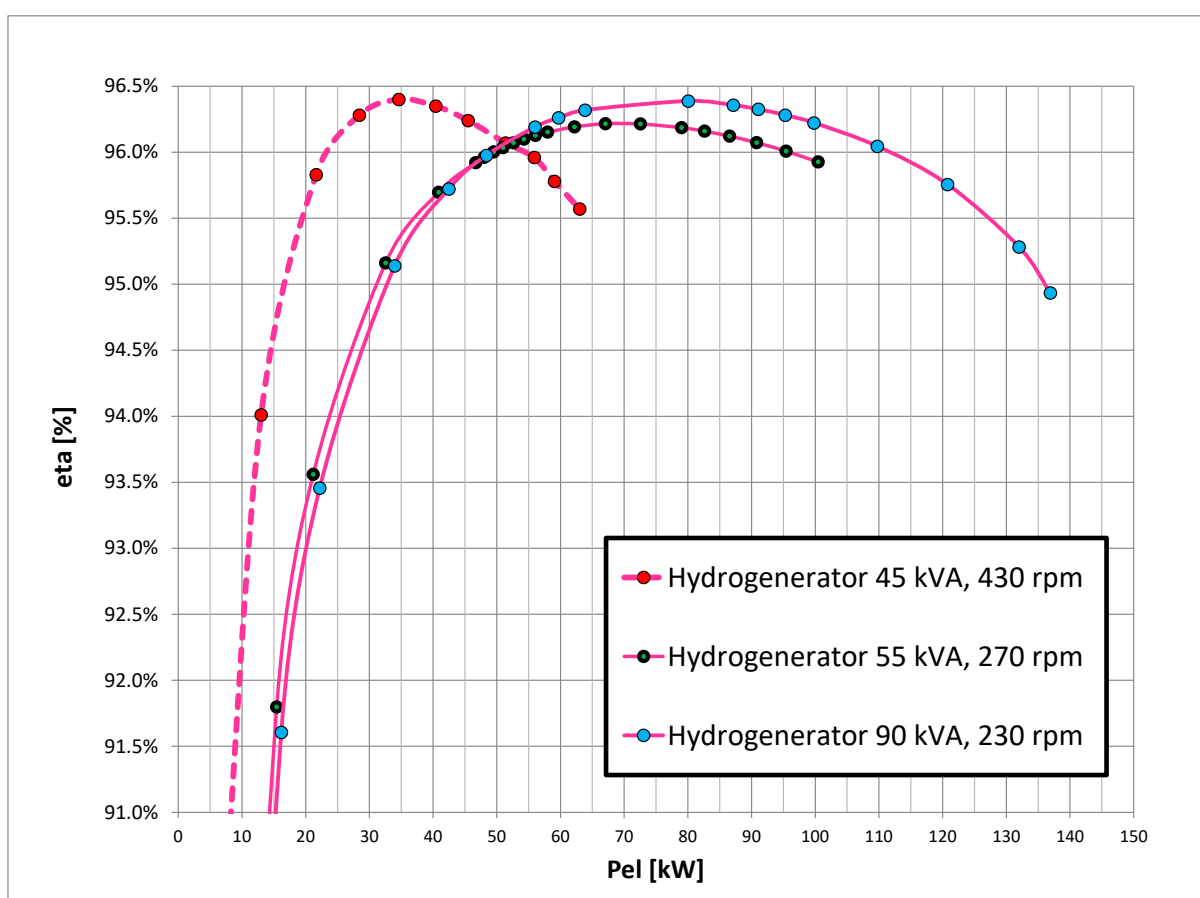
Wykonany w ramach projektu hydrozespół, składający się z turbiny wodnej, generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, współpracującego z dedykowanym przemiennikiem częstotliwości, zapewnia pracę małej elektrowni wodnej przy zmiennej prędkości obrotowej, stosownie do zmian warunków hydrologicznych. Generator synchroniczny z magnesami trwałymi zaprojektowano za pomocą opracowanych, autorskich algorytmów obliczeniowych. Przeprowadzone badania potwierdziły, że generator będzie pracował z założonymi parametrami eksploatacyjnymi oraz uzyskuje wysoką sprawność energetyczną. Optymalnie zaprojektowany i zastosowany generator z magnesami trwałymi w elektrowni wodnej, wyraźnie podniesie sprawność całego hydrozespołu.

2.3. Seria hydrogeneratorów dla niskospadowej elektrowni wodnej

W latach 2020 – 2022 realizowany był projekt opracowania i wykonania serii wysokosprawnych hydrogeneratorów przeznaczonych do bezprzekładniowych, niskospadowych elektrowni wodnych o wysokiej efektywności energetycznej. W ramach prac opracowane zostały 3 rodzaje generatorów:

1. Hydrogenerator 45 kW o znamionowej prędkości obrotowej 430 rpm.
2. Hydrogenerator 55 kW o znamionowej prędkości obrotowej 270 rpm.
3. Hydrogenerator 90 kW o znamionowej prędkości obrotowej 230 rpm.

Wspólną cechą opracowanych rozwiązań jest wysoka efektywność energetyczna. Na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę sprawności poszczególnych wariantów rozwiązania w funkcji mocy obciążenia. Sprawność generatorów w szerokim zakresie mocy obciążenia jest powyżej 96 %.



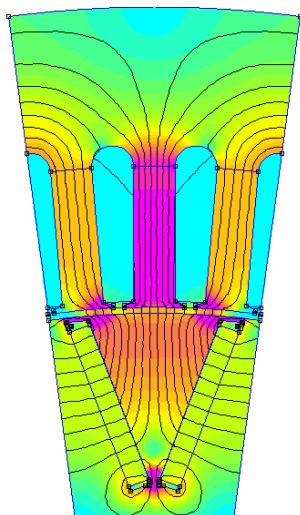
Rys. 6. Charakterystyka sprawności energetycznej w funkcji mocy elektrycznej dla serii hydrogeneratorów
[źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

2.4. Hydrogenerator o mocy 220 kVA

Hydrogenerator o mocy 220 kVA został wykonany na zlecenie komercyjne. Projekt przewidywał zaprojektowanie i wykonanie 3 hydrogeneratorów z magnesami trwałymi. Elektrownia wodna powstaje na wyspie młyńskiej w Bydgoszczy. W chwili obecnej zespoły prądotwórcze są przygotowywane do instalacji na obiekcie.

Na rys. 7. przedstawiono obwód elektromagnetyczny prądnicy oraz hydrogenerator dostarczony do klienta.

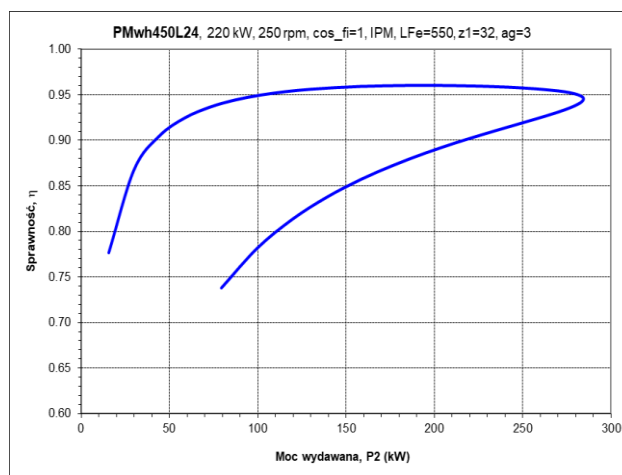
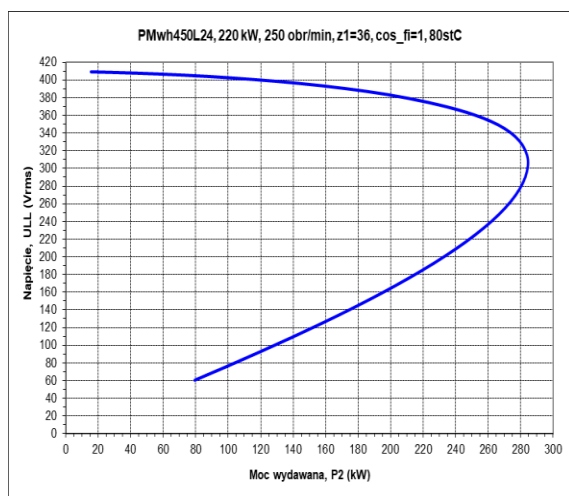
a)



b)



Rys. 7. Obwód elektromagnetyczny prądnicy oraz hydrogenerator: a) obwód elektromagnetyczny hydrogeneratora 220 kVA, b) hydrogenerator dostarczony do elektrowni wodnej [źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]



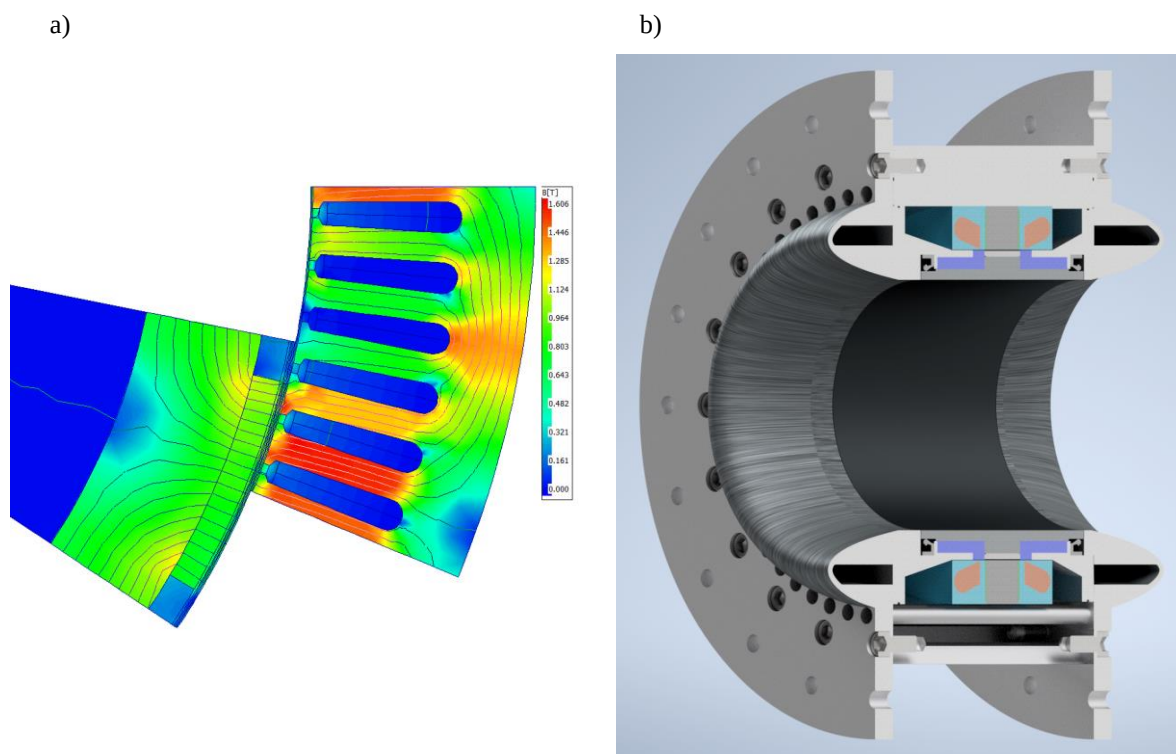
Rys. 8. Charakterystyka napięcia oraz sprawności energetycznej w funkcji mocy elektrycznej [źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

Charakterystyki otrzymane podczas obliczeń pokazują, że sprawność energetyczna generatora jest bardzo wysoka i osiąga wartość 96%. Przy tak dużej mocy generatora ma to istotny wpływ na zwrot kosztów całej inwestycji. Z uwagi na brak pracy elektrowni wodnej nie można jeszcze oszacować rocznego zysku i stopy zwrotu inwestycji.

3. Innowacyjny system do generacji energii z rur ściekowych

System do generacji energii z rur ściekowych [9] składa się z turbiny i generatora elektrycznego, przy czym turbina wodna jest zabudowana wewnątrz rury, a na zewnętrznej stronie rury nad turbiną jest osadzony wirnik generatora z zabudowanymi magnesami trwałymi (rys. 9). Agregat wodny charakteryzuje się tym, że zewnętrzne powierzchnie wirnika generatora: cylindryczna i tarczowe, są pokryte tworzywem łożyskowym, także wewnętrzna powierzchnia cylindryczna stojana generatora jest pokryta tworzywem łożyskowym, a do tarcz łożyskowych, na wprost tworzywa łożyskowego wirnika, jest przymocowany pierścień z tworzywa łożyskowego. Do kadłuba są przymocowane, wyprofilowane stożkowo do środka turbiny, tarcze łożyskowe. Tarcze łożyskowe są wyprofilowane korzystnie stożkowo w kierunku turbiny i są zamocowane do kadłuba. Jedna z tarcz ma kołnierz, a na powierzchniach bocznych tarcz są otwory. System jest objęty ochroną patentową przez UPRP, pt.: „Wodny agregat prądotwórczy”. Patent PL 228937 z dnia 06.12.2017.

W ostatnich latach obserwuje się coraz większe zainteresowanie tego typu rozwiązaniem. Z tego powodu zaprojektowano obwód elektromagnetyczny oraz konstrukcję mechaniczną systemu o mocy 20 kVA [10, 11].



Rys. 9. Obwód elektromagnetyczny: a) obwód elektromagnetyczny hydrogeneratora 20 kVA, b) model hydrogeneratora [źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]

Dla projektowanego systemu generacji energii elektrycznej z rur ściekowych zainteresowany klient nałożył pewne ograniczenia. W projekcie założono prędkość obrotową turbiny na poziomie 1000 obr/min, minimalną średnicę zewnętrzną wirnika na 300 mm oraz maksymalną średnicę zewnętrzną jarzma stojana na 476 mm. Dla obwodu elektromagnetycznego przeprowadzono wielowariantowe symulacje numeryczne dla wytypowania najlepszego rozwiązania. Analizowano różną ilość par biegunów, żłobków stojana, długość czynną pakietu blach, średnicę wewnętrzną pakietu stojana, średnicę zewnętrzną wirnika, optymalny kąt magnesów i wiele innych parametrów dla

uzyskania jak najwyższej sprawności, niskiego współczynnika THD napięcia międzyfazowego oraz jak najmniejszych tętnień momentu.

W tabeli 1 przedstawiono parametry najkorzystniejszego obwodu elektromagnetycznego uzyskanego podczas wielowariantowych obliczeń numerycznych.

**Parametry obwodu elektromagnetycznego do systemu generacji
energii elektrycznej z rur ściekowych [źródło – opracowanie Łukasiewicz – GIT]**

Tabela 1.

Obliczenia parametrów generatora	Wartość
Temperatura uzwojenia stojana, T_{uzw} [°C]	74
Temperatura magnesów, T_{mag} [°C]	43
Prędkość, n [obr/min]	1000
Częstotliwość, f [Hz]	133,3
Liczba biegunów, $2p$ [-]	16
Średnica wewnętrzna stojana, D_{sw} [mm]	372
Średnica zewnętrzna stojana, D_{sz} [mm]	476
Długość stojana, L_{fe} [mm]	35
Średnica zewnętrzna wirnika, D_{RZ} [mm]	355
Średnica wewnętrzna wirnika, D_{RW} [mm]	300
Liczba żłobków stojana, Q_s [-]	96
Skos stojana, β [°]	3,75
Szczelina powietrzna, δ [mm]	2
THD napięcia międzyfazowego, [%]	2,3
Tętnienie momentu, M_T [%]	6
Moc elektryczna, P_{el} [W]	20545
Napięcie międzyfazowe, U_{LL} [V]	403,7
Prąd fazowy, I_f [A]	29,37
Sprawność, η [%]	94,3
Współczynnik mocy, $\cos\phi$ [-]	1
Gęstość prądu, J [A/mm ²]	5,8

Koncepcja systemu generacji energii elektrycznej z rur ściekowych jest obecnie na etapie przygotowywania ostatecznej dokumentacji. Na chwilę obecną trudno jest określić zyski oraz stopę zwrotu inwestycji, natomiast instalacja tego typu systemów w istniejących oczyszczalniach ścieków lub zakładach, które posiadają rurociągi odpadowe, może przynieść bardzo duże korzyści pod względem zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną zakładu oraz zwiększyć udział energii pozyskiwanej z elektrowni wodnych w systemie elektroenergetycznym.

4. Podsumowanie

Pakiet klimatyczny „FIT for 55” zwiększający neutralność klimatyczną krajów europejskich, wymusza budowę OZE. Elektrownie wodne mogą być dobrą alternatywą dla elektrowni wiatrowych czy fotowoltaiki. Z tego powodu w najbliższych latach popularność elektrowni wodnych może wzrosnąć.

Przedstawione w rozdziale zespoły prądotwórcze z magnesami trwałymi pokazują korzyści budowy małych elektrowni wodnych. Miejsca w których woda płynie niemal 24 h/dobę mogą przynieść szybką stopę zwrotu inwestycji, z uwagi na drożące ceny energii z roku na roku zwrot inwestycji będzie jeszcze szybszy. Generatory z magnesami trwałymi są droższymi rozwiązaniami, ale dzięki bardzo wysokiej sprawności energetycznej ich praca przynosi większe zyski przy długotrwałej pracy. W łatwy sposób generatory z magnesami trwałymi można zaprojektować na wiele par biegunów bez konieczności zwiększenia gabarytów, jak w przypadku generatorów indukcyjnych, pozwala to również na eliminację przekładni mechanicznej, dzięki czemu cały hydrozespół jest mniej awaryjny i posiada większą sprawność.

Innowacyjny system do generacji energii z rur ściekowych może zwiększyć udział energetyki wodnej poprzez modernizację istniejących rur ściekowych w miejscach uzasadnionych technicznie oraz ekonomicznie. Sprzężenie turbiny z generatorem elektrycznym eliminuje połączenie tych urządzeń poprzez wspólny wał.

Literatura

1. <https://www.erec.waw.pl/badania-statystyczne/formularze/2024> [dostęp 16 październik 2024]
2. Piwowar A., & Dzikuc M. (2022): Water Energy in Poland in the Context of Sustainable Development. *Energies*, 15(21), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en15217840J>
3. Tomczyk P., & Wiatkowski M. (2020): Challenges in the Development of Hydropower in Selected European Countries. 8. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020051008G>
4. Malicka E. (2018): Sektor małej energetyki w Polsce. *Energetyka Wodna*, 3/2018
5. UN Global Compact. (2022). Małe Elektrownie Wodne w Polsce – raport wykonany w 2022 r.
6. <https://eref-europe.org/restor-hydro-database/> [dostęp 16 październik 2024]
7. Bernatt J., Rossa R., Pistelok P. (2015) MEW z wysokosprawnym generatorem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi. *Energetyka Wodna*, 3/2015
8. Oboza K., Gładys W.: Instalacja turbiny wodnej na 90 letniej zaporze wodnej w Wapienicy. Referat wygłoszony w dniu 26 października 2023 r. podczas konferencji HYDROFORUM 2023 IMP PAN we Wrocławiu na VI sesji: Odzysk energii hydraulicznej (sesja projektu Life NEXUS).
9. Gawron S., Glinka T.: *Wodny agregat prądotwórczy*. Patent PL 228937 z dnia 06.12.2017
10. Sprawozdanie wewnętrzne z projektu badawczego nr S0B005, pt.: „Opracowanie i wdrożenie systemów do wytwarzania energii elektrycznej z małych elektrowni wodnych”, Sosnowiec 2023
11. Bogatyrev P., Jan Golec J., Gawron S. (2023): Opracowanie i wdrożenie systemów do wytwarzania energii elektrycznej z małych elektrowni wodnych, *Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe* Nr 1/2023, str. 159-164

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.2>

Innowacyjne technologie czyszczenia i konserwacji urządzeń nie tylko w górnictwie - badania przemysłowe i ich wykorzystanie w działalności operacyjnej przedsiębiorstwa

Bartłomiej Janik – 3N Solutions Sp. z o.o.

Marek Obrębski – 3N Solutions Sp. z o.o.

Piotr Chondrokostas – 3N Solutions Sp. z o.o.

Piotr Krawczyk – Politechnika Warszawska

Zbigniew Kuczera – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Rafał Łuczak – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Piotr Życzkowski – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Marek Kalita – ITG KOMAG

Streszczenie: Technologia 3N Solutions cechuje się wysoką efektywnością czyszczenia, czyli krótkim czasem realizacji, brakiem potrzeby demontażu podzespołów i możliwością usunięcia wszelkiego rodzaju zabrudzeń. Stosowanie suchego lodu poprawia bezpieczeństwo prac i umożliwia czyszczenie podzespołów, instalacji, urządzeń bez konieczności ich wyłączenia z eksploatacji i demontażu oraz transportu poza obszar działania. W rozdziale przedstawiono wyniki prac badawczo-rozwojowych realizowanych na przełomie lat 2017-2023 przez 3N Solutions sp. z o.o. Omówiono aspekty dotyczące osiągnięcia zakładanej efektywności opracowanych innowacyjnych technologii konserwacji urządzeń z uwzględnieniem zapewnienia bezpieczeństwa pracy. W rozdziale przedstawiono wybrane aspekty oceny efektywności innowacyjnych technologii przy zastosowaniu pomiarów rezystancji izolacji. Wskazano sposoby realizacji wdrożenia opracowanych technologii oraz możliwość ich wykorzystania w przemyśle.

Słowa kluczowe: suchy lód, odpylanie, odbieranie zabrudzeń, czyszczenie obiektów, strefa niebezpieczna, prace pod napięciem

Innovative technologies for cleaning and maintaining equipment not only in mining. Industrial research and its use in the operational activities of the enterprise

Abstract: 3N Solutions technology is characterized by high cleaning efficiency, short implementation time, no need to disassemble components and the ability to remove all types of dirt. The use of dry ice improves work safety and enables cleaning of components, installations and devices without the need to take them out of service, dismantle them and transport them outside the area of operation. The chapter presents the results of research and development work carried out at the turn of 2017-2023 by 3N Solutions sp. z o. o. Aspects regarding achieving the assumed effectiveness of the developed innovative device maintenance technologies, including ensuring occupational safety, are discussed. The chapter presents selected aspects of assessing the effectiveness of innovative technologies using insulation resistance measurements. Methods of implementing the developed technologies and the possibility of their use in industry were indicated.

Keywords: dust removal, dirt collection, facility cleaning, hazardous area

1. Wprowadzenie

Suchy lód otrzymywany jest przez rozprężanie ciekłego dwutlenku węgla, który jest odpowiednio formowany i uzyskuje postać granulek. W warunkach normalnych suchy lód nie topi się, lecz sublimuje, czyli przechodzi z fazy stałej w gazową. Tą własność wykorzystano do czyszczenia różnego typu powierzchni i urządzeń. Technologia oparta jest na zastosowaniu innowacyjnego

medium czyszczącego, którego głównym elementem jest specjalnie przygotowywana mieszanka gazów [1, 2, 3, 4, 5]. Mieszanka w postaci mgły gazowej, podawana jest na czyszczone urządzenia za pomocą specjalistycznych dysz. Technologia oparta jest na wykorzystaniu jako medium czyszczącego mieszaniny suchych gazów atmosferycznych oraz CO₂ w postaci stałej tzw. suchego lodu.

Wykorzystanie CO₂ to innowacyjna metoda przemysłowego czyszczenia [16, 17], w której jako czyszczywo wykorzystuje się CO₂ w postaci granulatu. Granulki te są wydmuchiwane na czyszczoną powierzchnię z dużą prędkością i wysokim ciśnieniem. Po uderzeniu suchy lód sublimuje do fazy gazowej i powoduje bardzo szybkie i gwałtowne punktowe przechłodzenia powłoki zabrudzenia. Dzięki wysokiej energii kinetycznej CO₂, dochodzi do pękania i odrywania zabrudzeń z czyszczonej powierzchni. Odrywanie zanieczyszczeń następuje w wyniku zwiększenia objętości (rozprężania) przez cząsteczki gazu w wyniku sublimacji (nawet 1000-krotnie). Zanieczyszczenia usuwane z urządzeń i podzespołów w miejscu podania mieszanki zabierane są automatycznie poprzez wyciąg ciśnieniowy [2, 6]. Zastosowanie takiego rozwiązania umożliwia prowadzenie prac w miejscu zainstalowania elementów czyszczonych bez konieczności ich kosztownego demontażu i relokacji. Podczas procesu nie dochodzi do zarysowań i zniszczenia czyszczonej powierzchni. Proces ten uznawany jest za proces bezinwazyjny, w którym nie występuje ścieranie powierzchni czyszczonej.

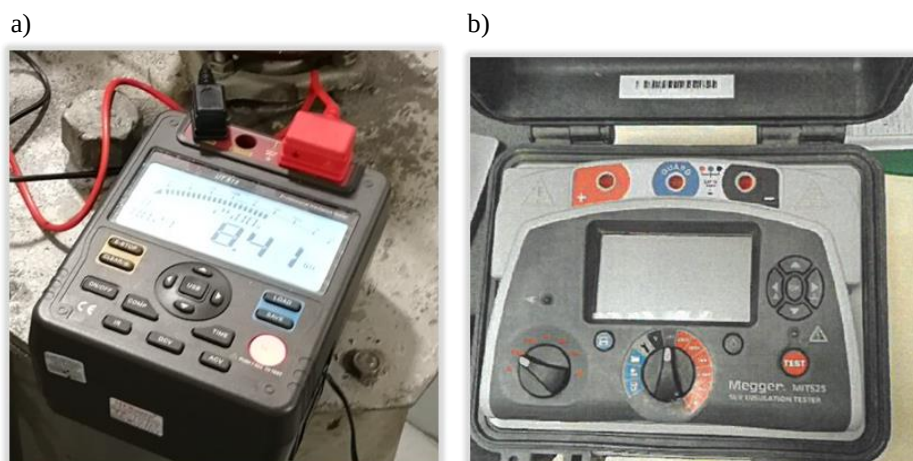
Stosowana technologia uznawana jest za proces proekologiczny, mimo wykorzystania gazu cieplarnianego, a takim jest CO₂. Dwutlenek węgla wykorzystywany do produkcji suchego lodu zazwyczaj pochodzi z recyklingu, tzn. jest wychwytywany w procesach przemysłowych, w których jest produktem ubocznym i służy do produkcji suchego lodu. W sytuacji, kiedy ekologiczne podejście i zrównoważony rozwój stają się coraz ważniejsze, kluczowe znaczenie ma stosowanie przyjaznych dla środowiska metod pozyskiwania CO₂ i jego dalsze wykorzystanie w procesach czyszczenia.

W rozdziale przedstawiono wyniki prac badawczo-rozwojowych zrealizowanych przez firmę 3N Solutions sp. z o.o. w latach 2017-2023. W analizowanym okresie firma zrealizowała dwa projekty. Pierwszy pn. „Opracowanie innowacyjnej technologii MVC (Medium Voltage Cleaning) czyszczenia urządzeń elektroenergetycznych pod średnim napięciem do 60 kV” ramach projektu Nr POIR.01.02.00-00-0209/16 działanie 1.2 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, 2014-2020 „Sektorowe Programy B+R”, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Drugi to projekt Narodowego Centrum Badań i Rozwoju POIR.01.01.01-00-0968/20-02: „Opracowanie innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej – UCT (Underground Cleaning Technology)”. Oba projekty miały na celu połączenie innowacyjności technologii czyszczenia dla celów zaspokojenia potrzeb utrzymania ciągłości ruchu w zakładach przemysłowych podczas procesów usuwania zanieczyszczeń. W rozdziale przedstawiono również wybrane aspekty oceny efektywności innowacyjnych technologii przy zastosowaniu pomiarów rezystancji izolacji. Omówiono aspekty dotyczące weryfikacji bezpieczeństwa pracy technologii jako czynnika obligatoryjnego dla realizowanych innowacyjnych rozwiązań. Przedstawiono również spostrzeżenia z procesu wdrażania innowacyjnych usług oraz relacji komplementarnych prac konserwacji urządzeń z ich wykorzystaniem.

2. Metodyka badań efektywności i warunków bezpieczeństwa procesu czyszczenia

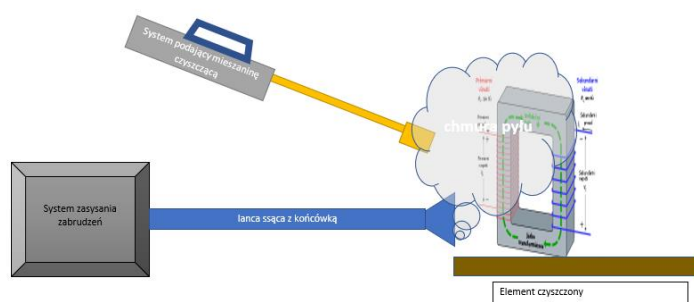
Metody czyszczenia suchym lodem stosowane przez firmę 3NS Solutions pozwalają na prowadzenie czynności bez odłączania instalacji przemysłowych od zasilania sieciowego. Prowadzone prace muszą odbywać się w sposób bezpieczny dla operatora oraz urządzeń, dlatego poprzedzane są pomiarami rezystancji izolacji, która ma decydujący wpływ na bezpieczeństwo obsługi i prawidłowe funkcjonowanie instalacji oraz urządzeń elektrycznych. Dobra izolacja, obok innych środków

ochrony, to również gwarancja ochrony przed dotykiem bezpośrednim, do którego może dojść podczas procesu czyszczenia. Systematyczne wykonywanie badań jest niezbędne w celu wykrycia pogarszającego się stanu izolacji i jest stałym elementem prac kontrolno-pomiarowych. W badaniach do pomiarów rezystancji izolacji wykorzystano miernik parametrów instalacji elektrycznych produkcji SONEL typ MPI-540 (rys. 1a) oraz Megger MIT525 (rys. 1b). Wszystkie badania wykonano w warunkach laboratoryjnych zachowując stałe parametry temperatury i wilgotności powietrza, przy zapewnieniu braku przepływu powietrza.



Rys. 1. Urządzenia pomiarowe wykorzystywane do pomiaru rezystancji izolacji: a) MPI-540, b) MIT525

Dla zapewnienia porównywalności prób badawczych parametry systemu podającego mieszankę oraz zbierającego zabrudzenia były stałe dla wszystkich wykonanych pomiarów. Napięcie probiercze dostosowane było do mierzonych podzespołów. Badania prowadzone były dla podzespołów według schematu pomiarowego pokazanego na rysunku 2, gdzie wykorzystano prototypowy układ podający mieszankę czyszczącą, układ odbierający zanieczyszczenia pyłowe i gazowe oraz element poddany czyszczeniu.



Rys. 2. Schemat do pomiarów rezystancji izolacji dla badań prototypu urządzenia

W celu analizy skuteczności działania prototypów technologii MVC i UCT badania wykonywano w seriach pomiarowych z uwzględnieniem zróżnicowanego zabrudzenia elementów. Czyszczone powierzchnie metodą UCT mogą charakteryzować się dużą różnorodnością związaną z przyleganiem zanieczyszczeń do powierzchni. W celu weryfikacji skuteczności dokonywano pomiaru wartości nominalnych rezystancji izolacji podzespołu.

Następnie zabrudzano wszystkie elementy podzespołu czyszczonego wykorzystując do tego następujące zabrudzenia:

- pył węglowy,
- pył węglowy zmieszany z substancją neutralizującą jego wybuchowość,
- rudy metali,
- zaolejenia,
- tlenki metali,
- pył nieprzewodzący,
- pył przewodzący.

Wymienione zabrudzenia cechują się zmiennością pod względem struktury, sypkości, gęstości, przywierania do powierzchni oraz przewodności elektrycznej.

W celu weryfikacji skuteczności technologii dla prototypu MVC czyszczenia urządzeń elektroenergetycznych pod średnim napięciem do 60 kV, warunkach laboratoryjnych wykonano testy efektywności czyszczenia poprzez, między innymi, pomiary rezystancji izolacji wyłącznika SN. Testy efektywności czyszczenia polegały na stwierdzeniu w wyniku pomiarów czy nastąpił powrót wartości rezystancji referencyjnej po wykonaniu procesu czyszczenia na badanym komponencie. Weryfikacja uznawana była za pozytywną, gdy średnia wartość pomiarów osiągała zakładane parametry.

Proces badawczy poległ na odniesieniu wartości zmierzonych w poszczególnych cyklach zabrudzania do wartości referencyjnej określonej na początku eksperymentu. Eksperyment podzielony był na następujące etapy:

- Pomiar referencyjny wartości rezystancji izolacji dla każdej z faz.
- Zabrudzenie urządzenia i pomiar rezystancji izolacji na urządzeniu zabrudzonym.
- Czyszczenie urządzenia z wykorzystaniem opracowanej technologii.
- Ponowny pomiar rezystancji izolacji.
- Analiza otrzymanych wyników.

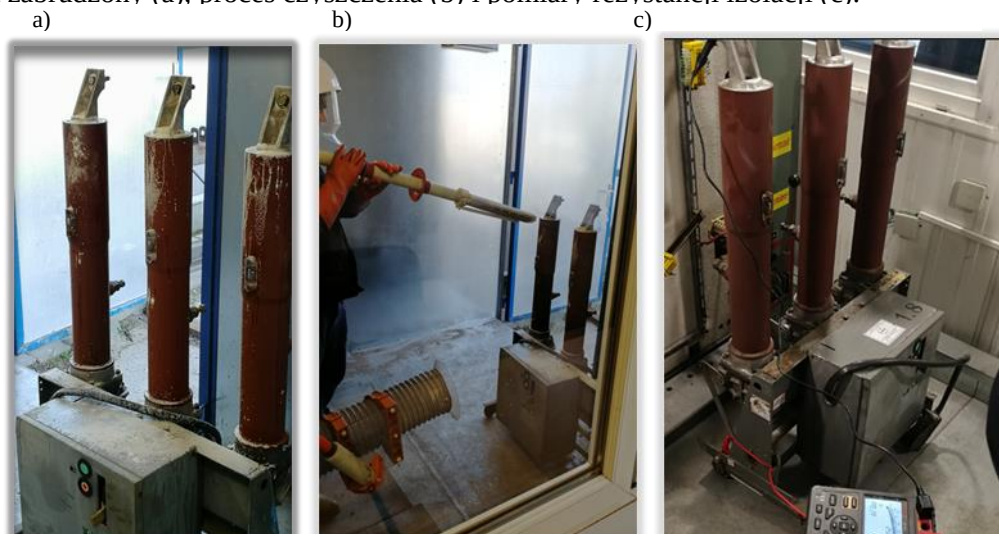
W tabeli 1 podano uzyskane podczas pomiarów wyniki dla czyszczenia wyłącznika SN.

Wyniki pomiarów rezystancji izolacji dla poszczególnych prób pomiarowych dla wyłącznika SN

Tabela 1.

Lp.	Opis pomiaru	Zabrudzenie	Pomiar faza 1	Pomiar faza 2	Pomiar faza 3
			[GΩ]	[GΩ]	[GΩ]
1	Pomiar referencyjny (rozpoczęciem eksperymentu)	Brak	40	40	40
2	Przy zabrudzeniu	Pył przewodzący	10	11	14
3	Przy zabrudzeniu	Pył nieprzewodzący	11	12	14
4	Przy zabrudzeniu	Pył organiczny	13	13	19
5	Przy zabrudzeniu	Tlenki metali	10	11	14
6	Przy zabrudzeniu	Mgła olejowa	5	5	9
7	Przy zabrudzeniu	Sadza	7	8	7
8	Po wyczyszczeniu	Pył przewodzący	40	42	42
9	Po wyczyszczeniu	Pył nieprzewodzący	41	41	40
10	Po wyczyszczeniu	Pył organiczny	40	40	40
11	Po wyczyszczeniu	Tlenki metali	39	38	39
12	Po wyczyszczeniu	Mgła olejowa	38	37	39
13	Po wyczyszczeniu	Sadza	39	39	36

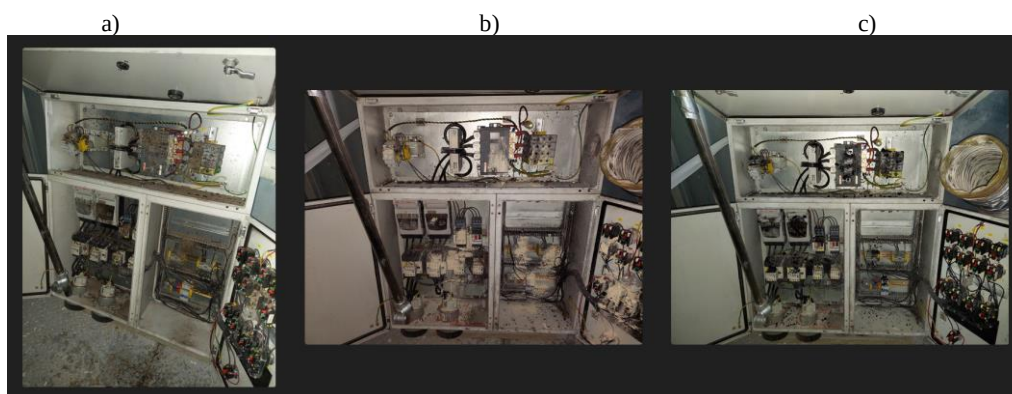
Na rysunku 3 przedstawiono przebieg badań, na którym pokazano przygotowany do badań element zabrudzony (a), proces czyszczenia (b) i pomiary rezystancji izolacji (c).



Rys. 3. Przebieg badań: a) zabrudzenie elementu badanego, b) proces czyszczenia z wykorzystaniem innowacyjnej technologii MVC, c) pomiar wartości rezystancji izolacji

W warunkach laboratoryjnych wykonano testy efektywności technologii MVC poprzez pomiary rezystancji izolacji wyłącznika SN. Na podstawie zebranych wyników pomiarów stwierdzono, że uśredniona wartość rezystancji izolacji po czyszczeniu wyniosła 99% wartości zmierzonej przed rozpoczęciem eksperymentu. W skrajnych przypadkach przy zabrudzeniu mgłą olejową czy sadzą, rezystancja izolacji spadała nawet poniżej 20% wartości w stosunku do wartości uzyskanej dla czystego wyłącznika.

Podczas realizacji kolejnego projektu badawczo-rozwojowego dla potwierdzenia aspektów skuteczności usuwania zabrudzeń dla prototypu innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej – Underground Cleaning Technology (UCT), wykonano analogiczne badania. Podobnie jak poprzednio przeprowadzono testy skuteczności technologii z wykorzystaniem porównania wartości rezystancji izolacji urządzeń elektrycznych przed rozpoczęciem testów w odniesieniu do wartości otrzymanych po ich wyczyszczeniu z referencyjnych zabrudzeń. Na rysunku 4 przedstawiono przygotowaną do badań i zabrudzoną odpowiednio szafę sterowniczą.



Rys. 4. Przykładowe zabrudzenie czyszczonej szafy elektrycznej:
a) pył nieprzewodzący, b) pył kamienny, c) pył węglowy

W ramach eksperymentalnych prac testowych wykonano pomiary między innymi dla następujących podzespołów: transformator olejowy, transformator separacyjny (suchy), rozłącznik nn, kompensator mocy biernej. Badanie prototypu technologii UCT przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 5, a wyniki uzyskanych pomiarów przedstawiono w tabeli 2.



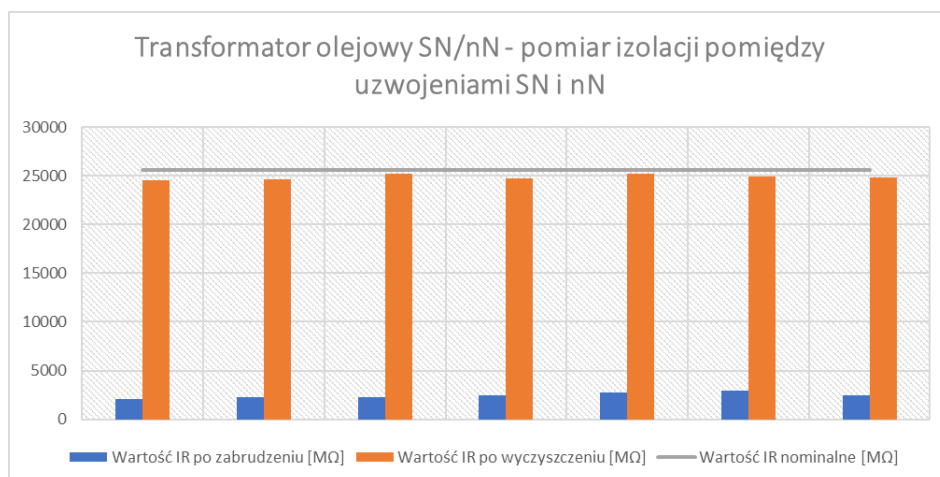
Rys. 5. Stanowisko do badań - czyszczenie podzespołów elektrycznych

Wyniki średnich wartości uzyskanych z pomiarów rezystancji izolacji

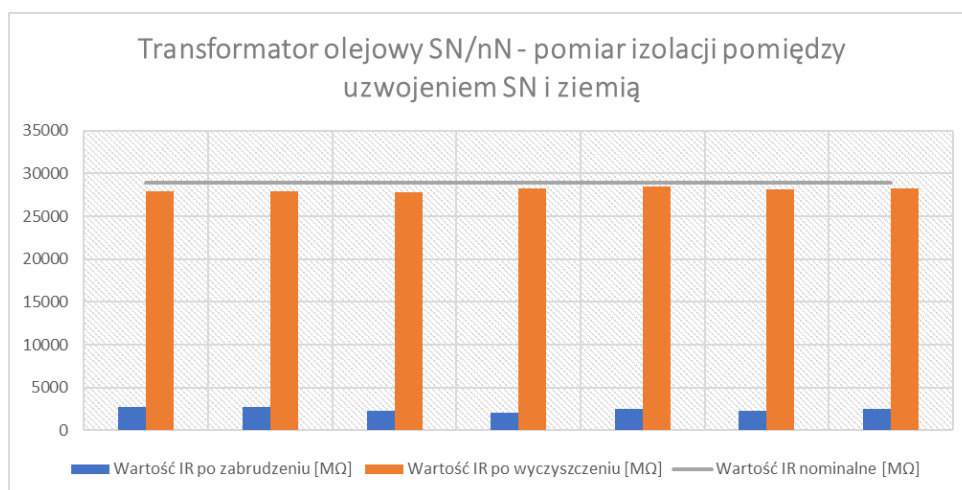
Tabela 2.

Czyszczony element	Wartość IR po zabrudzeniu [MΩ]	Wartość IR po wyczyszczeniu [MΩ]	Wartość IR nominalne [MΩ]	Wartość rezystancji po czyszczeniu [%]	Napięcie probiercze [V]
Transformator olejowy SN/nN - pomiar izolacji pomiędzy uzwojeniami SN i nN	2 474	24 856	25 600	97%	1045
Transformator olejowy SN/nN - pomiar izolacji pomiędzy uzwojeniem SN i ziemią	2 424	28 109	28 900	97%	1045
Transformator separacyjny - pomiar izolacji pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a ziemią	4 199	43 963	44 700	98%	1045
Rozłącznik nn pomiar izolacji pomiędzy fazą a ziemią	31 619	193 001	195 100	99%	1045
Rozłącznik nn pomiar izolacji pomiędzy fazami	2,1	464 630	474 000	98%	1045
Kompensator mocy biernej - szyny pomiar izolacji pomiędzy fazą a ziemią	4 694	1 144 857	1 174 000	98%	1045
Kompensator mocy biernej - szyny pomiar izolacji pomiędzy fazami	676	806 657	823 000	98%	1045
Wartości uśrednione	6 584	386 582	395 043	98%	1045

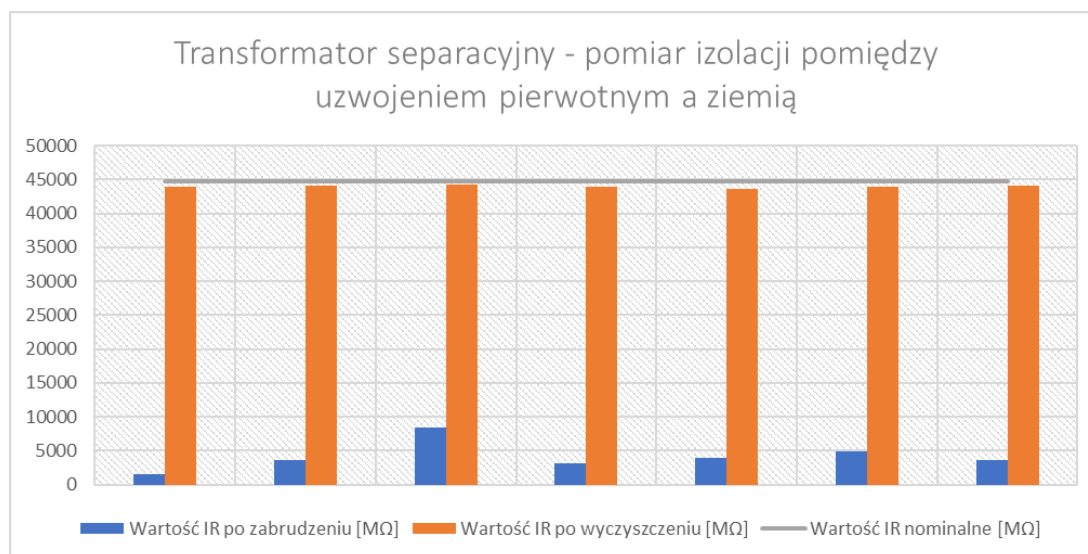
Zawarte w tabeli 2 wyniki dla poszczególnych prób pomiarowych przedstawiono w wersji graficznej na rysunkach od 6 do 12 z podziałem na rodzaj czyszczonego elementu.



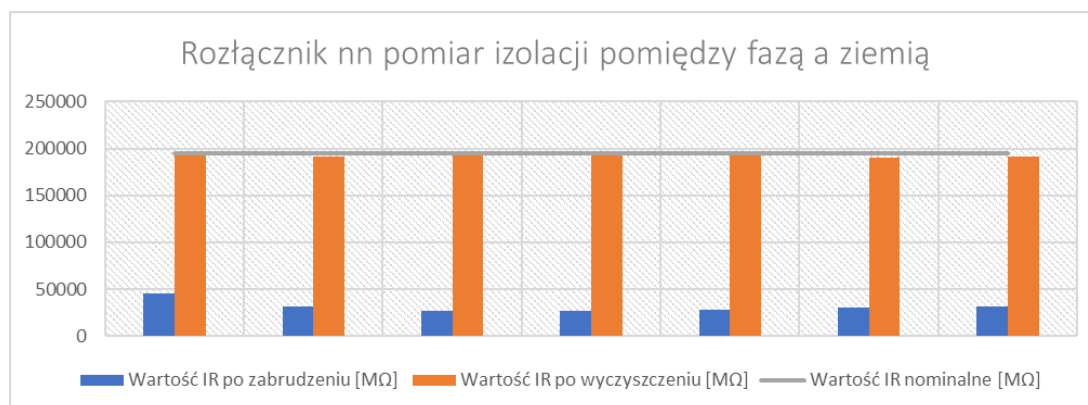
Rys. 6. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji dla transformatora olejowego SN/nn



Rys. 7. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji dla transformatora olejowego SN/nn (uzwojenie-ziemia)



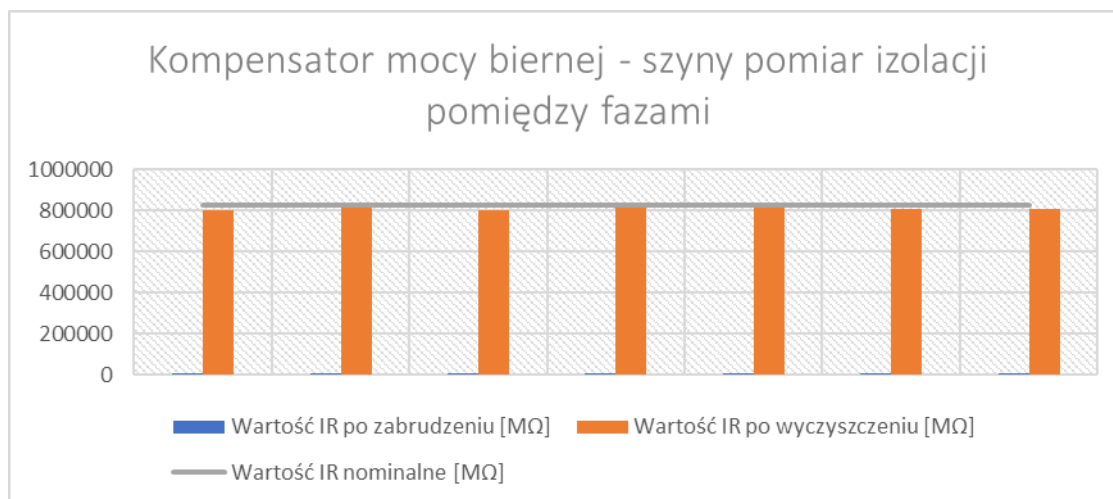
Rys. 8. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji dla transformatora separacyjnego



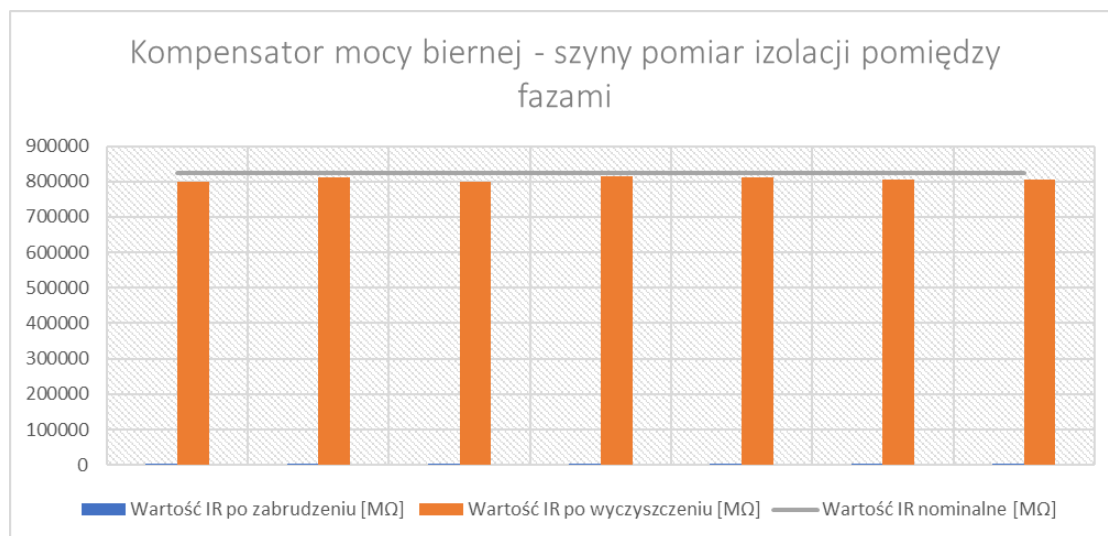
Rys. 9. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji dla szafy nn



Rys.10. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji pomiędzy fazami dla szafy sterowniczej

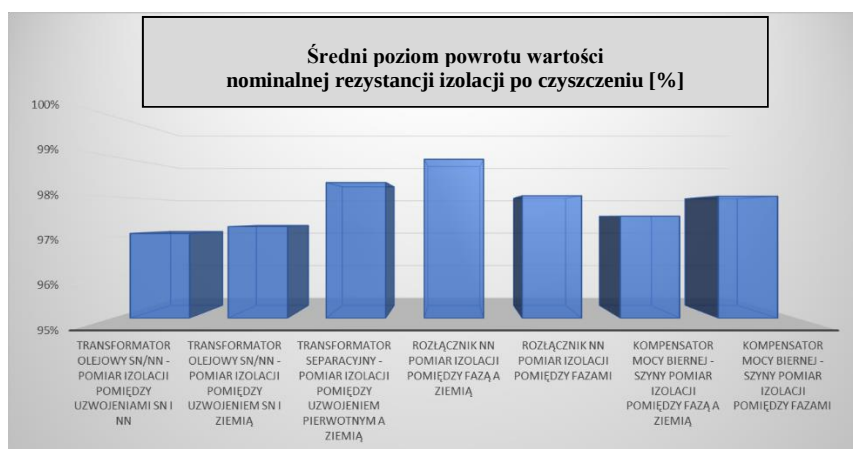


Rys. 11. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji dla kompensatora mocy biernej



Rys. 12. Wyniki pomiarów rezystancji izolacji między fazami dla kompensatora mocy biernej

Poniżej na rysunku 13 zestawiono wynik uśrednionych pomiarów dla badanych podzespołów. Otrzymane wyniki potwierdzają, iż prototyp urządzenia umożliwia wykonanie czyszczenia podzespołów w sposób zapewniający odzyskanie przez czyszczone urządzenia wymaganej rezystancji izolacji. Przeprowadzone testy urządzenia - UCT wykazały, że we wszystkich rodzajach prób czyszczenia z wykorzystaniem prototypu, nastąpiło odzyskanie przez czyszczone urządzenia parametrów nominalnych rezystancji izolacji w zakresie od 97% – do 99%.



Rys. 13. Średni procentowy poziom powrotu nominalnej wartości rezystancji izolacji

Dla potwierdzenia poprawności pracy prototypu urządzenia do czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego (UCT) w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej wykonano szereg testów polegających na badaniu efektywności przy uwzględnieniu różnych wariantów podzespołów czyszczonych oraz rodzaju zabrudzenia. Wykonane testy potwierdziły, iż wykonany prototyp pozwala na usuwanie zabrudzeń z czyszczonych elementów w stopniu powrotu nominalnej wartości rezystancji izolacji na poziomie co najmniej 95%. Celem projektu było zapewnienie poziomu odbioru zabrudzeń na poziomie 90-95%. Tym samym w testach wykazano, iż prototyp urządzenia systemu czyszczenia i konserwacji urządzeń spełnia postawione wymagania.

3. Badania bezpieczeństwa pracy innowacyjnych technologii MVC i UCT

Aspekty bezpieczeństwa pracy stosowanych technologii jako czynniki obligatoryjne dla innowacyjnych rozwiązań są kluczowym elementem w prowadzeniu prac B+R. Prace techniczne czy to podczas prób badawczych, czy podczas czyszczenia komercyjnego muszą się odbywać w ściśle określonych warunkach prowadzenia danej technologii. Odpowiednie przygotowanie stanowiska pracy zapewnia bezpieczeństwo prowadzonych prac w szczególności, gdy urządzenia pracują pod napięciem. Badania dla prototypu technologii MVC czyszczenia urządzeń elektroenergetycznych pod średnim napięciem do 60 kV wykonano w Instytucie Energetyki – Instytut Badawczy w Warszawie [9]. Rysunek 14 przedstawia stanowisko badawcze przygotowane w Instytucie Energetyki.



Rys. 14. Stanowisko badawcze do badania technologii MVC
w laboratorium Instytutu Energetyki w Warszawie

W ramach komercjalizacji prac nad technologią MVC do zakresu działalności firmy wprowadzono usługę pracy pod napięciem w sieciach średniego napięcia. W związku faktem, iż sieci średnich napięć o napięciu powyżej 30 kV są już praktycznie nie spotykane [21] przeprowadzono proces certyfikacji dla najbardziej typowych sieci o napięciu do 30 kV. W ramach wykonanych prac badawczych przeprowadzono badanie próby 15 minutowej kompletnego prototypu technologii MVC polegającej na pomiarze prądu upływu. Wyniki przeprowadzonego badania zestawiono w tabeli 3.

Wyniki 15-minutowej próby prototypu technologii MVC przeznaczonego do czyszczenia pod napięciem

Tabela 3.

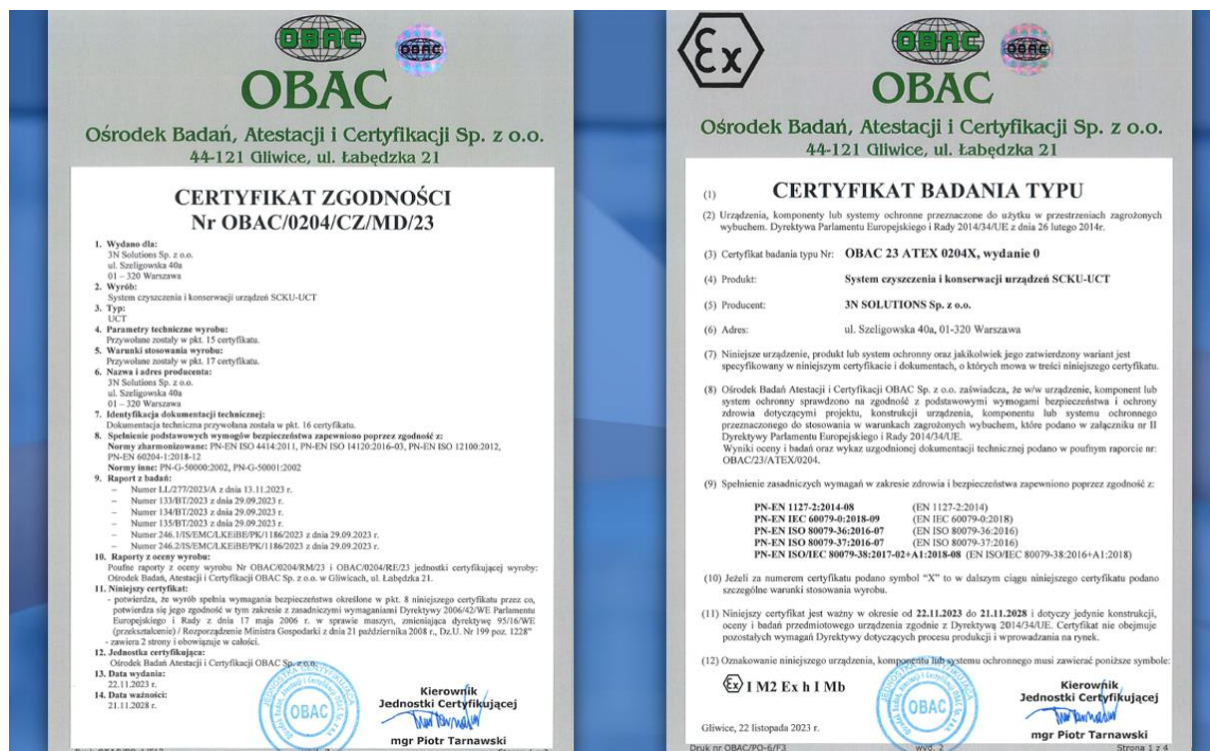
Napięcie U_p	10,1 kV
Czas	15 min.
Wynik sprawdzenia	pozytywny
Maksymalny prąd upływu zmierzony w trakcie próby	0,003 mA (<0,5 mA)
Ocena efektywności czyszczenia zabrudzeń	Pozytywna – zabrudzenia skutecznie usuwane z czyszczonych powierzchni
Ocena efektywności odbierania zabrudzeń	Pozytywna – zabrudzenia skutecznie odbierane przez układ odbioru zabrudzeń

Zmierzony maksymalny prąd upływu przy napięciu 10,1 kV jest bardzo niski i wynosi 0,003 mA, co spełnia kryterium pracy pod napięciem (0,5 mA). Wyniki otrzymanych pomiarów zostały potwierdzone przez jednostkę certyfikującą i technologia otrzymała certyfikat potwierdzający spełnienie wymogów do pracy pod napięciem w sieciach elektrycznych o napięciu do 30 kV (rys. 15).



Rys. 15. Certyfikat IEn nr DZC.521.120.1.2022.2023 wydanie nr 01 z dnia 08.03.2023 r.

Podobnie dla prototypu innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego – UCT, wykonano badania dla potwierdzenia spełnienia wymogów do pracy w przestrzeniach ze stopniem „a”, „b” i „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy „A” i „B” zagrożenia wybuchem pyłu węglowego [10, 11, 12, 13, 14]. Badania zostały wykonane w laboratorium Instytutu Badawczego KOMAG w Gliwicach [1] oraz w INOVA Centrum Innowacji Technologicznych sp. z o.o. w Lubinie [7, 8]. Handlowa nazwa urządzenia do realizacji innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego – UCT to System Czyszczenia i Konserwacji Urządzeń SCKU-UCT. Wyniki badań zostały potwierdzone przez OBAC Ośrodek Badań Atestacji i Certyfikacji sp. z o.o. wydaniem certyfikatów potwierdzających zgodność urządzenia z dyrektywą 2014/34/EU (Atex) i 2006/42/WE (MD) (rys. 16).



Rys. 16. Certyfikaty: a) badania typu nr OBAC 23 ATEX 0204X, WYDANIE 0 dla produktu System czyszczenia i konserwacji urządzeń SCKU-UCT wydany w dniu 22.11.2023; b) zgodności nr OBAC 0204 CZ MD 23 dla wyrobu System czyszczenia i konserwacji urządzeń SCKU-UCT wydany w dniu 22.11.2023 r.

4. Podsumowanie i wnioski

Wszystkie działania realizowane w ramach eksperymentalnych badań przemysłowych i rozwojowych zarówno w zakresie prac pod napięciem w technologii MVC, jak również przy pracach wykonywanych w miejscach zagrożonych wybuchem w technologii UCT, pozwoliły firmie 3N Solutions Sp. z o.o. na opracowanie i wdrożenie do działalności własnej usług, które spełniają specyficzne wymagania stawiane przy realizacji wielu zadań w różnych branżach.

Dla zapewnienia kompletności świadczonych usług w ramach wdrożenia technologii MVC czyszczenia urządzeń elektroenergetycznych pod średnim napięciem firma wykonuje również kompleksowe pomiary diagnostyczne dopełniające prace konserwacyjne urządzeń. W szczególności są to pomiary rezystancji uziemienia stacji, pomiary napięć rażeniowo – dotykowych, pomiary wyładowań koronowych, termowizja i lokalizacja uszkodzeń kabli.

Wdrożenie do działalności własnej wyników prac B+R i możliwość realizacji zadań z wykorzystaniem technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej – UCT, daje możliwość wykonywania prac konserwacyjnych w strefach niebezpiecznych [18, 19, 20] nie tylko w wyrobiskach górniczych, ale w każdym obszarze, gdzie może wystąpić zagrożenie wybuchem pyłu węglowego i/lub metanu. Naturalnym procesem rozwoju tej technologii jest zastosowanie wysokowydajnego systemu załadunku próżniowego. Innowacyjna technologia UCT umożliwia czyszczenie urządzeń, a wzbogacenie jej o systemy załadunku próżniowego pozwala na zwiększenie wydajności czyszczenia i zwiększenie ilości usuwanych z miejsca pracy zanieczyszczeń.

Czyszczenie obiektów przemysłowych i zbiorników wykonywane metodą podciśnieniową przy użyciu systemów ssących (eng. suction excavator), pozwala na zebranie nie tylko zabrudzeń powierzchniowych będących na urządzeniach, ale również usunięcie każdego rodzaju materiału zarówno sypkiego, jak i ciekłego znajdującego się w miejscu czyszczenia. Wykorzystywane systemy ssące są również przystosowane do podciśnieniowego załadunku i transportu materiałów niebezpiecznych (standard ADR - fr. Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route) [15].

Rozdział został zrealizowany w ramach:

1. Projektu Nr POIR.01.02.00-00-0209/16 pn. „Opracowanie innowacyjnej technologii MVC (medium voltage cleaning) czyszczenia urządzeń elektroenergetycznych pod średnim napięciem do 60 kV” zawartej w Warszawie w dniu 02.08.2017 r. w ramach działania 1.2 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, 2014-2020 „Sektorowe Programy B+R”, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.
2. Projektu NCBiR POIR.01.01.01-00-0968/20-02: „Opracowanie innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej – UCT (Underground Cleaning Technology)”.

Literatura

1. Raport - Opracowanie innowacyjnej technologii czyszczenia urządzeń w warunkach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego w miejscu ich zabudowy z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej – UCT (Underground Cleaning Technology). 1/1.1.1/2020 Szybka Ścieżka 1_2020. niepublikowana
2. Dobrzaniecki P., Kaczmarczyk K., Kalita M., Tarkowski A., Nieśpiałowski K., Majewski M., Sinka T., Szkudlarek Z., Janik B.: Technologia czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w warunkach górniczych z zastosowaniem suchych gazów. KOMTECH - Innowacyjne Techniki i Technologie w Dobie Zielonej Transformacji, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2021, s. 126-138, DOI:10.32056/KOMAG/KOMTECH2021.13, ISBN 978-83-65593-27-6.
3. Kuczera Z., Łuczak R., Życzkowski P., Szkudlarek Z., Kalita M., Krawczyk P., Chondrokostas P.: Badania zapylenia powietrza w warunkach kopalnianych podczas pracy prototypu kompaktowego suchego odpylacza filtracyjnego. Inżynieria Mineralna — Lipiec – Grudzień 2023 July – December — Journal of the Polish Mineral Engineering Society str. 23-28: <http://doi.org/10.29227/IM-2023-02-52>
4. Dzido A., Krawczyk P., Badyda K.: Operational parameters influence on the dry-ice blasting cleaning efficiency. Rynek Energii, Rocznik 2019, Nr 4, s.85-90
5. Dzido A., Krawczyk P., Chondrokostas P.: Dry ice blasting as an effective way of industrial pollutants removal. Rynek Energii, Rocznik 2022, Nr5 s. 97-104
6. Bałaga D., Chondrokostas P., Janik B., Kalita M., Krawczyk P., Kuczera Z., Obrębski M., Siegmund M., Szkudlarek Z., Szweda S., Życzkowski P.: Funkcjonalność urządzenia

- odbierającego zabrudzenia, wspomagającego proces czyszczenia w strefie niebezpiecznej. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji, Rocznik 2023, Vol. 12, iss. 2, s. 145-158
7. Raport INOVA Centrum Innowacji Technicznych sp. z o.o. Lubin nr 246.1/IS/EMC/LKEiBE/PK/1186/2023 niepublikowana
 8. Raport INOVA Centrum Innowacji Technicznych sp. z o.o. Lubin nr 246.2/IS/EMC/LKEiBE/PK/1186/2023 niepublikowana
 9. Sprawozdanie z badań EWN/73/E/18-3 Instytut Energetyki Instytut Badawczy Laboratorium Wysokich Napięć 01-330 WARSZAWA, 23.10.20219 ul. Mory 8; Szokalski J., Czupryńska J. niepublikowana
 10. Dyrektywa 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa. Dz.U. L 23 z 28.1.2000
 11. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23.11.2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Dz.U. 2017 poz. 1118
 12. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23.11.2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Dz.U. 2017 poz. 1118
 13. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz.U. z 2002 r. Nr 217 poz. 1833 z późn. zm.
 14. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29.01.2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych. Dz.U. 2013 poz. 230
 15. <https://asstra.pl/blog/transport-towarow-niebezpiecznych> © asstra.pl. (data dostępu 14.11.2024)
 16. Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: Wykorzystanie suchego lodu do czyszczenia urządzeń i instalacji elektrycznych pracujących pod napięciem. AGH 2016. Przegląd Elektrotechniczny
 17. Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: Wykorzystanie suchego lodu do czyszczenia urządzeń i instalacji elektrycznych pracujących pod napięciem. Przegląd Elektrotechniczny, Rocznik 2016, R.92, Nr12, s. 17-20
 18. Kuczera Z., Ptaszyński B.: Zwalczanie zapylenia w górnictwie polskim. Inżynieria Mineralna Z. 2(43) 2019, s. 181 187. <http://doi.org/10.29227/IM 2019 02 31>
 19. Kuczera Z., Ptaszyński B.: Ograniczenie zapylenie w przodku drążonego wyrobiska w LW „Bogdanka” S.A. Inżynieria Mineralna Z. 1(41) 2018, s. 287 292 <http://doi.org/10.29227/IM 2018 01 41>
 20. Kuczera Z., Ptaszyński B.: Weryfikacja nowego rozwiązania technicznego ograniczającego zapylenie w przodku drążonego wyrobiska w LW „Bogdanka” S.A. Inżynieria Mineralna Z. 1(41) 2018, s. 293 298. <http://doi.org/10.29227/IM 2018 01 42>
 21. <https://esezam.okno.pw.edu.pl/mod/book/view.php?id=44&chapterid=955> (data dostępu 14.11.2024)

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.3>

Technologia czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w podziemnych wyrobiskach górniczych z wykorzystaniem dwutlenku węgla w postaci stałej

Marek Kalita – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Dominik Bałaga – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Michał Siegmund – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Kaczmarczyk – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Krzysztof Nieśpiałowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Zbigniew Szkudlarek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Artur Tarkowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Bartłomiej Janik – 3N Solutions Sp. z o.o.

Marek Obrębski – 3N Solutions Sp. z o.o.

Piotr Chondrokostas – 3N Solutions Sp. z o.o.

Piotr Krawczyk – Politechnika Warszawska

Zbigniew Kuczera – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Rafał Łuczak – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Piotr Życzkowski – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono wyniki prac badawczo – rozwojowych zrealizowanych w ramach projektu realizowanego przez firmę 3N Solutions Sp. z o.o. w ramach wniosku nr POIR.01.01.01-00-0968/20 współfinansowanego przez NCBiR. Instytut KOMAG na zlecenie ww. przedsiębiorcy opracował umaszynowanie technologii czyszczenia UCT (Underground Cleaning Technology) elementów maszyn i urządzeń za pomocą dwufazowej mieszaniny zestalonego CO₂ i sprężonego powietrza. Przedstawiono budowę i zasadę działania poszczególnych maszyn i urządzeń stosowanych w technologii UCT. Opisano również proces czyszczenia oraz wymagania w zakresie systemów transportowych. Efektem końcowym projektu jest technologia efektywnego, nieinwazyjnego czyszczenia, gotowa do zastosowania w przestrzeniach ze stopniem „a”, „b” i „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy „A” i „B” zagrożenia wybuchem pyłu węglowego.

Słowa kluczowe: czyszczenie maszyn i urządzeń, dwutlenek węgla, sublimacja, mieszalnik, odpylacz

Technology for cleaning the machines and equipment components in underground mine workings using solid carbon dioxide

Abstract: The paper presents the results of research and development work being a part of the project implemented by the 3N Solutions Sp. z o. o. under the project application no. POIR.01.01.01-00-0968/20 co-financed by NCBiR (National Centre of Research and Development). The KOMAG Institute developed the machines for Underground Cleaning Technology (UCT) for mechanical cleaning of machines and equipment elements using the two-phase mixture of solidified CO₂ and compressed air, ordered by the above-mentioned company. Design and principles of operation of each machine and device used in UCT technology are presented. The cleaning process and requirements for transport systems are also described. The end result of the project is an effective, non-invasive cleaning technology, ready for use in area with a methane explosion hazard class "a", "b" and "c" and coal dust explosion hazard class "A" and "B".

Keywords: cleaning the machinery and equipment, carbon dioxide, sublimation, mixer, dust collector

1. Wprowadzenie

Utrzymanie w sprawności maszyn i urządzeń wymaga stosowania systematycznych przeglądów, konserwacji oraz okresowego ich czyszczenia. Ww. zabiegi pozwalają na wczesne wykrywanie usterek i zapobieganie poważnym awariom. Dzięki temu można uniknąć kosztownych napraw oraz przestojów produkcyjnych, które mogą generować straty finansowe [1, 2, 3]. Zbierające się zanieczyszczenia mogą prowadzić do przegrzewania, zmniejszenia efektywności oraz uszkodzeń mechanicznych. Regularne usuwanie zanieczyszczeń sprzyja lepszemu działaniu mechanizmów oraz wpływa na jakość produkcji [4, 5].

Odpowiednia konserwacja i czyszczenie maszyn i urządzeń oraz ich podzespołów mają również znaczenie dla bezpieczeństwa pracy. Zanieczyszczone lub niewłaściwie utrzymane maszyny mogą stanowić zagrożenie dla operatorów prowadząc do wystąpienia wypadków. Dlatego regularne przeglądy i czyszczenie są nie tylko kwestią ekonomiczną, ale również priorytetem w zakresie ochrony zdrowia i życia pracowników. Systematyczna konserwacja oraz czyszczenie maszyn i urządzeń to niezbędne działania, które przyczyniają się do ich dłuższej żywotności, efektywności operacyjnej oraz bezpieczeństwa w miejscu pracy [6, 7].

Stopień skuteczności metod usuwania zabrudzeń z powierzchni maszyn i urządzeń oraz ich podzespołów jest bardzo różny i zależy od wielu czynników, w tym również ludzkich. Stosowane metody czyszczenia nie zawsze są w stanie usunąć wszystkie nagromadzone zabrudzenia. Często ograniczony dostęp uniemożliwia skuteczne dotarcie do miejsc wymagających oczyszczenia bez konieczności ich demontażu [2, 3]. Stąd stosowane metody są bardzo czasochłonne i kosztowne.

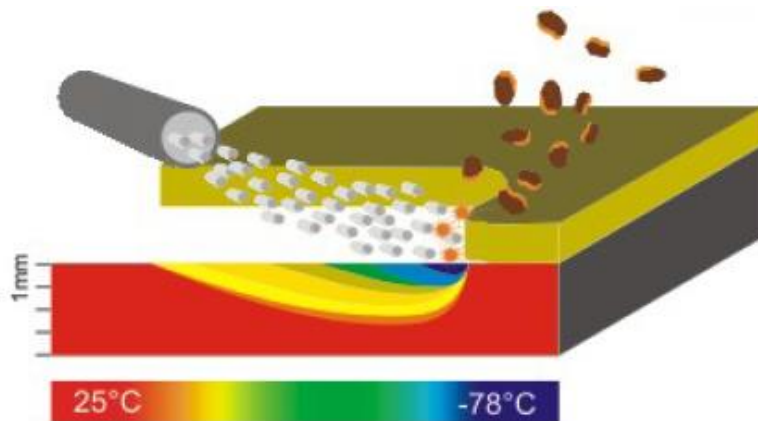
Jedną z najnowocześniejszych, skutecznych i całkowicie bezinwazyjnych metod czyszczenia elementów maszyn i urządzeń jest technologia czyszczenia z zastosowaniem specjalnie przygotowywanej mieszanki gazów z dodatkiem dwutlenku węgla w postaci stałej. Proces czyszczenia zwany również czyszczeniem „suchym lodem”, odbywa się poprzez sublimację, co oznacza, że stały dwutlenek węgla przekształca się bezpośrednio w gaz, omijając stan ciekły. Podczas tego procesu cząsteczki suchego lodu uderzają w zanieczyszczenia zlokalizowane na powierzchni, co prowadzi do ich oderwania. Mieszanka gazów ma tę przewagę nad innymi metodami, że dociera w miejsca dla nich niedostępne. W efekcie, brud, tłuszcze oraz inne osady zostają skutecznie usunięte, nie uszkadzając przy tym czyszczonej powierzchni [8] i nie ingerując w strukturę podzespołów [9].

Suchy lód w postaci granulek wydostaje się z dyszy z dużą prędkością (nawet 150 m/s) i uderza w powierzchnię czyszczoną (nie jest to metoda ścierna). Różnica temperatur pomiędzy czyszczoną powierzchnią, a granulkami suchego lodu prowadzi do powstania stromego gradientu cieplnego, co prowadzi do mechanicznego uszkadzania zabrudzeń zgromadzonych na czyszczonej powierzchni. Po uderzeniu w czyszczoną powierzchnię granulka suchego lodu gwałtownie sublimuje i zwiększając swą objętość o około 800-krotnie odrywa zabrudzenia. Dodatkowo niska temperatura suchego lodu wywołuje miejscowy szok termiczny przez co dochodzi do zeszklenia się zabrudzenia, które staje się kruche i łatwiej usuwalne [8, 10, 11].

Sublimacja [10] zachodzi w niskiej temperaturze, co sprawia, że metoda ta jest idealna do czyszczenia delikatnych komponentów, takich jak elektronika czy materiały wrażliwe na wysoką temperaturę. Ponadto proces czyszczenia suchym lodem jest szybki, co pozwala na minimalizację przestojów w produkcji. Proces czyszczenia z zastosowaniem suchego lodu schematycznie przedstawiono na rys. 1.

Jednym z kluczowych atutów tej metody jest to, że nie wymaga ona stosowania wody ani detergentów, co zmniejsza ryzyko korozji i zanieczyszczenia środowiska. Sublimacja suchego lodu

nie pozostawia resztek, co eliminuje potrzebę dodatkowego czyszczenia po procesie. Technologia ta jest także bezpieczna dla zdrowia, ponieważ nie emituje toksycznych oparów ani nie generuje niebezpiecznych substancji chemicznych. W miarę rosnącej świadomości ekologicznej w przemyśle, czyszczenie suchym lodem staje się coraz bardziej popularne jako efektywna i przyjazna dla środowiska alternatywa dla tradycyjnych metod.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie procesu czyszczenia zanieczyszczonych powierzchni z zastosowaniem suchego lodu [12]

Opisana metoda jest dedykowana do usuwania różnego rodzaju zanieczyszczeń od pyłu nieorganicznego aż po oleiste zabrudzenia organiczne, co zostało potwierdzone w doświadczeniach opisanych między innymi w pracy [13].

2. Cel i zakres projektu

Celem projektu realizowanego przez firmę 3N Solutions Sp. z o.o., przy udziale ITG KOMAG, było opracowanie innowacyjnej technologii czyszczenia i konserwacji urządzeń zainstalowanych w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego – technologii UCT (Underground Cleaning Technology), która jako medium robocze wykorzystuje dwutlenek węgla w postaci stałej (pot. suchy lód). Technologia ta umożliwia czyszczenie podzespołów, instalacji i urządzeń zabudowanych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego bez konieczności ich wyłączenia z eksploatacji, demontażu i transportu do stref niezagrażonych.

Dostępne na rynku technologie czyszczenia z użyciem suchego lodu mają zastosowanie jedynie w strefach niezagrażonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. W związku z tym zastosowanie niniejszej technologii do czyszczenia elementów maszyn i urządzeń górniczych w praktyce oznacza konieczność albo wydobycia ich na powierzchnię albo przetransportowania w strefę niezagrażoną wybuchem.

Brak zmechanizowanej i efektywnej technologii czyszczenia urządzeń i instalacji dedykowanej do zastosowania w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego był jedną z przesłanek do realizacji projektu współfinansowanego przez NCBiR w ramach wniosku nr POIR.01.01.01-00-0968/20.

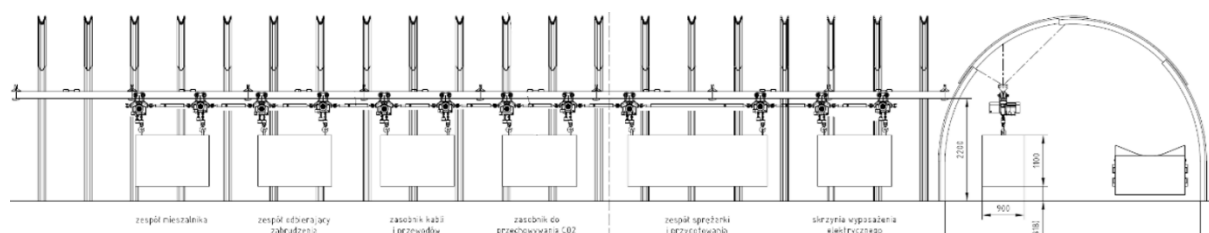
Nowością opracowanej przez firmę 3N Solutions Sp. z o.o. i ITG KOMAG technologii czyszczenia suchym lodem jest przede wszystkim konstrukcja poszczególnych elementów, która ma wpływ na efektywność i bezpieczeństwo pracy całego systemu. Mając na uwadze zagrożenia występujące w podziemnych wyrobiskach górniczych (metan oraz pył węglowy) oraz konieczność sprostaną wymaganiom normatywnym [14, 15, 16, 17] zespół projektowy opracował nowatorskie

rozwiązanie zintegrowanego systemu podająco-ssącego, który oprócz podawania mieszanki czyszczącej jednocześnie odpowiada za wstępne zasysanie pyłu wzniesanego podczas wyrzutu mieszanki na element czyszczony.

Kolejny innowacyjny aspekt dotyczy zespołu odbierającego zabrudzenia. Celem eliminacji wtórnego zabrudzenia się czyszczonej powierzchni i innych elementów znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu, opracowano system odbioru zabrudzeń wyposażony w urządzenie odpylające zasysające powietrze z przestrzeni wokół czyszczonego elementu [18], zapewniające wysoką skuteczność oczyszczania powietrza [19, 20].

Kluczową innowacyjnością jest również modułowa i kompaktowa budowa kontenerowa systemu UCT. Ma ona przede wszystkim znaczenie w przypadku transportu podziemnego i pozwala na przemieszczanie każdego z modułów odrębnie po podwieszonych trasach jednoszynowej i rozładowanie ich na spąg.

W wyniku realizacji przedmiotowego projektu opracowano system UCT przeznaczony do przeprowadzania procesu czyszczenia urządzeń, maszyn i ich części za pomocą dwufazowej mieszaniny zestalonego CO₂ i sprężonego powietrza w warunkach podziemnych wyrobisk zakładów górniczych, w strefach zagrożonych wybuchem, w przestrzeniach ze stopniem „a”, „b” i „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy „A” i „B” zagrożenia wybuchem pyłu węglowego. Urządzenia tworzące system dostosowane są do podwieszenia i ich przewozu za pomocą zestawów transportowych z wciągnikami przejezdными po podziemnych trasach podwieszonych I 155 [21], co schematycznie pokazano na rys. 2.

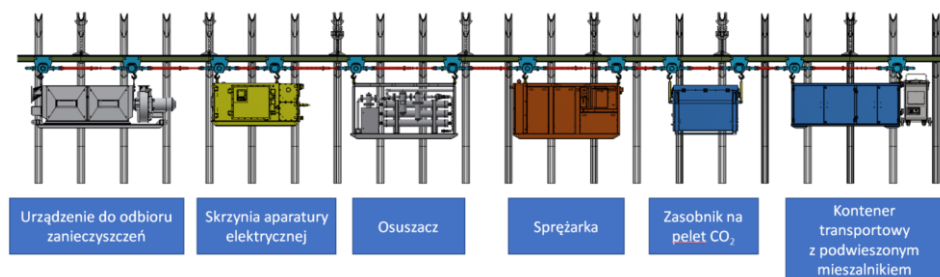


Rys. 2. Schematyczne przedstawienie możliwości transportowych systemu UCT

3. Budowa i zasada działania UCT

System UCT to zestaw urządzeń pozwalających na czyszczenie zabrudzeń powierzchni przy wykorzystaniu zjawisk sublimacji oraz energii kinetycznej cząstek dwufazowej mieszaniny sprężonego, osuszonego powietrza i zestalonego CO₂, przy jednoczesnym odbiorze powstałych w procesie czyszczenia zabrudzeń. Główne elementy systemu to (rys. 3):

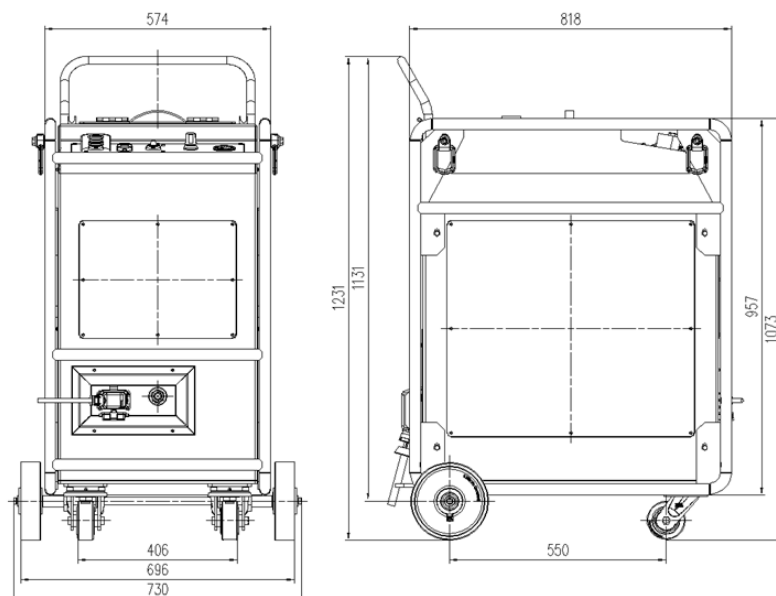
- mieszalnik z dyszą czyszczącą,
- urządzenie odpylające,
- sprężarka,
- adsorpcyjny osuszacz powietrza,
- skrzynia aparatury elektrycznej,
- zasobniki na zestalony CO₂,
- kontener transportowy.



Rys. 3. Główne elementy systemu UCT

Głównym elementem systemu UCT jest mieszalnik (rys. 4), który służy do przygotowania kontrolowanej mieszaniny suchego lodu i powietrza w celu realizacji procesu czyszczenia. Konstrukcja mieszalnika umożliwia jego bezpieczne stosowanie w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Urządzenie posiada osłonę służącą do transportu oraz ochrony przed uszkodzeniami zewnętrznymi podczas eksploatacji.



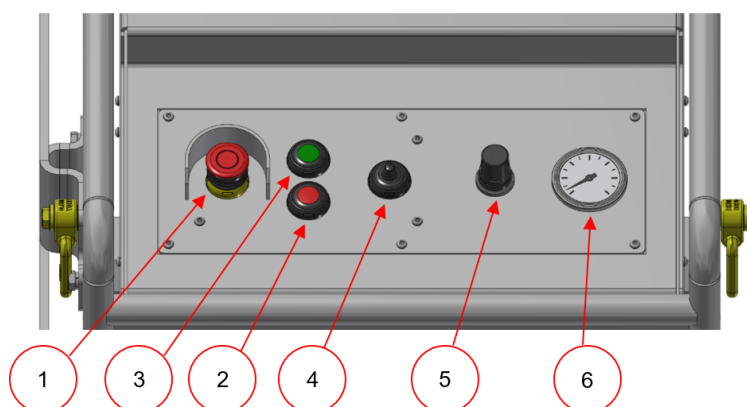


Rys. 4. Mieszalnik – budowa i wymiary

Parametry techniczne mieszalnika to:

Moc silnika napędowego:	1,1 kW (opcjonalnie 0,75 kW lub 0,55 kW)
Napięcie zasilania:	3x500 V AC
Napięcie sterowania:	12 V DC
Zasilanie pneumatyczne	maks. 1 MPa
Masa mieszalnika:	ok. 270 kg
Pojemność kosza na zestalony CO ₂ :	ok. 17 dm ³

Mieszalnik wyposażono w regulację prędkości obrotowej wirnika rozdrabniania zestalonego CO₂ w zakresie 0÷35 obr/min oraz w regulację ciśnienia sprężonego powietrza w układzie przygotowania mieszanki w zakresie 0÷1 MPa. Sterowanie pracą mieszalnika realizowane jest z pulpitu sterowniczego (rys. 5) zabudowanego w górnej części urządzenia.



Rys. 5. Pulpit sterowniczy mieszalnika: 1 - przycisk STOP AWARYJNY, 2 - przycisk STOP, 3 - przycisk START, 4 - potencjometr regulacji prędkości obrotowej silnika, 5 - regulator ciśnienia powietrza, 6 - manometr ciśnienia powietrza

Kolejny element umaszynowania technologii UCT to urządzenie odpylające (rys. 6), które służy do przechwycenia i odfiltrowania zabrudzeń powstałych w procesie czyszczenia. Urządzenie bazuje na odpylaczu suchym z zespołem oczyszczania zasysanego powietrza za pomocą wkładów filtracyjnych i regeneracją pneumatyczną. Strumień oczyszczonego powietrza zostaje skierowany z urządzenia do atmosfery poprzez dyfuzor zabudowany w górnej części urządzenia na króćcu wylotowym. Ze względu na zastosowany układ filtracyjny, urządzenie odpylające może być bezpiecznie używane do suchego odpylania pyłu powstałego w procesie urabiania skał i węgla oraz do czynności zbierania innych zanieczyszczeń stałych i suchych, bez niebezpieczeństwa uszkodzenia wkładów filtracyjnych.

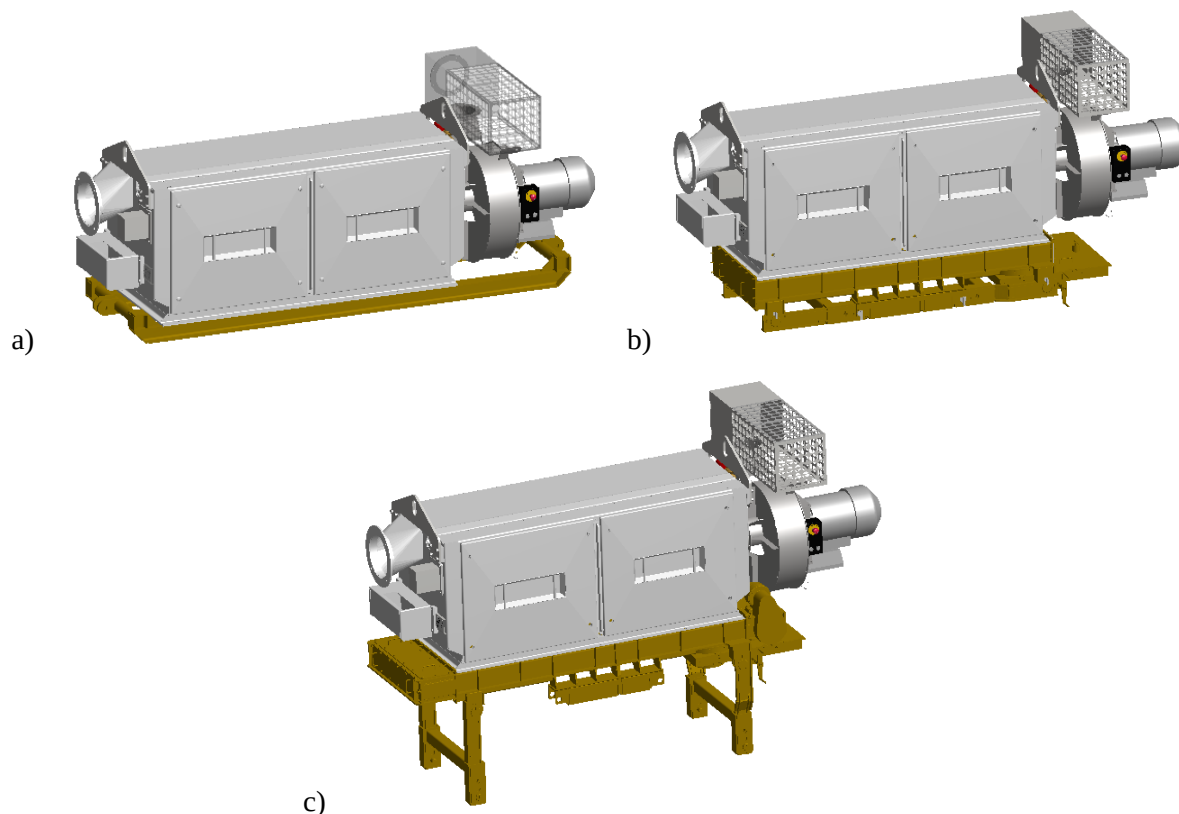


Rys. 6. Urządzenie odpylające stosowane w systemie UCT

Podstawowe parametry techniczne urządzenia odpylającego to:

Moc silnika elektrycznego	18,5 kW
Napięcie zasilania	500 V AC
Napięcie sterowania	24 V DC
Ciśnienie zasilania dla sprężonego powietrza	0,1 MPa
Temperatura otoczenia	+5÷40°C

W trakcie realizacji projektu, opracowano trzy wykonania urządzenia odpylającego (rys. 7). Częścią wspólną wszystkich prototypów jest to samo wyposażenie elektryczne i budowa zespołu oczyszczania powietrza. Różnice w wykonaniu wynikają ze sposobu gromadzenia i odprowadzania odebranych przez filtry zanieczyszczeń (pyłu), które opadają grawitacyjnie (po regeneracji pneumatycznej) do przestrzeni pod zespołami kaset filtrujących.



Rys. 7. Urządzenie odpylające: a) wykonanie I z zabudowanymi saniami, b) wykonanie II z ręcznym systemem wygarniania zabrudzeń, c) wykonanie III z zabudowanym podajnikiem zgrzeblowym

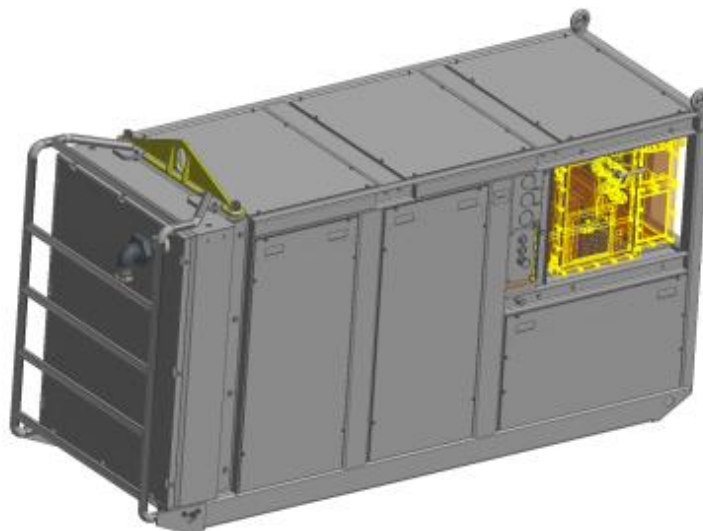
Urządzenie odpylające według wykonania pierwszego posiada zespół odbioru zanieczyszczeń zintegrowany ze stałymi saniami. W czasie pracy urządzenie odpylające spoczywa na stałych (nieregulowanych) saniach lub może być podwieszane na zawiesiach. Oczyszczanie odbywa się poprzez otwarcie pokryw rewizyjnych znajdujących się pod zespołem oczyszczania powietrza. Aby je otworzyć urządzenie odpylające musi zostać uniesione i postawione na koziolkach lub podwieszone naciągach łańcuchowych.

Urządzenie odpylające w wykonaniu drugim posiada mocowane do zespołu oczyszczania powietrza segmenty: rynnowy i wysypowy oraz zasuwę. W czasie pracy urządzenie spoczywa na regulowanych podporach (jest uniesione względem podłoża) lub może być podwieszane na zawiesiach, co pozwala na podwieszenie pod zasuwę worków odbierających pył i zanieczyszczenia. Oczyszczanie odbywa się poprzez ręczne wygarnianie zanieczyszczeń w kierunku zasuw z podwieszonymi workami.

Urządzenie odpylające w wykonaniu trzecim posiada mocowany do zespołu oczyszczania powietrza podajnik zgrzeblowy odbierający w sposób mechaniczny pył i zanieczyszczenia. Również w tym przypadku w czasie pracy urządzenie spoczywa na regulowanych podporach (jest uniesione względem podłoża) lub może być podwieszane na zawiesiach, co pozwala na zabudowę pod zasuwę worków odbierających pył i zanieczyszczenia.

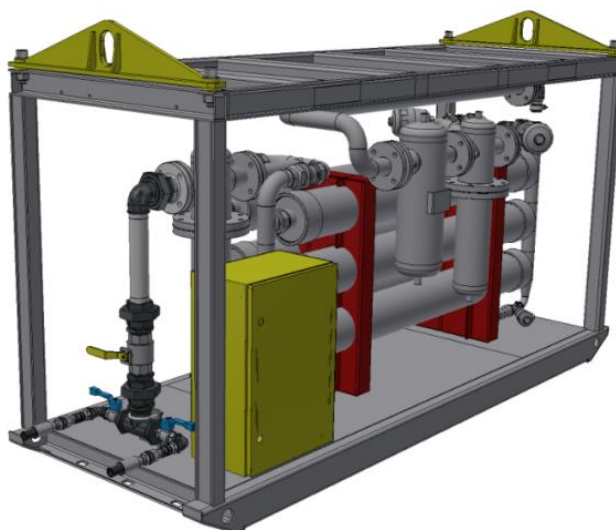
Sprężone powietrze niezbędne do zasilania mieszalnika wytwarzane jest w sprężarce (rys. 8) produkcji firmy Airpol Sp. z o.o. Sprężarka jest wyposażona w stopień śrubowy z wewnętrznym wtryskiem oleju.

Sprężarka jest przystosowana do pracy ciągłej, dlatego tłoczy sprężone powietrze aż do momentu uzyskania nadciśnienia maksymalnego nastawionego na regulatorze proporcjonalnym. W momencie uzyskania tego ciśnienia następuje przymknięcie regulatora ssania sprężarki i sprężarka rozpoczyna pracę ze stałym ciśnieniem.



Rys. 8. Sprężarka śrubowa produkcji Airpol Sp. z o.o.

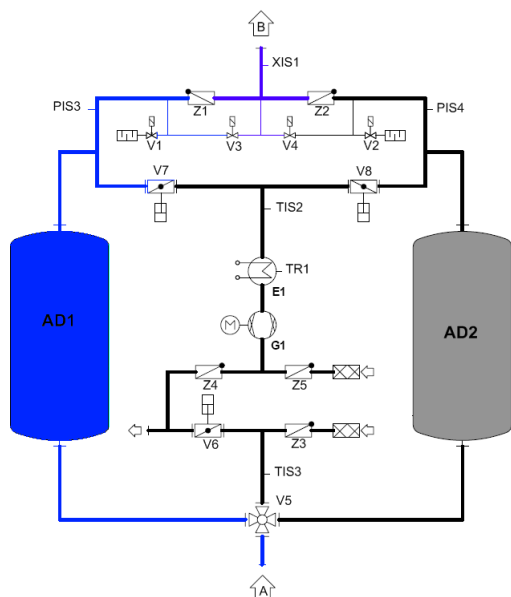
Sprężone powietrze, przed dostarczeniem do mieszalnika poddawane jest procesowi osuszania. Do osuszania powietrza stosowanego w technologii czyszczenia UCT przewidziano handlowy, adsorpcyjny osuszacz – dostawca Plata Krzysztof S.K.A. (rys. 9).



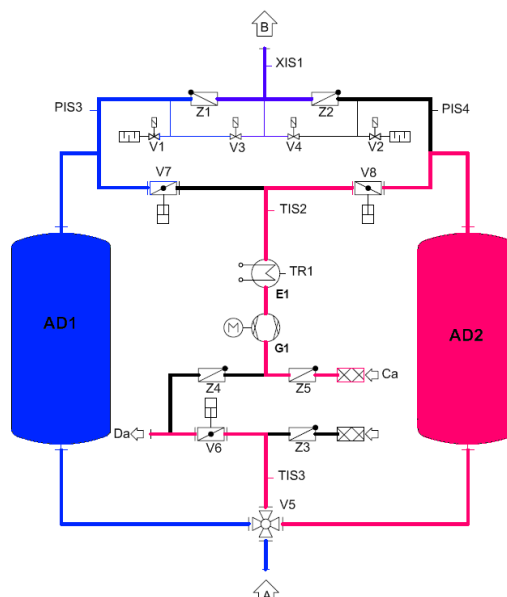
Rys. 9. Adsorpcyjny osuszacz powietrza produkcji Plata Krzysztof S.K.A.

Sprężone powietrze przepływa przez wlot do urządzenia, a następnie przez zawór kierowane jest do zbiornika z sorbentem od dołu ku górze. W trakcie przepływu wilgotnego powietrza przez złożę sorbentu, wilgoć jest adsorbowana przez higroskopowy sorbent zdeponowany w dwóch zbiornikach, a osuszone powietrze kierowane jest do instalacji mieszalnika. Proces adsorpcji zilustrowano schematycznie na rys. 10.

Podczas gdy w jednym zbiorniku zachodzi proces adsorpcji (AD1) złoże znajdujące się w drugim zbiorniku (AD2) jest poddawane regeneracji (rys. 11). Przed rozpoczęciem regeneracji, ciśnienie w zbiorniku jest zmniejszane do poziomu atmosferycznego. Regeneracja odbywa się przy wykorzystaniu sprężonego powietrza osuszonego w pierwszym zbiorniku (AD1) poprzez wolny przepływ. Powietrze regeneracyjne wprowadzone jest przez zawór V3 do adsorbera (AD2). Następnie przepływa przez złoże sorbentu przechwytyjąc z niego wilgoć. Woda jest usuwana z sorbentu najkrótszą drogą poprzez zawory V2. W trakcie procesu desorpcji zawartość wilgoci zmniejsza się. Wraz ze zmniejszaniem się parowania następuje wzrost temperatury na wylocie (Da). Proces desorpcji kończy się po zadanim czasie. Desorpcja przeprowadzana jest w kierunku przeciwnym do kierunku adsorpcji wykorzystując powietrze ze zbiornika adsorbującego.



Rys. 10. Proces adsorpcji wilgoci z powietrza



Rys. 11. Proces adsorpcji AD1 i desorpcji AD2

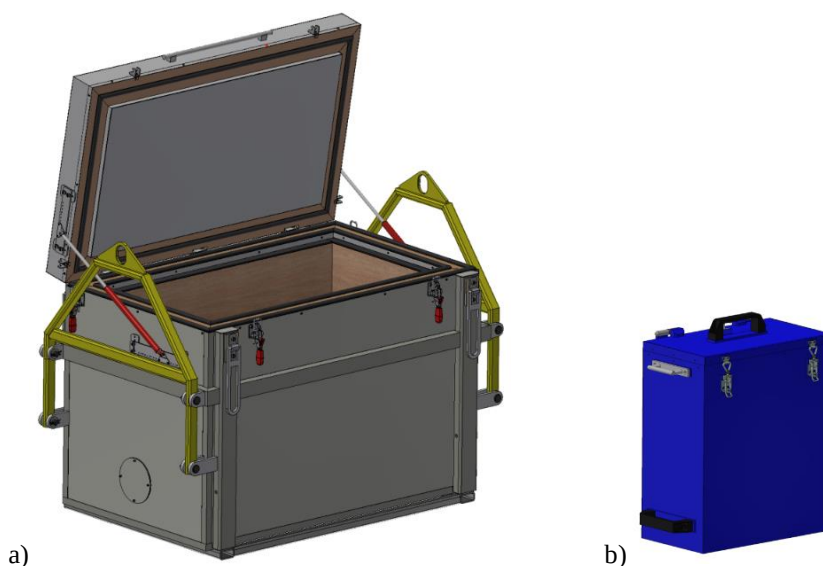
Wszystkie urządzenia zastosowane w technologii czyszczenia UCT są zasilane ze skrzyni aparatury elektrycznej – stacji kompaktowej typu MSL-1203.9/BP – dostawca EXPROTEC Sp. z o.o. (rys. 12). Skrzynia aparatury elektrycznej jest zespołem urządzeń elektrycznych zamkniętych w osłonie ognioszczelnej. Wyposażenie elektryczne zamknięte w SAE zasila wszystkie obwody – wysokoprądowe i sterownicze systemu UCT. Zapewnia również bezpieczeństwo związane z wyposażeniem elektrycznym.



Rys. 12. Skrzynia aparatury elektrycznej – stacja kompaktowa MSL przeznaczona do zasilania urządzeń technologii UCT

Technologia czyszczenia UCT wymaga zastosowania CO_2 o możliwie najlepszych parametrach (temperatura i wilgotność). Stąd konieczność zapewnienia odpowiednich warunków jego transportu i przechowywania. W tym celu zaprojektowano izolowane termicznie zasobniki o pojemności 500 kg oraz 25 kg (rys. 13).

Zasobnik (rys. 13a) ma postać pojemnika, zamykanego od góry pokrywą. Przeznaczony jest do transportu i przechowywania zestalonego dwutlenku węgla podczas realizacji procesu czyszczenia. Zastosowana w zasobniku izolacja termiczna umożliwia przechowywanie CO_2 przez kilkadziesiąt godzin bez utraty jego parametrów użytkowych. W miejscu wykonywania czyszczenia rozładunek zestalonego CO_2 odbywa się do mniejszych zasobników 25 kg (rys. 13b), które umożliwiają załadowanie (przesypanie) CO_2 do zasobnika znajdującego się w mieszalniku.



Rys. 13. Izolowane termicznie zasobniki przeznaczone do transportu i przechowywania CO_2 o pojemności:
a) 500 kg, b) 25 kg

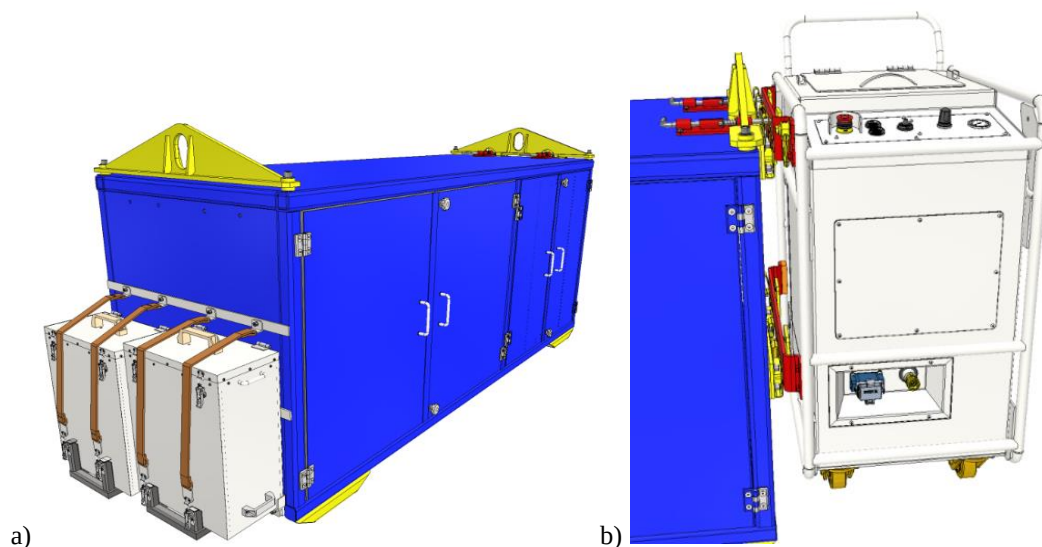
Ostatnim elementem mechanizacji systemu UCT jest kontener transportowy przeznaczony do przechowywania i transportu, takich elementów jak:

- przewody pneumatyczne,
- przewody elektryczne,
- przewody do odbioru zanieczyszczeń,
- lance czyszczące,
- zasobniki 25 kg (2 sztuki),
- inne, drobne elementy wyposażenia.

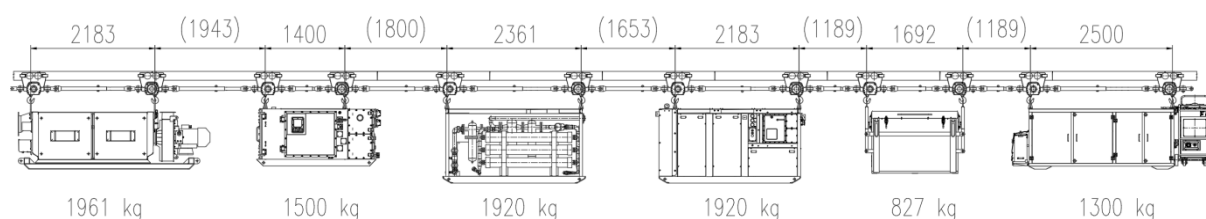
Ogólny widok kontenera transportowego przedstawiono na rys. 14, gdzie pokazano uchwyty do transportu zasobników 25 kg (rys. 14a) oraz zaczepy przeznaczone na zamontowanie mieszalnika (rys. 14b).

Jak już wspomniano wcześniej technologia UCT umożliwia prowadzenie procesu czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w podziemnych wyrobiskach górniczych w miejscu ich eksploatacji. Stąd wynika potrzeba przetransportowania elementów umaszynowania UCT w dany rejon kopalni. Zaprojektowane wyposażenie UCT przystosowane jest do transportu z zastosowaniem kolejek spągowych, jak również przy użyciu kolejek podwieszonych. W przypadku transportu podwieszonego użytkownik powinien odpowiednio skonfigurować zestaw transportowy składający się z wciągników przejezdnych oraz cięgier łączących wciągniki. Na rys. 15 przedstawiono odległości pomiędzy

uchwyty transportowymi każdego z zespołów systemu, przybliżone odległości pomiędzy poszczególnymi zespołami oraz masy zespołów. Na tej podstawie użytkownik lub służby odpowiedzialne za transport w zakładzie górniczym mogą skonfigurować zestaw transportowy.



Rys. 14. Kontener transportowy – widok od strony zabudowy: a) zasobników 25 kg, b) mieszalnika



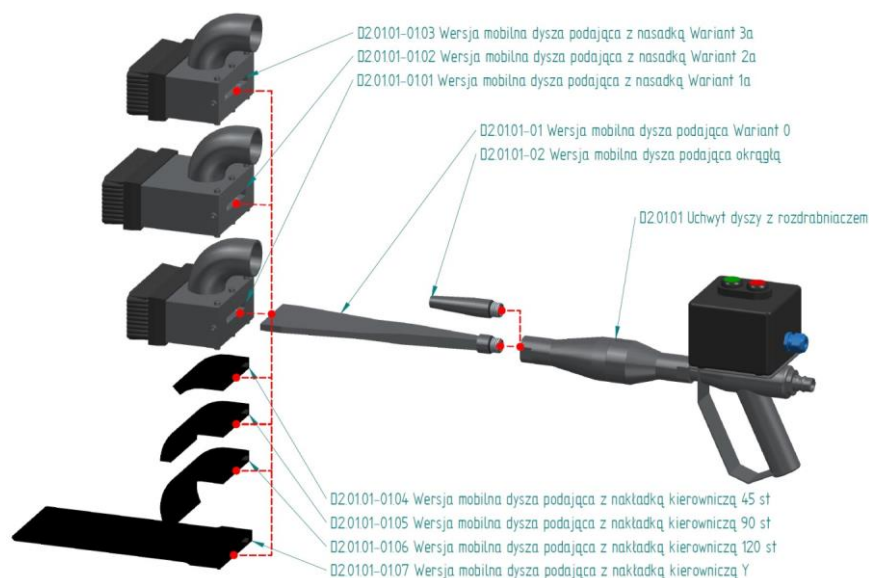
Rys. 15. Zestaw transportowy urządzeń technologii czyszczenia UCT

Po przetransportowaniu elementów systemu UCT w miejsce realizacji czyszczenia, przed przystąpieniem do pracy, należy przygotować poszczególne urządzenia. Przygotowanie urządzeń do pracy polega na ich ustabilizowaniu na trasie podwieszanej (np. poprzez zablokowanie wózków wciągników przejezdnych zastosowanych w zespołach transportowych) lub opuszczenie ich i stabilne ustawienie na trwałym podłożu. W następnej kolejności należy połączyć poszczególne urządzenia przewodami, doprowadzić energię elektryczną oraz załadować zbiornik mieszalnika zestawionym CO₂.

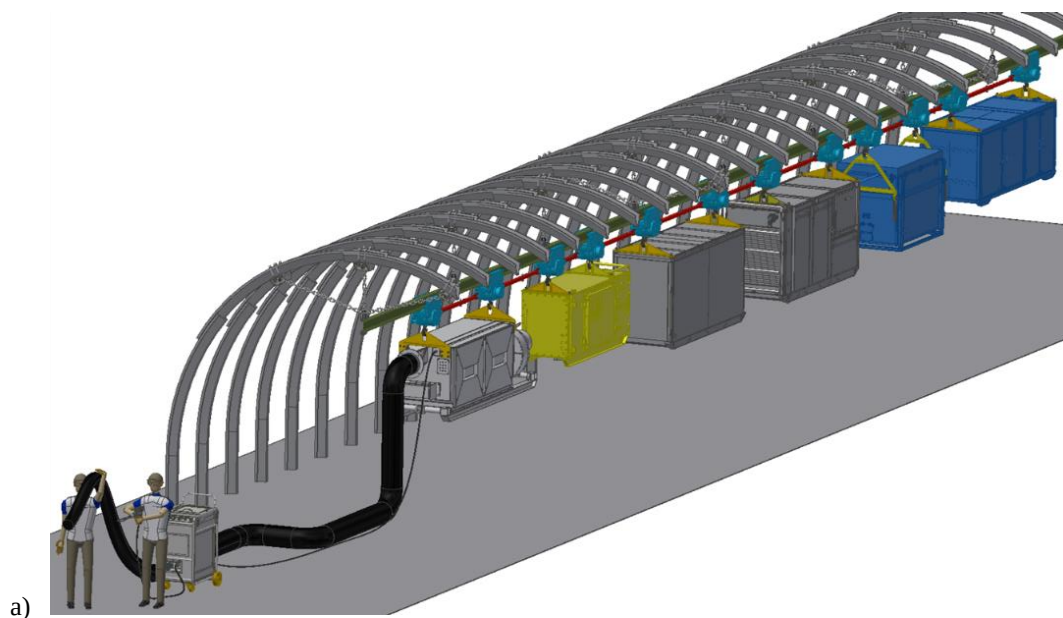
W zależności od rodzaju czyszczonego elementu (zespołu maszyny) oraz rodzaju zabrudzeń, operator ma możliwość doboru i zamontowania na lancy właściwej dyszy dozującej strumień medium roboczego. W tym celu zaprojektowano różnego rodzaju dysze o strumieniu skupionym (punktowym), rozproszonym oraz płaskim, które umożliwiają dotarcie do niedostępnych miejsc czyszczonego obiektu przy możliwości jednoczesnego odbierania zanieczyszczeń bez uwalniania ich do atmosfery. Przykłady różnych rozwiązań dysz pokazano na rys. 16.

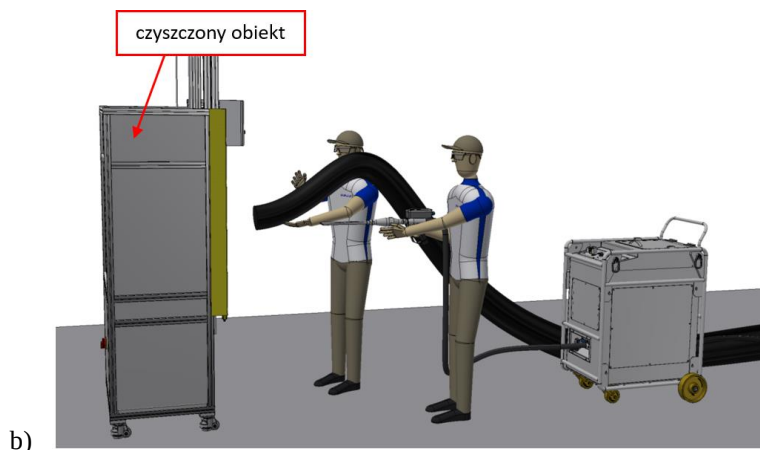
Stanowisko operatorów (lancy czyszczącej oraz przewodu ssawnego urządzenia odpylającego) znajduje się w miejscu, w którym odbywa się proces czyszczenia. Jednocześnie stanowisko pracy może być oddalone od pierwszego w kolejności urządzenia odpylającego o maksymalnie 25 m, co wynika z maksymalnej długości przewodu ssawnego. Samo miejsce czyszczenia może być oddalone od mieszalnika o około 7 m, co wynika z długości przewodu pneumatycznego i sterowniczego pomiędzy mieszalnikiem, a lancą czyszczącą. Na rys. 17a pokazano kompletne umaszynowanie

technologii UCT gotowe do użycia oraz operatorów obsługujących mieszalnik, lancę czyszczącą i przewód do odbioru zanieczyszczeń (rys. 17b). Jeden z operatorów zajmuje się obsługą lancy czyszczącej połączonej z mieszalnikiem, natomiast drugi operuje końcówką przewodu odsysającego powstałe w procesie czyszczenia zabrudzenia.



Rys. 16. Rozwiązania dysz czyszczących stosowanych w technologii UCT





Rys. 17. Technologia czyszczenia UCT: a) kompletne wyposażenie, b) stanowisko operatorów

4. Podsumowanie

Utrzymanie maszyn i urządzeń we właściwym stanie technicznym wymaga przeprowadzania przeglądów oraz okresowego czyszczenia ich podzespołów. W górnictwie węgla kamiennego brak jest efektywnej, zmechanizowanej technologii czyszczenia maszyn i urządzeń możliwej do zastosowania w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

W ramach realizacji projektu współfinansowanego przez NCBiR (wniosek nr POIR.01.01.01-00-0968/20) opracowano technologię czyszczenia UCT (Underground Cleaning Technology) wraz z umaszynowaniem, przeznaczoną do zastosowania w przestrzeniach ze stopniem „a”, „b” i „c” niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy „A” i „B” zagrożenia wybuchem pyłu węglowego.

Nowoczesna i efektywna technologia UCT wykorzystuje dwufazową mieszaninę zestalonego CO₂ i sprężonego powietrza podawaną przez mieszalnik. Proces czyszczenia wspomagany jest zjawiskiem sublimacji CO₂ po zderzeniu z czyszczoną powierzchnią.

Opracowana technologia czyszczenia zestalonym CO₂ jest w pełni mobilna, przez co nie ma potrzeby demontażu i wydobywania na powierzchnię przedmiotów wymagających czyszczenia. Transport maszyn i urządzeń technologii UCT może być realizowany zarówno za pomocą kolei spągowej, jak i z użyciem kolejek podwieszonych. Przeprowadzone w ramach projektu badania technologii w warunkach in-situ wykazały, że rozwiązanie osiągnęło najwyższy, dziewiąty poziom gotowości technologicznej (TRL9) i jest gotowe do wdrożenia przemysłowego.

Literatura

1. Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: Wykorzystanie suchego lodu do czyszczenia urządzeń i instalacji elektrycznych pracujących pod napięciem. Przegląd Elektrotechniczny, Rocznik 2016, R.92, Nr12, s. 17-20
2. Dzido A., Krawczyk P., Badyda K.: Operational parameters influence on the dry-ice blasting cleaning efficiency. Rynek Energii, Rocznik 2019, Nr 4, s.85-90
3. Wójcik S., Blicharz S.: Czyszczenie suchym lodem w utrzymaniu ruchu. Utrzymanie ruchu, Rocznik 2016, Nr2, s.22-25

4. Brodny J., Tutak M.: Analysis of Methane Hazard Conditions in Mine Headings. *Teknički vjesnik*, Vol. 25 No. 1, 2018
5. Krause E., Krzemień K.: Methane risk assessment in underground mines by means of a survey by the panel of experts (SOPE). *Journal of Sustainable Mining*. Volume 13, Issue 2, 2014, Pages 6-13
6. Kabiesz J.: *Koincydencja górniczych zagrożeń naturalnych*. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2016
7. Kabiesz J. (2001): Metody oceny stanu zagrożeń naturalnych [Methods for the assessment of natural hazards]. In W. Konopko (Ed.), *Strategia poprawy bezpieczeństwa pracy w kopalniach węgla kamiennego* (pp. 236–237). Katowice: Główny Instytut Górnictwa
8. Wenjun Z., Ming L., Shinian L., Mengfei P., Jianhui Y. Chengke Z.: On the Mechanism of Insulator Cleaning Using Dry Ice, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 19, No. 5; (October 2012), 1715-1722
9. Kucharska K.: Czystość maszyn i urządzeń kluczem do sprawnej produkcji. *Utrzymanie ruchu*, Rocznik 2020, Nr2, s.14-20
10. Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M., Syrek P.: Wykorzystanie suchego lodu do czyszczenia urządzeń i instalacji elektrycznych pracujących pod napięciem, AGH 2016 *Przegląd elektrotechniczny*
11. <https://docplayer.pl/2709162-Czyszczenie-suchym-lodem.html>
12. <https://iwago.pl/branze/iwago-kolej/czyszczenie-suchym-lodem>
13. Dzido A., Krawczyk P., Chondrokostas P.: Dry ice blasting as an effective way of industrial pollutants removal. *Rynek Energii*, Rocznik 2022, Nr5 s. 97-104
14. Dyrektywa 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa. Dz.U. L 23 z 28.1.2000
15. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23.11.2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Dz.U. 2017 poz. 1118.
16. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz.U. z 2002 r. Nr 217 poz. 1833 z późn. zm.
17. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29.01.2013r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych. Dz.U. 2013 poz. 230
18. Bałaga D., Chondrokostas P., Janik B., Kalita M., Krawczyk P., Kuczera Z., Obrębski M., Siegmund M., Szkudlarek Z., Szweda S., Życzkowski P.: Funkcjonalność urządzenia odbierającego zabrudzenia, wspomagającego proces czyszczenia w strefie niebezpiecznej. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, Rocznik 2023, Vol. 12, iss. 2, s. 145-158

19. Bałaga D., Jedziniak M., Kalita M., Siegmund M., Szkudlarek Z.: Metody i środki zwalczania zagrożeń pyłowych i metanowych w górnictwie węglowym. *Maszyny Górnicze* Nr 3/2015, s. 68-81
20. Kuczera Z., Łuczak R., Życzkowski P., Szkudlarek Z., Kalita M., Krawczyk P., Chodnrokostas P.: Badania zapylenia powietrza w warunkach kopalnianych podczas pracy prototypu kompaktowego suchego odpylacza filtracyjnego. *Inżynieria Mineralna — Lipiec – Grudzień 2023 July – December -Journal of the Polish Mineral Engineering Society* s. 23-28
21. Dobrzaniecki P., Kaczmarczyk K., Kalita M., Tarkowski A., Nieśpiałowski K., Majewski M., Sinka T., Szkudlarek Z., Janik B.: Technologia czyszczenia elementów maszyn i urządzeń w warunkach górniczych z zastosowaniem suchych gazów. *KOMTECH - Innowacyjne Techniki i Technologie w Dobie Zielonej Transformacji*, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2021, s. 126-138



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.4>

Precyzyjna metoda pomiaru impedancji, stosowana w procesie optymalizacji parametrów elektrycznych pieca elektrodowego

Grzegorz Debita – Akademia Wojsk Lądowych im. Gen. Tadeusza Kościuszki /ITG KOMAG

Maja Szturmaj – Uniwersytet Dolnośląski DSW

Korneliusz Sierpowski – Akademia Wojsk Lądowych im. Gen. Tadeusza Kościuszki /ITG KOMAG

Bartosz Polnik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Rozdział opisuje metodę pomiaru małych impedancji i rezystancji rzędu mili Ohmów. Metoda została zweryfikowana za pomocą narzędzi symulacyjnych w oprogramowaniu MATLAB-SIMULINK. Przedstawiono sposób weryfikacji poprawności metody pomiarowej wraz z analizą błędu pomiarowego. Metoda ma zastosowanie w projektowaniu kotłów elektrodowych.

Słowa kluczowe: pomiar małych impedancji, rezystancja miliomowa, analiza błędu pomiarowego, kotły elektrodowe

Precision impedance measurement method for optimising the electrical parameters of an electrode furnace

Abstract: The chapter describes a method for measuring small impedances and resistances on the order of a milliohms. The method has been verified using simulation tools in the MATLAB-SIMULINK software. A method for verifying the correctness of the measurement method is presented, together with an analysis of the measurement error. The method is applicable to the design of electrode boilers.

Keywords: small impedance measurement, milliohm resistance, measurement error analysis, electrode boilers

1. Wprowadzenie

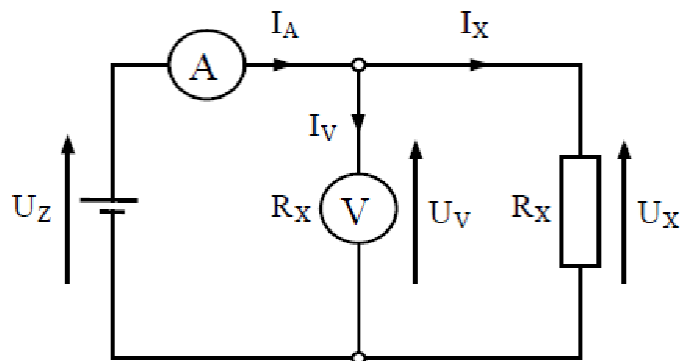
Precyzyjny pomiar małych rezystancji i małych impedancji jest bardzo ważnym problemem w obecnych systemach elektroenergetycznych, elektrycznych oraz elektronicznych, ze względu na potrzebę precyzyjnego odwzorowania wartości mierzonej rezystancji na wartości pośrednie mierzonego zjawiska. Przykładowo, większość sensorów mierzących wartości środowiskowe tj. temperatura, ciśnienie wilgotność, wartości przepływowe gazów organicznych, przelicza zmianę rezystancji na wartość mierzoną. Jednym z przykładów praktycznych jest sonda z rodziny PT100 [1] lub PT1000 [2], której charakterystyka zmiany temperatury odpowiada zmianie jej rezystancji. Podobnie działają czujniki z rodziny TGS26XX [3] od japońskiej firmy Figaro, które służą do wykrywania a także pomiaru gazów organicznych w atmosferze. W systemach endoenergetycznych precyzyjny pomiar rezystancji ma zastosowanie m.in. w metodach wyznaczania rezystancji uziemienia dla budynków mieszkalnych, przemysłowych a także w kopalniach.

W rozdziale został rozpatrzony przykład dedykowanej metody dla pomiaru małych impedancji dla elektrod stosowanych w kotłach elektrodowych wysokociśnieniowych, ze względu na możliwość optymalizacji parametrów pracy systemu grzewczego oraz produkcji pary. Na potrzeby rozdziału rozpatrzono przypadek przemysłowy dostępny na rynku i dokonano pomiarów dla rynkowej elektrody stosowanej w tego typu kotłach.

2. Przegląd metod pomiarowych dla małych rezystancji i impedancji

W rozdziale rozpatrzono w sposób teoretyczny dwie możliwe metody pomiarowe stosowane do pomiarów małych rezystancji oraz impedancji. Metoda 1 to metoda techniczna, znana w literaturze

przedmiotu jako „układ dokładnego napięcia”, który może być stosowany w przypadku pomiaru poprawności uziemienia budynków [4, 5].



Rys. 1. Schemat układu dokładnego napięcia

Metoda przedstawiona na rysunku 1 jest metodą pośrednią, która jest obciążona dwoma błędami pomiarowymi. Jednym, wynikającym z dokładności przyrządów pomiarowych a drugim, metodycznym, związanym z wpływem rezystancji woltomierza na błąd bezwzględny (1).

$$\frac{\Delta_v}{R_x} = \frac{-R_x}{R_v + R_x} \quad (1)$$

gdzie:

- Δ_v – Błąd względny metody (2),
- R_x – Wartość mierzonego rezystora [Ω],
- R_v – Wartość rezystancji woltomierza [Ω],

$$\Delta_v = \frac{-R_x^2}{R_v + R_x} \quad (2)$$

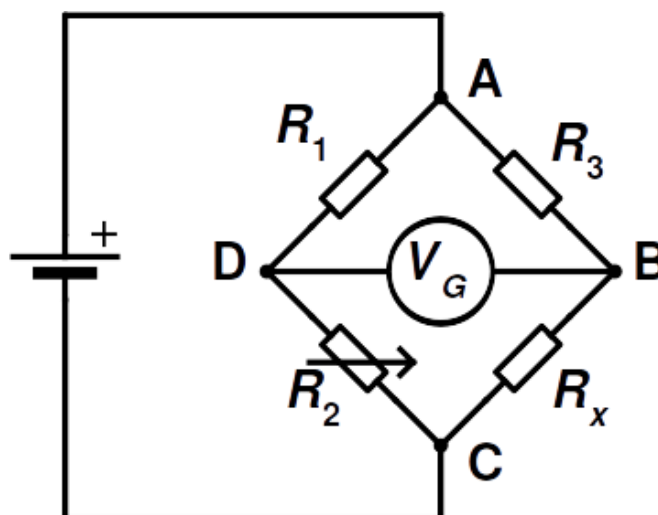
gdzie:

- R_x – Wartość mierzonego rezystora [Ω],
- R_v – Wartość rezystancji woltomierza [Ω],

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I_A - I_V} = \frac{U_x}{I_A - \frac{R_v}{I_V}} \quad (3)$$

W przypadku pomiaru rezystancji i impedancji małych wartości, rzędu mili Ohmów, należy wyeliminować nie tylko błąd metodyczny spowodowany wpływem przyrządów pomiarowych, ale także wpływ połączeń kablowych. Dlatego też do analizy w niniejszym rozdziale uznano, że należy przeanalizować jedynie przypadki związane z wykorzystaniem układów pomiarowych w oparciu o dzielniki napięcia. Jednym z przykładów jest Mostek Wheatstone'a (rys. 2), którego zaletą jest duża czułość metody pomiarowej przy odpowiedniej kalibracji oraz całkowita eliminacja błędów

metodycznego i możliwość optymalizacji metody poprzez redukcję wpływu przewodów na pomiar rezystora mierzonego poprzez zastosowanie metody 3- lub 4-przewodowej.



Rys. 2. Schemat ogólnego mostka Wheatstona

Ideą pomiaru jest stworzenie „idealnego dzielnika” napięcia poprzez minimalizację wartości napięcia mierzonego pomiędzy gałęziami mostka. Jednakże w praktyce otrzymanie idealnego 0 V nie jest możliwe, jednakże metodą tą można mierzyć bardzo dokładnie wartości rezystancji i impedancji nawet do trzeciego miejsca po przecinku, pod warunkiem posiadania rezystorów wzorcowych o dużej precyzji wykonania. Metoda nie jest obarczona błędem metody w przypadku pomiaru małych rezystancji i impedancji występujących w kotłach elektrodowych [6].

Wyliczenie rezystancji szukanej określa wzór (4) i (5).

$$R_x = \frac{R'_2 \cdot V_s - (R_1 + R'_2) \cdot V_g}{R_1 \cdot V_s - (R_1 + R'_2) \cdot V_g} \cdot R_3 \quad (4)$$

gdzie:

$$R'_2 = \frac{R_2 R_d}{R_2 + R_d} \quad (5)$$

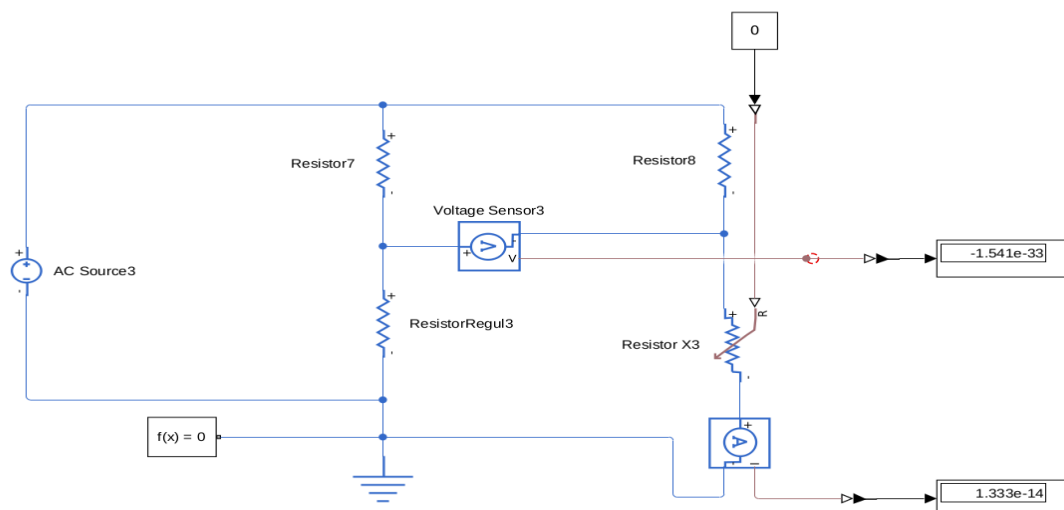
gdzie:

- R_x – mierzona rezystancja próbki, będąca przedmiotem analizy w układzie mostka Wheatstone’a, [Ω],
- R_1 – znana rezystancja odniesienia, pełniąca funkcję elementu kalibracyjnego mostka Wheatstone’a [Ω],
- R_3 – dodatkowy rezystor wzorcowy, wprowadzony w celu zapewnienia równowagi układu [Ω],
- R'_2 – zastępcza rezystancja gałęzi mostka, obejmująca rzeczywistą rezystancję nominalną oraz ewentualne efekty pasożytnicze wynikające z połączeń przewodowych [Ω],
- V_s – napięcie zasilające mostek, podawane na przeciwległe węzły układu [V],

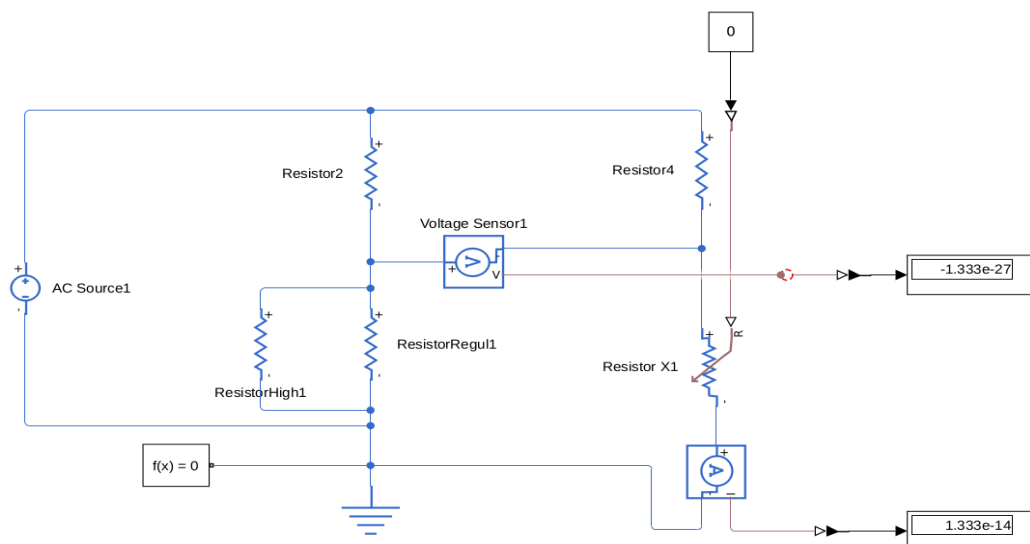
V_g – napięcie różnicowe mierzone na przekątnej mostka Wheatstone’a, do określenia stopnia niezrównoważenia układu [V].

3. Symulacja wybranych przypadków

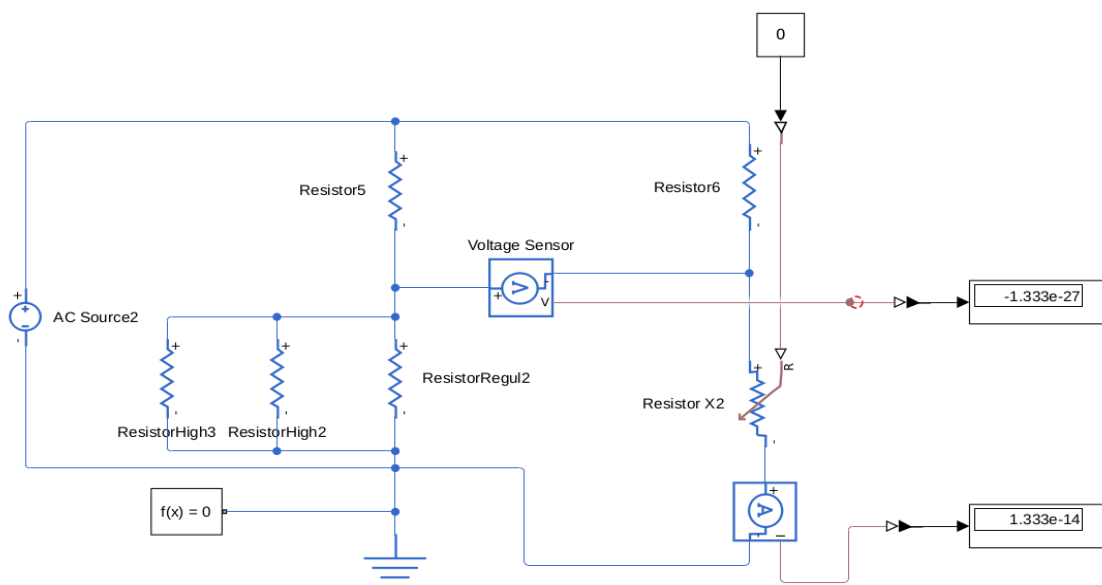
Do zamodelowania i symulowania trzech przypadków pomiarowych za pomocą metody mostka Wheatstone’a wykorzystano oprogramowanie MATLAB SIMULINK. Scenariusze pomiarowe zostały zaprezentowane na rysunkach 3-5.



Rys. 3. Schemat podstawowego mostka Wheatstone'a



Rys. 4. Schemat mostka Wheatstone'a z dodatkowym rezystorem wpiętym równolegle do dekady



Rys. 5. Schemat mostka Wheatstone'a z dodatkowymi rezystorami wpiętymi równolegle do dekady

We wszystkich przypadkach rezystory podłączone do plusa zasilania miały 1 kOhm, natomiast na układzie regulowanym wymuszano rezystancję zastępczą równą 1 mOhm. W tym przypadku udowodniono, że można zrównoważyć układ pomiarowy, ponieważ zarejestrowane wartości na woltomierzu były bliskie 0. Powyższe schematy nie uwzględniają rezystancji przewodów, którymi połączony jest rezystor badany. Przypadek ten zostanie rozpatrzony podczas przeprowadzenia eksperymentu pomiarowego w kolejnym rozdziale.

4. Pomiar impedancji elektrody kotła

Do wykonania eksperymentu użyto multimetru uniwersalnego UT804, rezystorów wzorcowych 1 kOhm (2 szt.) klasy 0,01% (producent INCO Pyskowice) podłączonych do plusa zasilania dekady wzorcowej P4831 klasy 0,02% oraz rezystor 10 MOhm klasy 0,05% model 6864-62 (produkcja Radziecka), wpięty równolegle do dekady. Dodatkowo w pomiarach uwzględniono wpływ przewodów na rezystancję mierzoną poprzez dodanie dodatkowego przewodu pomiędzy źródłem zasilania (+) a rezystorem mierzonym. Układem zasilania był zasilacz prądu przemiennego 50 Hz o napięciu 50 V. Na rysunkach 6-7 przedstawiono sposób podłączenia urządzeń w laboratorium.



Rys. 6. Widok układu pomiarowego - podłączonych elementów na stole laboratoryjnym



Rys. 7. Widok układu pomiarowego – wskazanie woltomierza

W ramach doświadczenia wykonano pomiary ciągle rejestrowane komputerowo w temperaturze stałej 22°C (pomieszczenie klimatyzowane).

Następnym krokiem była analiza niepewności pomiarowej dla opracowanej metody. Do tego celu skorzystano z metody oceny niepewności pomiaru przy wzorcowaniu [7] - [9]. Wzory (6) oraz (7) ilustrują metodę obliczeniową niepewności pomiarowej uzyskanej w przeprowadzonym eksperymencie.

$$R_x = \frac{R_2 R_d V_s - R_1 R_2 V_g - R_1 R_d V_g - R_2 R_d V_g}{R_1 R_2 V_s + R_1 R_d V_s - R_1 R_2 V_g - R_1 R_d V_g - R_2 R_d V_g} R_3 +$$

$$+ c_1 u(R_1) + c_2 u(R_2) + c_3 u(R_3) + c_d u(R_d) + c_s u(V_s) + c_g u(V_g) \quad (6)$$

Ponieważ rozpatrujemy stan równowagi mostka $V_g = 0$ uzyskujemy:

$$R_x = \frac{R_2 R_3 R_d}{R_1 R_2 + R_1 R_d} + \quad (7)$$

$$+ c_1 u(R_1) + c_2 u(R_2) + c_3 u(R_3) + c_d u(R_d) + c_s u(V_s) + c_g u(V_g)$$

gdzie:

$u(R_1)$ - niepewność określenia R_1 .

$u(R_2)$ - niepewność określenia R_2 .

$u(R_3)$ - niepewność określenia R_3 .

$u(R_d)$ - niepewność określenia R_d .

$u(V_s)$ - niepewność określenia V_s

$u(V_g)$ - niepewność określenia V_g

$c_1, c_2, c_3, c_d, c_s, c_g$ - współczynniki wrażliwości.

$$c_1 = \frac{\sigma R_x}{\sigma R_1} = \frac{-R_2^2 R_3 R_d - R_2 R_3 R_d^2}{R_1^2 R_2^2 + 2R_1^2 R_2 R_d + R_1^2 R_d^2}$$

$$c_2 = \frac{\sigma R_x}{\sigma R_2} = \frac{R_3 R_d^2}{R_1 R_2^2 + 2R_1 R_2 R_d + R_1 R_d^2}$$

$$c_3 = \frac{\sigma R_x}{\sigma R_3} = \frac{R_2 R_d}{R_1 R_2 + R_1 R_d}$$

$$c_d = \frac{\sigma R_x}{\sigma V_d} = \frac{R_2^2 R_3}{R_1 R_2^2 + 2R_1 R_2 R_d + R_1 R_d^2}$$

$$c_s = \frac{\sigma R_x}{\sigma V_s} = 0$$

$$c_g = \frac{\sigma R_x}{\sigma V_g} = 0$$

Niepewności określenia wartości rezystancji i napięć (rozkłady prostokątne) opisane wzorami od (8-13):

$$u(R_1) = \frac{\Delta R_1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \, \Omega \quad (8)$$

$$u(R_2) = \frac{\Delta R_2}{\sqrt{3}} = 2886 \, \Omega \quad (9)$$

$$u(R_3) = \frac{\Delta R_3}{\sqrt{3}} = 0,0577 \quad \Omega \quad (10)$$

$$u(R_d) = \frac{\Delta R_d}{\sqrt{3}} = 0,00173 \quad \Omega \quad (11)$$

$$u(V_s) = \frac{\Delta V_s}{\sqrt{3}} = 0 \quad V \quad (12)$$

$$u(V_g) = \frac{\sigma R_x}{\sigma V_g} = 0 \quad V \quad (13)$$

Niepewność rozszerzona $k=2$ poziom ufności 95%. Założenie rozkładów prostokątnych wszystkich składowych niepewności opisane wzorem (14):

$$U(R_x) = \sqrt{\left(\frac{\sigma R_x \Delta R_1}{\sigma R_1 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_x \Delta R_2}{\sigma R_2 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_x \Delta R_3}{\sigma R_3 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_x \Delta R_d}{\sigma V_d \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_x \Delta V_s}{\sigma V_s \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_x \sigma R_x}{\sigma V_g \sigma V_g}\right)^2} \quad (14)$$

gdzie:

c_i - można wyliczyć i dla wszystkich danych liczbowych są liczbami. Uzyskany wynik niepewności pomiaru został zaprezentowany wzorem (15).

$$U(R_x) = 1.6 \quad \mu\Omega \quad (15)$$

4. Podsumowanie

W rozdziale wykazano, że możliwe jest zbudowanie stanowiska do pomiaru małych rezystancji i impedancji. Przedstawiona metoda pomiarowa opiera się o modyfikację metody mostkowej znanej z literatury jako metoda Wheatstone'a [10] - [14]. Powyższa metoda została zweryfikowana metodą symulacyjną w oprogramowaniu MATLAB-SIMULINK. Stanowisko zostało zbudowane z rezystorów wzorcowych oraz precyzyjnej dekady. Następnym etapem badań będzie opracowanie modelu fizycznego dla badanej elektrody w celu wyliczenia jej impedancji oraz rezystancji. Kolejną optymalizacją związaną z minimalizacją niepewności pomiarowej, będzie próba zastosowania precyzyjnych dekad pomiarowych za rezystory R1 i R3 zgodnie z rysunkiem 2. Metoda zostanie również zweryfikowana za pomocą oscyloskopu. Dodatkowo rozważa się porównanie metody z dedykowanym mostkiem Thomsona [15] - [18] z wzorcem 1 mOhm.

Literatura

1. PT100 - <https://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~iquip/domeenv/PDF/pt100plat.pdf>
[dostęp 15 listopada 2024]
2. PT1000 - https://www.tme.eu/Document/67cf717905f835bc5efcdcd56ca3a8e2/Pt1000-550_EN.pdf
[dostęp 15 listopada 2024]



3. TGS2602 -
https://www.figarosensor.com/product/docs/TGS2610_Technical%20Infomation_rev01.pdf
[dostęp 15 listopada 2024]
4. PN-HD 60364-6:2016-07 - Instalacje elektryczne niskiego napięcia
5. Sulkowski M. A. (2019).: Badania odbiorcze i okresowe instalacji elektrycznych w świetle wymagań nowej normy PN-HD 60364-6: 2016-07 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 6-Sprawdzanie. *Wiadomości Elektrotechniczne*, 87(5).
6. <https://www.parat.no/pl/products/industry/parat-ieh/>
7. EA Laboratory Committee. (2022). *EA 4/02 M: 2022 - Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*.
8. Fotowicz P., Korczyński M. J., & Hetman A. (2006): Zastosowanie probabilistycznego modelu obliczania niepewności pomiaru przy wzorcowaniu omomierza i woltomierza. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 52(11), 20-24.
9. Fotowicz P. (2004): A method of approximation of the coverage factor in calibration. *Measurement*, 35(3), 251-256.
10. Ferdiansyah T., Balayssac J. P., & Turatsinze A. (2022): An experimental approach for characterisation of concrete damage using the wheatstone bridge circuit. *International Journal of Civil Engineering*, 20, 75-89.
11. Alnasser E. (2017): A novel fully analog null instrument for resistive wheatstone bridge with a single resistive sensor. *IEEE Sensors Journal*, 18(2), 635-640.
12. Idris N. H. B., Musa M. R. B., & Hassan H. S. B. (2019): Pembangunan DC Wheatstone Bridge di Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Politeknik Tuanku Syed Sirajuddin, PTSS. *Journal on Technical and Vocational Education*, 4(1), 43-50.
13. Ong G. T., & Chan P. K. (2014): A power-aware chopper-stabilized instrumentation amplifier for resistive wheatstone bridge sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(9), 2253-2263.
14. Hoffmann K. (1974): *Applying the wheatstone bridge circuit*. Darmstadt, Germany: HBM.
15. Wenner F. (1911): A Method for Eliminating the Effect of all Connecting Resistances in the Thomson Bridge. *Physical Review (Series I)*, 32(6), 614.
16. Ndiokubwayo K. (2022): College students improvised ideas during physics laboratory activities. *Journal of Classroom Practices*, 1(1), 1-9.
17. Xu Z., Li X., & Li S. (2023): A Study on Quality Education in Vocational Education - A Case Analysis of Teaching the PFC Circuit Principle in Vehicle Onboard Chargers. *International Journal of New Developments in Education*, 5(18).
18. Jordan D. W. (1990): The magnetic circuit model, 1850–1890: The resisted flow image in magnetostatics. *The British Journal for the History of Science*, 23(2), 131-173.
[dostęp 15 listopada 2024]



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.5>

Analiza stanów nieustalonych jednostki kogeneracyjnej - weryfikacja wymagań kodeksu sieci NC RfG

Adrian Nocoń – CH4 Moto Śląsk

Andrzej Figiel – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Andrzej Niedworok – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Grzegorz Przybyła – Politechnika Śląska

Wojciech Adamczyk – Politechnika Śląska

Streszczenie: Obecnie obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania rozproszonymi źródłami energii elektrycznej, w szczególności układami kogeneracyjnymi. Źródła przyłączane do systemu elektroenergetycznego muszą spełniać szereg wymogów, w tym wymogi kodeksu sieci NC RfG. W rozdziale przedstawiono analizę stanów nieustalonych i interakcje pomiędzy silnikiem spalinowym i generatorem synchronicznym zachodzące w jednostce kogeneracyjnej przyłączonej do sieci. W badaniach, oprócz modelu generatora uwzględniono również zerowymiarowy model silnika spalinowego, w którym uwalnianie energii chemicznej paliwa określone jest na podstawie funkcji Wiebego. Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych przedstawiono wnioski dotyczące możliwości analizy pracy jednostek wytwórczych na potrzeby ich certyfikacji.

Słowa kluczowe: kodeks NC RfG, modelowanie matematyczne, stany nieustalone, jednostki kogeneracyjne

Analysis of CHP unit transients - Verification of NC RfG grid code requirements

Abstract: There is currently a significant increase in interest in distributed electricity sources, particularly CHP systems. Sources connected to the electricity system must meet a number of requirements, including those of the NC RfG grid code. This chapter presents an analysis of the transients and interactions between an internal combustion engine and a synchronous generator occurring in a grid-connected CHP unit. In addition to the generator model, a zero-dimensional model of the internal combustion engine is included in the study, in which the chemical energy release of the fuel is determined by a Wiebe function. On the basis of the simulation results obtained, conclusions are presented regarding the possibility of analysing the operation of the generating units for their certification.

Keywords: NC RfG code, mathematical modelling, transients, cogeneration units

1. Wprowadzenie

Obecnie obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania rozproszonymi źródłami energii elektrycznej w szczególności układami kogeneracyjnymi (z ang. CHP - Combined Heat and Power), do których zaliczane są jednostki napędzane silnikami spalinowymi o zapłonie iskrowym zasilane gazem ziemnym lub biogazem. Na rynku oferowane są jednostki o mocach znamionowych od kilku kilowatów do kilku megawatów.

Urządzenia CHP jako źródła energii elektrycznej przyłączane są do sieci elektroenergetycznej, a w związku z tym muszą spełniać szereg różnych wymogów odnośnie swoich właściwości obejmujących właściwą reakcję (lub brak reakcji) w przypadku odchylenia od napięcia referencyjnego i częstotliwości znamionowej, odporność na stany zakłócenia w systemie elektroenergetycznym (zwarcia) oraz wsparcie odbudowy systemu po jego załamaniu. Wymogi te dotyczą między innymi

zabezpieczeń, układów regulacji i właściwości dynamicznych. Część z tych wymogów opisana jest w kodeksie sieci NC RfG [1, 2].

W literaturze dotyczącej układów CHP analizowane są problemy związane z pracą silnika spalinowego, generatora energii elektrycznej oraz wymianą ciepła i gromadzeniem energii w zasobnikach [3, 4, 5, 6]. Z uwagi na konieczność certyfikacji urządzeń przyłączonych do sieci elektroenergetycznej wynikającej z przepisów prawa, ważnym aspektem jest ponadto metodologia badań certyfikujących. Problem ten nabiera znaczenia zwłaszcza w sytuacji, w której nie można bezpośrednio przeprowadzić badań obiektu rzeczywistego. Sytuacja taka może mieć miejsce np. gdy certyfikowana jednostka wytwórcza ma znaczną moc znamionową i przeprowadzenie badań laboratoryjnych nie jest możliwe z uwagi na znaczne wartości prądów [7, 8]. Wówczas rozwiązaniem mogą okazać się badania symulacyjne z wykorzystaniem wiarygodnych, zwalidowanych modeli matematycznych.

W zależności od przeznaczenia jednostki kogeneracyjnej wyposażane są w odpowiednie układy regulacji, w szczególności zapewniające regulację prądu wzbudzenia generatora (excitation controller - EC) oraz regulację prędkości obrotowej silnika spalinowego (speed controller - SC). Dla układów umożliwiających pracę równoległą z siecią elektroenergetyczną instalowane są regulatory mocy czynnej (to zadanie realizuje SC) i biernej (to zadanie realizuje EC). Niezależnie od przeznaczenia jednostki kogeneracyjnej zawsze wyposażane są w układy sterowania silnika spalinowego ECU (z ang. Engine Control Unit). Układ ECU zapewnia odpowiednie sterowanie pracą silnika spalinowego, między innymi przez odpowiednie sterowanie składem mieszanki paliwowo-powietrznej, kątem wyprzedzenia zapłonu i energią wyładowania na świecy zapłonowej. Odpowiednie sterowanie zapewniające jest zazwyczaj poprzez mapy silnika, opracowywane na podstawie badań teoretycznych i laboratoryjnych. Mapy te wiążą wielkości wyjściowe (w tym skład mieszanki paliwowo-powietrznej) z wielkościami wejściowymi, takimi jak aktualna prędkość obrotowa, położenie przepustnicy, podciśnienie w układzie dolotowym i zawartość tlenu w spalinach. Należy podkreślić, że podział na poszczególne układy regulacji nie zawsze odpowiada fizycznej budowie układu sterowania, gdyż zazwyczaj część funkcji regulacyjnych realizują złożone urządzenia, takie jak dedykowane sterowniki programowalne, wypracowując odpowiednie sygnały dla urządzeń wykonawczych lub regulatorów podrzędnych. Przykładem takiej struktury może być regulacja mocy biernej, która zazwyczaj realizowana jest przez regulator nadrzędny (zawierający ponadto programy realizujące: zabezpieczenia elektryczne, harmonogramowanie zadań, proces synchronizacji z siecią, w tym przełączanie regulacji dla pracy wydzielonej i równoległej z siecią), wypracowujący sygnał dla regulatora napięcia, który to zaś steruje pracą wzbudnicy [9, 10].

W monografii, korzystając z metod symulacyjnych, przedstawiono interakcje zachodzące pomiędzy silnikiem spalinowym i generatorem synchronicznym. Rozważone interakcje mają szczególne znaczenie w stanach nieustalonych, powodowanych przez zmianę warunków pracy generatora synchronicznego, czyli zmiany w systemie elektroenergetycznym, do którego generator jest przyłączony. Zachowanie jednostki wytwórczej w stanach nieustalonych jest zaś ważnym aspektem oceny zgodności jednostki z wymaganiami stawianymi przez przepisy prawa, w szczególności wymaganiami kodeksu sieci NC RfG, prowadzonej w ramach jej certyfikacji. Wiarygodne analizy wymagają zatem dokładnego modelowania zjawisk występujących w jednostce wytwórczej. Należy podkreślić, że zagadnienia związane z modelowaniem pracy silnika spalinowego (lub szerzej układu napędowego generatora synchronicznego) są złożone i często pomijane w analizach elektromagnetycznych stanów nieustalonych. W podsumowaniu rozdziału, na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych przedstawiono wnioski dotyczące możliwości analizy pracy jednostek

wytwórczych na potrzeby ich certyfikacji, ze szczególnym uwzględnieniem interakcji zachodzących pomiędzy silnikiem spalinowym i generatorem synchronicznym. Należy podkreślić, że certyfikaty zgodności (certyfikaty NC RfG), wydawane przez Zakład Badań Atestacyjnych Jednostkę Certyfikującą (certyfikat akredytacji AC 023), są wydawane na podstawie wyników rzeczywistych pomiarów wielkości fizycznych związanych z weryfikowaną własnością jednostki kogeneracyjnej przeprowadzanych przez Laboratorium Badań Stosowanych (certyfikat akredytacji AB 665), uzupełnionych wynikami badań symulacyjnych w przypadkach omówionych w niniejszym rozdziale.

2. Model matematyczny jednostki wytwórczej z silnikiem spalinowym

W celu uproszczenia rozważań jednostkę kogeneracyjną zamodelowano przy założeniu, że całe ciepło generowane w układzie jest oddawane do układu chłodzenia, który rozprasza je nie wpływając na proces spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku ani nie zakłócając zjawisk występujących w generatorze synchronicznym.

Do badań symulacyjnych wykorzystano powszechnie używany liniowy, obwodowy model matematyczny generatora synchronicznego typu RL [11, 12, 13, 14]. Model ten wyprowadza się przyjmując założenia: wypadkowe pole magnetyczne w generatorze jest sumą pola magnetycznego głównego i pól rozproszeń twornika i magneśnicy, uzwojenia twornika i magneśnicy sprzężone są za pośrednictwem podstawowej harmonicznej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej, magneśnica jest symetryczna względem dwóch osi wzdlużnej (d) i poprzecznej (q), uzwojenia twornika są trójfazowe symetryczne, charakterystyka magnesowania obwodu magnetycznego jest liniowa.

W obwodowym modelu matematycznym generatora synchronicznego można uwzględnić wiele obwodów reprezentujących zjawiska elektromagnetyczne w osiach wzdlużnej i poprzecznej [15]. W rozważanym przypadku przyjęto model z jednym zastępczym obwodem tłumiącym magneśnicy w każdej z osi d i q, czyli model typu (2,1). Parametry takiego modelu można wyznaczyć korzystając z danych katalogowych [15, 16], tj. w niniejszych badaniach do wyznaczenia parametrów modelu użyto parametrów standardowych dostarczonych przez producenta generatora.

Ponieważ w prezentowanych badaniach rozważano pracę na sieć elektroenergetyczną, model matematyczny generatora synchronicznego powiązano z modelem matematycznym reprezentującym system elektroenergetyczny (SEE). W celu zamodelowania SEE przyjęto, że generator współpracuje z siecią sztywną przez transformator, przy czym impedancję wewnętrzną źródła reprezentującego SEE wyznaczono przyjmując, że moc zwarciowa w miejscu przyłączenia jest równa 20-krotnej mocy znamionowej generatora [17]. Parametry transformatora wyznaczono zaś w oparciu o dane z rzeczywistego miejsca instalacji generatora o takiej samej mocy znamionowej, jak generator badany.

Z uwagi na chęć odwzorowania interakcji generator – silnik napędowy, w prezentowanych badaniach uwzględniono oddziaływanie spalinowego silnika napędowego. Matematyczny model silnika spalinowego o zapłonie iskrowym wykorzystanego w badaniach oparty jest o analizę różniczkowego bilansu energii i masy [18]. Rozwiązanie bilansu po odpowiednich wyliczeniach wielkości pośrednich przeprowadzono przy założeniach: w badanym silniku nie występują przedmuchy (tzn. masa mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrze pozostaje stała między zamknięciem zaworu dolotowego i otwarciem wylotowego), w silniku następuje spalanie całkowite i zupełne, temperatura wlotowa mieszanki jest równa temperaturze otoczenia, temperatura ścian wewnątrz cylindra jest stała, spadek ciśnienia w kanale dolotowym jest równy 5 kPa, analiza bilansu dotyczy jedynie suwu sprężania i rozprężania.

Równanie różniczkowe bilansu energii, szerzej omówione w pracy [19], można przedstawić następująco:

$$\frac{dp}{d\alpha} = \frac{\kappa-1}{V} \left(m_f W_d \frac{dx}{d\alpha} - \frac{\kappa}{\kappa-1} p \frac{dV}{d\alpha} - \frac{dQ_{sc}}{d\alpha} \right), Pa/rad \quad (1)$$

gdzie: p, Pa - chwilowa wartość ciśnienia w cylindrze, α - kąt obrotu wału korbowego, κ - - stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości (funkcja temperatury czynnika wewnątrz cylindra T, K , i stopnia wypalenia paliwa $x, -$), $m_f, kg/cykl$ - masa dawki paliwa, $W_d, J/kg$ - wartość opałowa paliwa, V, m^3 - objętość cylindra zależna od kąta obrotu wału korbowego, Q_{sc}, J - strumień strat ciepła przez ścianki cylindra, głowicę oraz denko tłoka.

W równaniu różniczkowym (1) określono poszczególne parametry punktu pracy silnika spalinowego, właściwości gazu, źródeł ciepła oraz stopnia wypalenia paliwa i jego dawki. W pierwszej kolejności zdefiniowano chwilową objętość cylindra w oparciu o kinematykę układu tłokowo-korbowego, zgodnie z zależnością:

$$V = \frac{V_d}{\varepsilon - 1} + \frac{V_d}{2} \left(1 + \sigma - \cos \alpha - \sqrt{\sigma^2 - \sin^2 \alpha} \right), m^3 \quad (2)$$

gdzie: V_d, m^3 - to pojemność skokowa cylindra, ε - stopień kompresji, a σ - to stosunek długości korbowodu do promienia wykorbienia.

Na podstawie chwilowych wartości objętości cylindra możliwe jest równoczesne obliczenie chwilowych wartości powierzchni ścian cylindra, którą wykorzystuje do obliczeń strat ciepła. W następnej kolejności wyznaczono temperaturę gazu wewnątrz cylindra za pomocą równania stanu gazu, przy znajomości chwilowych wartości ciśnienia, objętości i składu mieszanki paliwowo-powietrznej oraz jej masy w cylindrze. Kolejnym etapem obliczeniowym jest wyznaczenie wartości κ tj. stosunku ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości. W tym celu wykorzystano równania aproksymujące [20] oraz wyznaczoną temperaturę gazu i skład mieszanki paliwowo-powietrznej, obliczony z równań stechiometrycznych [21]. Zmiana składu gazu wewnątrz cylindra na skutek spalania zależna jest od: parametru x , oznaczającego stopień wypalenia paliwa (tj. masa paliwa aktualnie utlenionego w procesie spalania odniesioną do masy całkowitej dawki paliwa w danym cyklu roboczym), składu chemicznego paliwa oraz jego dawki. Skład chemiczny paliwa jest znany, natomiast dawka paliwa w niniejszych badaniach jest zmienną niezależną modelu, która jest wypracowywana w modelu regulatora reprezentującego moduł ECU. Chwilowe wartości stopnia wypalenia paliwa otrzymano stosując równanie Wiebego [22, 23]:

$$x = 1 - e^{-a \left(\frac{\alpha}{\alpha_k} \right)^{m+1}} \quad (3)$$

gdzie: $\alpha, \alpha_k, ^\circ OWK$ - bieżąca oraz całkowita wartość kąta obrotu wału korbowego podczas procesu spalania, a, m - współczynniki funkcji Wiebego.

Ostatnim nieznanym czynnikiem w równaniu (1) jest strumień strat ciepła. W tym celu wykorzystano równanie Annanda [21], z którego oblicza się współczynnik wnikania ciepła h zgodnie z zależnością:

$$h = 0,8 \frac{k}{B} R_e^{0.7} + 4,3 \cdot 10^{-9} \frac{(T^4 - T_w^4)}{T - T_w}, W/m^2K \quad (4)$$

gdzie: k , W/mK - to przewodność cieplna gazu, B , m - średnica cylindra, Re - to liczba Reynoldsa, obliczona dla prędkości równej średniej prędkości tłoka, T_w , K - to temperatura ścian cylindra, tłoka i głowicy. Wartości stałej (0,8) oraz współczynnika ($4,3 \cdot 10^{-9}$, W/m^2K^4) dobrano zgodnie z [24]. Dodatkowo przewodność cieplna, jak również kinematyczny współczynnik lepkości zostały obliczone przy wykorzystaniu równań aproksymujących dostępnych w [20].

Kolejnym etapem obliczeniowym modelu jest wyznaczenie chwilowego strumienia strat ciepła Q_{sc} , wykorzystując równanie przepływu ciepła dla konwekcji przy zadawaniu chwilowej powierzchni wymiany ciepła, wyznaczanej z geometrii cylindra silnika:

$$Q_{sc} = A_{ch} h (T - T_w), W \quad (5)$$

gdzie: A_{ch} , m^2 - to chwilowa powierzchnia wymiany ciepła, h , W/m^2K - współczynnik wnikania ciepła, T , K - średnia temperatura ładunku w cylindrze silnika, T_w , K - temperatura powierzchni wymiany ciepła.

Do wyznaczenia masy mieszanki wykorzystano model sprawności wolumetrycznej, szerzej opisany w [20]:

$$\eta_r = \frac{M}{M_a} \frac{p_m}{p_a} \frac{T_a}{T_i} \frac{1}{1 + \frac{F}{A}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} - \frac{1}{\kappa(\varepsilon - 1)} \left(\frac{p_e}{p_i} + \kappa_r + 1 \right) \right) \quad (6)$$

gdzie: M , $kg/kmol$ - to masa molowa mieszanki paliwowo-powietrznej, M_a , $kg/kmol$ - masa molowa powietrza, p , Pa - to ciśnienie, T , K - to temperatura, ε , - - to stopień kompresji, F/A , kg/kg - to stosunek masy paliwa do masy powietrza w mieszance. Przy czym indeksy „in”, „a”, „e” przy zmiennych odnoszą się odpowiednio: do momentu zamknięcia zaworu dolotowego powietrza atmosferycznego oraz wylotowego, κ_r , - - oznacza stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego przy stałej objętości w momencie zamknięcia zaworu dolotowego.

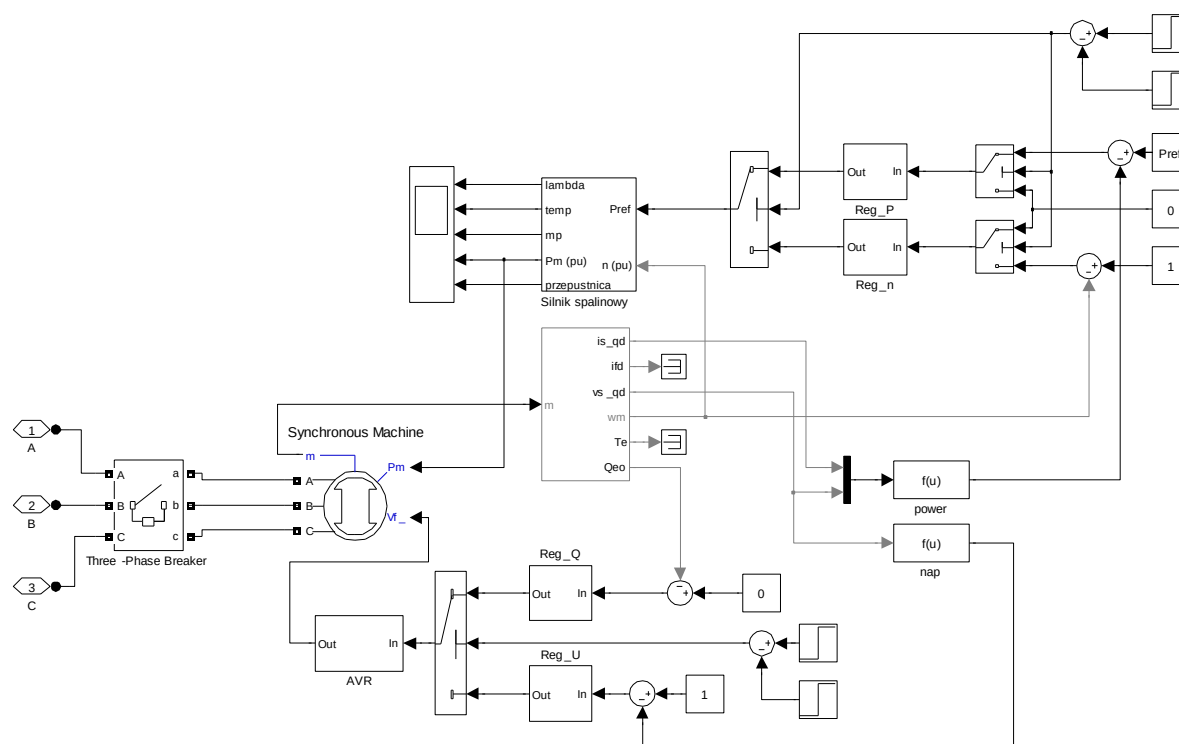
Na podstawie wartości sprawności wolumetrycznej wyznaczono ciśnienie wewnątrz cylindra w momencie zamknięcia zaworu dolotowego, wykorzystując równanie stanu gazu [25].

Strumień ciepła przekazywany od spalin do otoczenia określono na podstawie domknięcia równania bilansu energii silnika. Następnie określona została temperatura spalin wylotowych. W oparciu o doświadczenia z badań eksperymentalnych w obliczeniach założono, że wartość sprawności mechanicznej silnika wynosi 0,9.

Tak przygotowane warunki początkowe zostały następnie wykorzystane w numerycznym procesie obliczeniowym pozwalając na wyznaczenie aktualnego chwilowego stanu silnika spalinowego i wykorzystanie wyznaczonych zmiennych do zamodelowania interakcji generator - silnik napędowy w elektromechanicznych stanach nieustalonych generatora synchronicznego.

Model matematyczny jednostki kogeneracyjnej zrealizowano w programie Matlab. Schemat blokowy modelu przedstawiono na rysunku 1.

Oprócz modelu matematycznego generatora synchronicznego i silnika spalinowego w badaniach symulacyjnych uwzględniono jeszcze podstawowe układy regulacji jednostki kogeneracyjnej. Zamodelowano układ regulacji mocy i prędkości obrotowej silnika spalinowego, który w sposób bezpośredni wpływa na skład i ilość mieszanki paliwowo powietrznej silnika. W części elektrycznej jednostki zamodelowano zaś układy regulacji wpływające na prąd wzbudzenia generatora, tj. regulator mocy biernej i regulator napięcia. Należy podkreślić, że regulator prędkości obrotowej i regulator napięcia są wykorzystywane, gdy jednostka kogeneracyjna pracuje na biegu jałowym lub pracuje na sieć wydzieloną. Po synchronizacji jednostki z systemem elektroenergetycznym (tj. po przyłączeniu generatora do sieci) jako podstawowe elementy regulacyjne wykorzystywane są regulator mocy czynnej i regulator mocy biernej [9, 10].



Rys. 1. Model matematyczny jednostki kogeneracyjnej wykorzystywany w badaniach symulacyjnych

3. Wyniki badań symulacyjnych

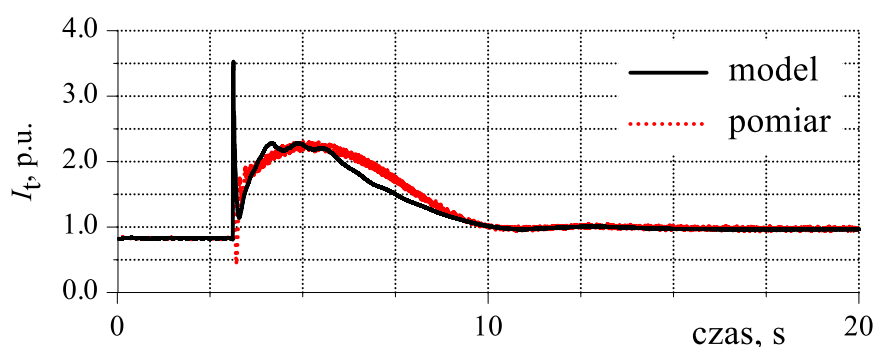
W badaniach symulacyjnych wykorzystano model kogeneratora opracowany w środowisku Matlab-Simulink (rys. 1). Modelowano kogenerator o nominalnej mocy elektrycznej równej 200 kW przy nominalnej prędkości obrotowej równej 1500 obr/min.

Modelowano iskrowy silnik spalinowy wolnossący zasilany metanem napędzający generator synchroniczny przyłączony do sieci elektroenergetycznej.

Obliczenia przeprowadzono zakładając stały czas spalania równy 65° . Ponadto przyjęto kąt wyprzedzenia zapłonu równy 28° przed GZP (górnym zwrotnym położeniem tłoka w cylindrze). Obie te wielkości wyrażono w stopniach kąta obrotu wału silnika spalinowego. Parametry modelu matematycznego silnika spalinowego wyznaczono w oparciu o badania laboratoryjne silnika spalinowego małej mocy. Uzyskane wyniki odpowiednio przeskalowano do silnika o większej mocy znamionowej.

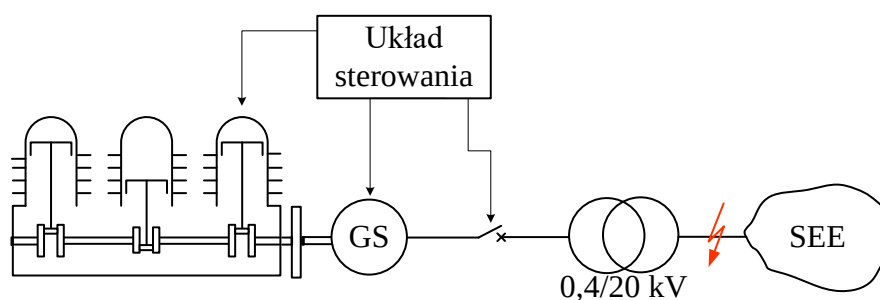
Przyjęto, że modelowany generator synchroniczny jest wydawnobiegunowy, jego parametry niezbędne do obliczeń zaczerpnięto z [26].

Parametry układów regulacji silnika spalinowego (parametry regulatora mocy) i generatora synchronicznego (parametry regulatora napięcia wraz z regulatorem mocy biernej) wyznaczono metodą estymacji Monte Carlo [6] w oparciu o przebiegi zarejestrowane w Laboratorium Badań Stosowanych KOMAG w czasie skokowej zmiany napięcia sieci elektroenergetycznej, do której przyłączona była jednostka kogeneracyjna. Porównanie przebiegów prądu twornika generatora synchronicznego zarejestrowanego (pomiarowego) i przebiegu uzyskanego symulacyjnie dla wyestymowanych parametrów układów regulacji przedstawiono na rysunku 2.

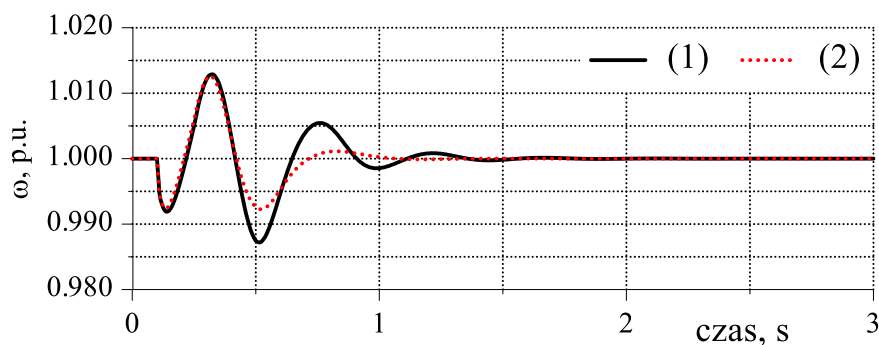


Rys. 2. Przebieg wartości skutecznej prądu twornika generatora synchronicznego w stanie nieustalonym wywołanym skokową zmianą napięcia SEE

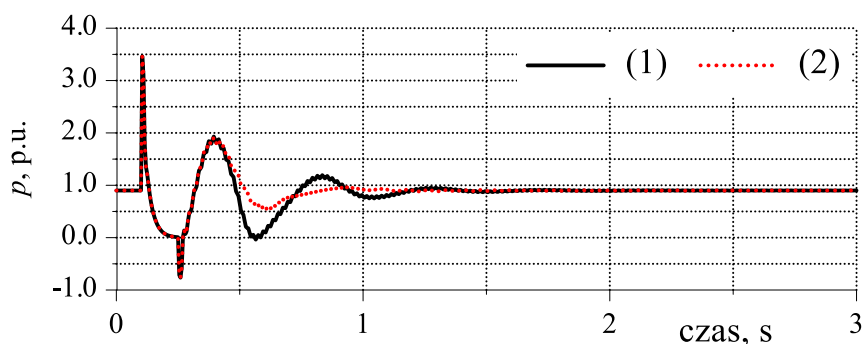
Na rysunkach od 4 do 6 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji stanu nieustalonego wywołanego przemijającym zwarcie w SEE. Modelowano zwarcie o czasie trwania równym 150 ms występującym po stronie sieci średniego napięcia, przy czym generator synchroniczny do SEE był przyłączony poprzez transformator. Uproszczony schemat analizowanego SEE przedstawiono na rysunku 3.



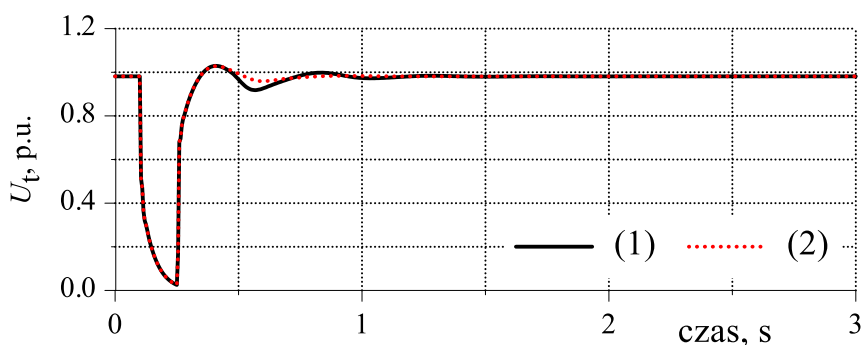
Rys. 3. Uproszczony schemat analizowanego systemu elektroenergetycznego



Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej generatora synchronicznego w czasie przemijającego zwarcia dla modelu matematycznego uwzględniającego wpływ silnika spalinowego (1) i bez tego uwzględnienia (2)



Rys. 5. Przebieg mocy chwilowej generatora synchronicznego w czasie przemijającego zwarcia dla modelu matematycznego uwzględniającego wpływ silnika spalinowego (1) i bez tego uwzględnienia (2)



Rys. 6. Przebieg napięcia zaciskowego generatora synchronicznego w czasie przemijającego zwarcia dla modelu matematycznego uwzględniającego wpływ silnika spalinowego (1) i bez tego uwzględnienia (2)

4. Podsumowanie

Analizując przebiegi prądów, mocy chwilowej i napięcia w czasie elektromechanicznych stanów nieustalonych generatora synchronicznego stwierdzono niewielkie różnice pomiędzy wartościami dla przypadku uwzględnienia lub pominięcia wpływu silnika spalinowego na badany stan nieustalony, co ma potwierdzenie w literaturze przedmiotu.

Przedstawiony model matematyczny pozwala analizować różne stany nieustalone jednostki kogeneracyjnej z uwzględnieniem interakcji silnik spalinowy – generator synchroniczny. Model ten,

z uwagi na wyznaczanie wartości energii cieplnej, pozwala również na modelowanie zjawisk termodynamicznych, związanych z odbiorem ciepła z kogeneratora.

Problem modelowania procesu spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym jest bardzo złożony. Wyznaczenie, nawet przybliżonej wartości momentu mechanicznego na wale wymaga wielu obliczeń, w tym obliczeń iteracyjnych. Wymaga ponadto wykorzystania zależności i wartości doświadczalnych. Konsekwencją tego jest to, że model matematyczny uwzględniający wpływ silnika spalinowego na elektromechaniczne stany nieustalone jest wieloparametryczny i bardzo złożony. W związku z tym uzyskane wyniki charakteryzują się dużą niepewnością [9]. Istnieje zatem konieczność prowadzenia dalszych prac nad modelowaniem silnika spalinowego mających na celu udokładnienie modelu i budowę modelu zdolnego odwzorować w zadowalający sposób chwilowe wartości momentu na wale silnika. Dokładniejszy model mógłby zostać wykorzystany do przybliżonej analizy takich zjawisk jak wyższe harmoniczne, drgania oraz oddziaływanie na środowisko.

Reasumując na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych można stwierdzić, że istnieje możliwość analizy pracy jednostek wytwórczych na potrzeby ich certyfikacji z uwzględnieniem modelu matematycznego silnika spalinowego. Należy, jednakże mieć na uwadze fakt, że dokładne odwzorowanie zjawisk w silniku spalinowym jest trudne a wyniki uzyskane na drodze symulacji obarczone są dużą niepewnością. Zwiększenie dokładności odwzorowania rzeczywistości a w konsekwencji uzyskanie wiarygodnych przebiegów możliwe jest między innymi poprzez dokładne badania laboratoryjne na podstawie, których możliwa jest estymacja parametrów modeli matematycznych i ich walidacja. Wiarygodne wyniki mogą zostać zaś wykorzystane do doboru elementów sterujących pracą jednostki kogeneracyjnej (np. na etapie jej projektowania) lub sprawdzenia zgodności właściwości z wymaganiami prawa, w tym kodeksu sieci NC RfG.

Mimo stosunkowo niewielkiego wpływu silnika spalinowego na przebiegi w stanach nieustalonych należy, jednakże mieć na uwadze fakt, że oddziaływanie to istnieje i mogą się zdarzyć takie sytuacje (zwłaszcza gdy układ regulacji silnika spalinowego nie zostanie odpowiednio dobrany na etapie jego projektowania), w których to silnik spalinowy wraz z układem sterowania będzie wpływał na przebiegi generatora synchronicznego, np. powodując jego awaryjne wyłączenie. Sytuacja taka może mieć miejsce, gdy stan nieustalony generatora (np. związany z przemijającym zwarciem w SEE) wywoła niegasnące wolno zmienne oscylacje w układzie regulacji mieszanki paliwowo-powietrznej lub w układzie odbioru ciepła (co ma miejsce przy źle dobranych układach regulacji) a w konsekwencji dojdzie do wyłączenia jednostki na skutek przekroczenia wartości jednej z kontrolowanych zmiennych np. temperatury cylindra. Oczywiście takie wyłączenie nastąpić może z opóźnieniem, co również należy wziąć pod uwagę.

W związku z tym decyzja o odwzorowaniu silnika spalinowego lub pominięciu jego wpływu na przebiegi w stanach nieustalonych jest ważną kwestią zwłaszcza przy certyfikowaniu jednostek z silnikami spalinowymi dużych mocy (w takim przypadku analizy wpływu jednostki na SEE w stanach nieustalonych prowadzone są głównie w oparciu o badania symulacyjne).

Literatura

1. 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. 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 02.01.2019 r.
3. Abunku M., Melis W. J. C.: Modelling of a CHP system with electrical and thermal storage, 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/UPEC.2015.7339926
4. Houwing M., Negenborn R. R., De Schutter B.: Demand Response with Micro-CHP Systems, Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 200-213, Jan. 2011. doi: 10.1109/JPROC.2010.2053831
5. Majić L., Krželj I., Delimar M.: Optimal scheduling of a CHP system with energy storage, 2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, 2013, pp. 1253-1257
6. Morandin M., Bolognani S., Faggion A.: Active Torque Damping for an ICE-Based Domestic CHP System with an SPM Machine Drive, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 4, pp. 3137-3146, July-Aug. 2015. doi: 10.1109/TIA.2015.2399617
7. Nocoń A., Paszek S., Niedworok A., Orzech Ł.: Analiza pracy kogeneracyjnego zespołu wytwórczego małej mocy przy zwarcia. Aktualne problemy eksploatacji i modelowania systemów zasilania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2024 materiały konferencji SPETO 2024
8. Nocoń A., Figiel A., Paszek S.: Wykorzystanie modeli matematycznych w procesie certyfikacji jednostek kogeneracyjnych, w.: Wybrane problemy sterowania, napędu, oraz układów zasilania, Praca zbiorowa pod redakcją Dariusza Grabowskiego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2024 s. 50-67 materiały konferencji SPETO 2024
9. Nocoń A.: Elektromechaniczne stany nieustalone źródeł rozproszonych pracujących w systemie elektroenergetycznym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2019
10. Dokumentacja techniczna gazowych jednostek kogeneracyjnych firmy CH4 Moto Śląsk (dane przekazane przez producenta)
11. Anderson P.M., Fouad A.A.: Power system control and stability, John Wiley & Sons, Inc., 2003
12. Chee-Mun Ong: Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink. Prentice Hall Ptr, New Jersey 1998
13. Krause P. C.: Analysis of Electric Machinery. McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.
14. Kundur P.: Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., 1994
15. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Wykorzystanie metody elementów skończonych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, monografia, Z. 7, Gliwice, 1998
16. Dokumentacja techniczna programu Matlab – Simulink
17. Lubośny Z.: Warunek zwarciaowy $S'' k/S_n \geq 20$ ograniczeniem rozwoju OZE, Automatyka – Elektryka – Zakłócenia, nr 1/2014, s. 86-90
18. Wiebe I.: Progress in engine cycle analysis: Combustion rate and cycle processes. Mashgiz, Ural-Siberia Branch, 1962
19. Postrzednik S., Żmudka Z.: Termodynamiczne oraz ekologiczne uwarunkowania eksploatacji tłokowych silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007



20. McBride B. J., Gordon S., Reno M. A.: Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species. NASA Technical Memorandum 4513 (1993)
21. Annand W. J. D.: Heat transfer in the cylinder of reciprocating internal combustion engines, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 177, 1963
22. Wiebe I.: Halbempirische Formel für die Verbrennung-Geschwindigkeit. Verlag der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, 1956
23. Przybyła G.: Studium stosowania biopaliw gazowych do zasilania silników spalinowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2015
24. Heywood J. B.: Internal Combustion Engines Fundamentals. McGrawHill series in mechanical engineering, 1988
25. Szargut J.: Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2011.
26. Dokumentacja techniczna generatorów synchronicznych firmy EvoTec (dane przekazane przez producenta)

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.6>

Diagnostyka przyczyn zerwania bezpieczników mechanicznych - wałków skrętnych w kombajnach ścianowych

Jacek Korski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: Kombajny ścianowe są maszynami o znacznych mocach napędów elektrycznych i są eksploatowane w trudnych warunkach kopalń podziemnych. W związku z możliwością wystąpienia gwałtownych przeciążeń tych napędów są one zabezpieczane celem ograniczania niepożądanych skutków przeciążeń. W wysoce zautomatyzowanych współczesnych kombajnach ścianowych obok zabezpieczeń elektronicznych stosuje się także zabezpieczenia mechaniczne w postaci wałków skrętnych. Zniszczenie wałka skrętnego powinno być traktowane jako prawidłowe zadziałanie zabezpieczenia wrażliwych i cennych elementów maszyny, ale bardzo często traktowane są przez użytkowników kombajnów jako awarie spowodowane wadami tych zabezpieczeń. Rozdział przedstawia szybkie możliwości oceny przyczyn zerwania wałka skrętnego i propozycję jednolitego postępowania dla ustalenia przyczyn zerwania.

Słowa kluczowe: zabezpieczenia maszyn, kombajny ścianowe, wałki skrętne, przeciążenie maszyn

Diagnostics of the causes of breaking mechanical fuses – torsion shafts in longwall shearers

Abstract: Longwall shearers are machines with significant electric drive power and are operated in the difficult conditions of coal underground mines. Due to the possibility of sudden overloads of these drives, they are protected to limit the undesirable effects of overloads. In highly automated modern longwall shearers, in addition to electronic protection, mechanical protection in the form of torsion shafts is also used. Destruction of the torsion shaft should be treated as proper operation of the protection of sensitive and valuable machine elements, but is very often treated by combine users as failures caused by defects in these protections. The chapter presents quick possibilities for assessing the causes of a torsion shaft break and a proposal for a uniform procedure to determine the causes of the break.

Keywords: machine protection, shearers, torsionshafts, overloading of machines

1. Wprowadzenie

Kombajny ścianowe to maszyny przeznaczone do urabiania węgla kamiennego w jednym z systemów podziemnej eksploatacji węgla kamiennego – systemie ścianowym [1, 2, 3, 4, 5]. Kombajn ścianowy to maszyna, która służy zasadniczo do urabiania węgla (oddzielania go od calizny węglowej) i ładowania urobionego węgla na ścianowy przenośnik zgrzeblowy. Dodatkową funkcją maszyny urabiającej jest przygotowanie (wycięcie) przestrzeni dla pozostałych urządzeń ściany dla ich właściwej pracy. Dlatego zachodzi niekiedy potrzeba przycięcia dodatkowo skał w otoczeniu pokładu węgla (w spągu lub w stropie) lub pozostawienie węgla w spągu lub stropie ściany. Ponadto ścianowy kombajn węglowy, choć przeznaczony jest generalnie do urabiania węgla, stosowany jest, w niektórych krajach w pokładach zaburzonych geologicznie (uskoki, fleksury, wycienienia, wymycia), gdzie występuje możliwość wystąpienia skał o twardości przekraczających możliwości ich

urabiania tą maszyną. Występują także sytuacje, w których dochodzi do konfliktu pomiędzy pracującymi elementami kombajnu (zwłaszcza wirującego organu urabiającego) a innymi urządzeniami zmechanizowanego kombajnowego kompleksu ścianowego lub elementami stalowej obudowy chodnikowej na skrzyżowaniu ściany z chodnikiem przyścianowym. Te ostatnie przyczyny są powodowane najczęściej błędami obsługi kombajnu czy szerzej obsługi ściany.

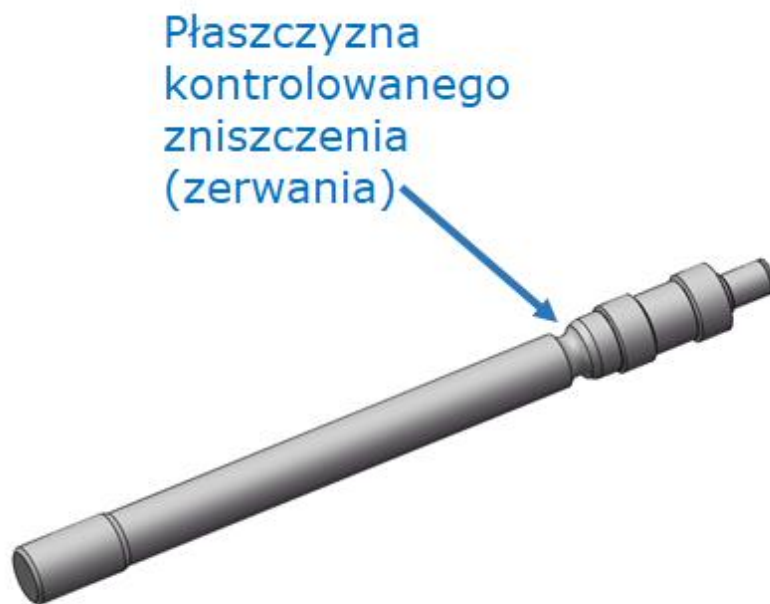
Rosnące wymagania dotyczące ścianowych maszyn urabiających, w tym kombajnów węglowych, powodują, że rosną moce napędów tych maszyn. Pojawiają się także, przy dużych prędkościach pracy kombajnów (posuwu) rosnące obciążenia dynamiczne elementów mechanicznych kombajnu ścianowego, których awarie są jednym z powodów strat produktywności [6, 7, 8, 9, 10].

W trakcie rozwoju ścianowych kombajnów węglowych wprowadzono zabezpieczenia mechaniczne i elektryczne wrażliwych układów kombajnu, celem ich ochrony przed zniszczeniem lub zdeterminowania miejsca wystąpienia zniszczenia z ułatwieniem dostępu i skróceniem czasu przywrócenia sprawności do pracy. Jednym z takich zabezpieczeń są wałki skrętne stosowane dla ochrony przekładni napędu organów urabiających oraz bezciężnowych układów posuwu w kombajnach ścianowych. Od kilku lat w Polsce toczą się spory dotyczące ustalenia przyczyn i odpowiedzialności za mechaniczne zniszczenie zabezpieczenia mechanicznego – wałka skrętnego, także przed sądami powszechnymi. Celem rozdziału jest wskazanie narzędzi do wczesnego ustalania przyczyn zerwania wałka skrętnego i wyeliminowania sporów.

2. Cel stosowania bezpieczników mechanicznych w kombajnach ścianowych

Kombajny ścianowe są maszynami o znacznych mocach napędów elektrycznych i są eksploatowane w trudnych warunkach kopalń podziemnych. W związku z możliwością wystąpienia gwałtownych przeciążeń tych napędów są one zabezpieczane celem ograniczania niepożądanych skutków przeciążeń. Bezpiecznik to podstawowy element zabezpieczający urządzenie, jego fragment lub użytkownika przed niepożądanymi skutkami określonego czynnika zagrażającego. Należy on do grupy urządzeń zabezpieczających. W wysoce zautomatyzowanych współczesnych kombajnach ścianowych obok zabezpieczeń elektronicznych stosuje się także zabezpieczenia mechaniczne w postaci wałków skrętnych.

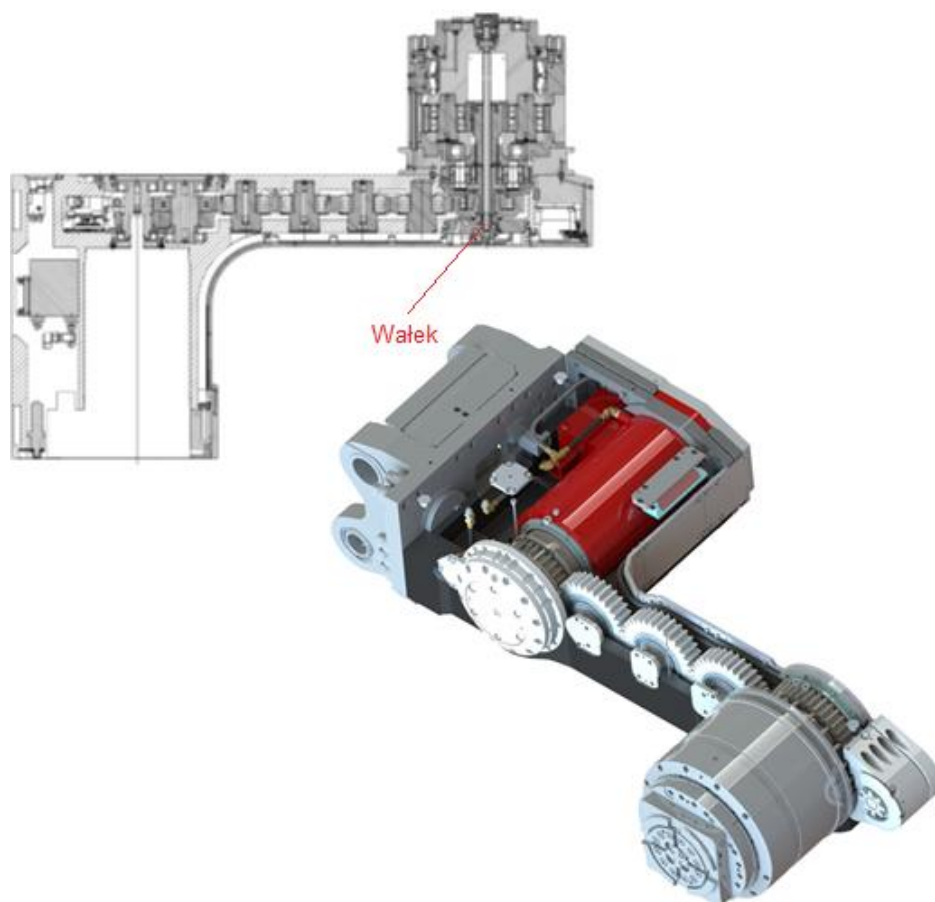
W przeszłości stosowano także podobne rozwiązanie w postaci specjalnych sworzni (kołków) ścinanych przy przeciążeniu. Wałek skrętny jako bezpiecznik jednokrotny o bezpośrednim działaniu mechanicznym – dynamicznym służy do zabezpieczenia ciągników lub cennych elementów ramion kombajnów ścianowych przed skutkami gwałtownych, dynamicznych przeciążeń wskutek np. uderzenia wirującym organem urabiającym o elementy obudowy zmechanizowanej, obudowy chodnikowej lub skały [7]. Na rysunkach 1, 2, 3 pokazano widoki wałka i sposób jego instalacji.



Rys. 1. Bezpiecznik mechaniczny – stosowany w kombajnach ścianowych

Wálki skrętne (przeciążeniowe) to elementy urządzeń mechanicznych, w tym np. kombajnów ścianowych, których podstawowym zadaniem jest zabezpieczenie urządzenia przed gwałtownym przeciążeniem i jego skutkami. Idea działania tego typu zabezpieczeń mechanicznych polega na wbudowaniu w mechanizmy urządzenia elementu o zadanej wytrzymałości, która jest dobrana tak, aby w przypadku przeciążenia, zniszczeniu uległ ten element, a nie inne cenniejsze i trudniejsze w wymianie elementy tego układu czy mechanizmu. Z założenia taki bezpiecznik mechaniczny powinien ulec zniszczeniu chroniąc pozostałe elementy. Musi więc mieć mniejszą wytrzymałość od tych chronionych elementów.

Podobną funkcję spełniają np. strefy kontrolowanego zgniotu w samochodach osobowych (chronią przedział pasażerski w wypadku zderzenia z przeszkodą czy innym samochodem) lub bezpieczniki topikowe w instalacjach elektrycznych – w obu przypadkach za cenę zniszczenia chronione są cenniejsze elementy. Wálki skrętne stosowane w kombajnach ścianowych są konstrukcyjnie najsłabszym elementem mechanizmu celem zabezpieczenia innych elementów przed uszkodzeniem lub zniszczeniem.



Rys. 2. Bezpiecznik mechaniczny – wałek skrętny w kombajnie ścianowym (przykład instalacji)

Dedykowany karb (podcięcie) wałka w normalnych warunkach wyznacza miejsce jego zerwania i ułatwia wymianę oraz skraca czas naprawy – wymiany.



Rys. 3. Wałki skrętne stosowane w kombajnach ścianowych

Zniszczenie bezpiecznika mechanicznego wskutek przeciążenia jest prawidłowym zjawiskiem, chroniącym mechanizmy kombajnu ścianowego przed zniszczeniem. Spowodowane jednak zniszczeniem wałka – bezpiecznika skrętnego straty czasu dostępnego są źródłem utraty korzyści (utrata - zmniejszenia produktywności ściany) i kosztów związanych z usuwaniem przyczyn postoju [11].

3. Potencjalne przyczyny zerwania wałka skrętnego w kombajnie ścianowym

Teoretycznie możliwe przyczyny zerwania wałka skrętnego w kombajnie ścianowym to:

- Niewłaściwe użytkowanie – prawidłowe zadziaływanie wałka.
- Niewłaściwa konstrukcja.
- Wady materiału.
- Niewłaściwe wykonanie.
- Zmęczenie materiału.

3.1. Niewłaściwe użytkowanie – prawidłowe zadziaływanie wałka skrętnego

Znane przyczyny zerwania wałków skrętnych (przeciążeniowych) to, w przypadku głowic kombajnowych (zawierających silnik elektryczny mechanicznie połączony wałkiem skrętnym z układem przekładni zębatych napędzających organ urabiający kombajnu) gwałtowne uderzenie wirującego organu o przeszkodę w postaci: elementów wyposażenia ściany (np. stropnice obudów zmechanizowanych), elementy obudowy chodnikowej przy dojeździe kombajnu do chodników przyścianowych lub próba urabiania kombajnem ścianowym skał o bardzo dużej wytrzymałości mechanicznej czy wręcz próba taranowania takich skał kombajnem.

3.2. Niewłaściwa konstrukcja

Wałek skrętny jest rozwiązaniem dedykowanym dla zabezpieczenia konkretnej maszyny i jest przedmiotem szczególnych wymagań konstrukcyjnych i szczególnej dokładności konstruowania [12]. Popołnione na tym etapie błędy mogą powodować dużo awarii i postojów związanych z ich usuwaniem. W praktyce prawdopodobieństwo występowania takich przyczyn jest znikome.

3.3. Wady materiału

Wystąpienie wad materiałowych w seryjnie produkowanych wałkach skrętnych jest możliwe, ale stosunkowo łatwe do wyeliminowania poprzez odpowiednio prowadzoną kontrolę jakości, a wcześniej właściwą technologię produkcji materiału z której wyprodukowany zostanie wałek.

3.4. Niewłaściwe wykonanie wałka

Wadliwe wykonanie jest elementem wad procesu wytwarzania wałka skrętnego, które powinno być stosunkowo łatwo wykrywane w procesie kontroli technicznej międzyoperacyjnej lub końcowej. Także oględziny przełomu zerwanego wałka pozwalają na stosunkowo szybką identyfikację zniszczenia wskutek wady wykonania lub wady materiałowej (rys. 4).

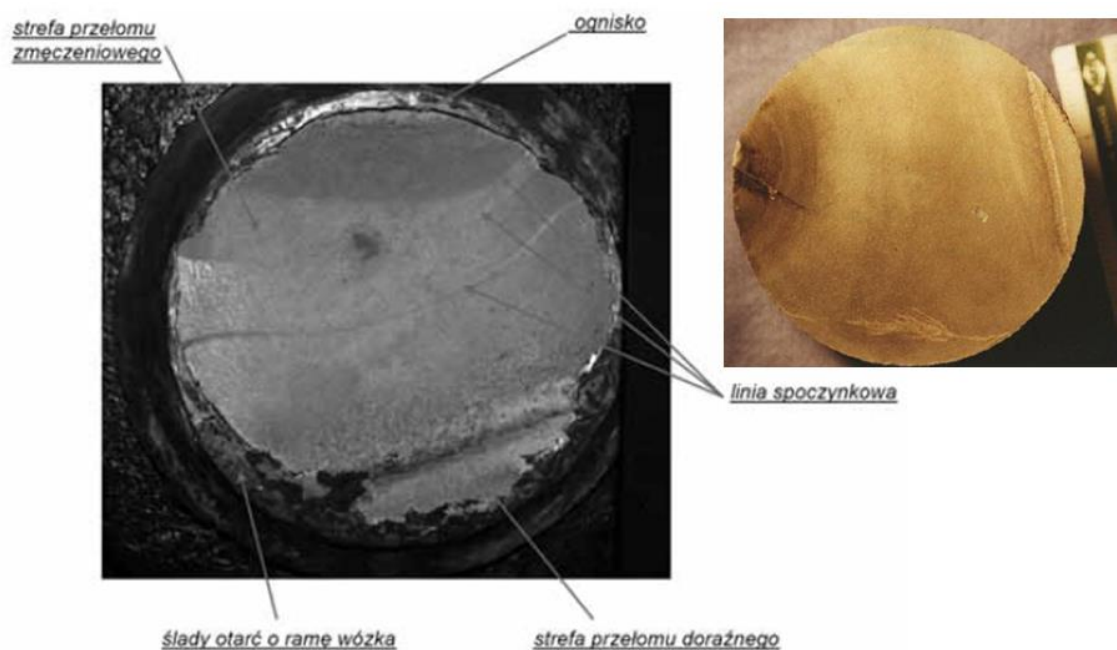
Należy zaznaczyć, że zerwanie wałka skrętnego w miejscu innym niż dedykowany karb (podcięcie) powinno być traktowane jako wada tego bezpiecznika wymagająca szczegółowego wyjaśnienia i uznania roszczeń reklamacyjnych.



Rys. 4. Przełom zerwanego wała skrętnego wykonanego wadliwie

3.5. Zerwanie wałka wskutek zmęczenia materiału

Zmęczenie materiału to zjawisko pęknięcia materiału pod wpływem cyklicznie zmieniających się naprężeń. Obciążenia zmęczeniowe – są obciążeniami zmiennymi w czasie, typowymi obciążeniami dla różnorodnych części i podzespołów maszyn. Odpowiadające im naprężenia nazywane są naprężeniami zmiennymi lub naprężeniami zmęczeniowymi [13]. Sposób i warunki eksploatacji kombajnu ścianowego powodują, że bardzo trudno jest stworzyć wzorcowy model tych obciążeń dynamicznych. Istotnie utrudnia to przeprowadzenie badań jednoznacznie określających trwałość zmęczeniową takich wałków skrętnych. Należy jednak wskazać, że zmęczenie materiału jako przyczyna zerwania wałka jest łatwa do identyfikacji wskutek charakterystycznego obrazu przełomu zniszczeniowego (rys. 5), ponieważ pęknięcie zmęczeniowe zostaje zapoczątkowane w miejscach defektów powierzchniowych lub koncentracji naprężeń (ogniska zmęczeniowe) i rozprzestrzenia się stopniowo w materiale.



Rys. 5. Przełom zmęczeniowy wałka skrętnego

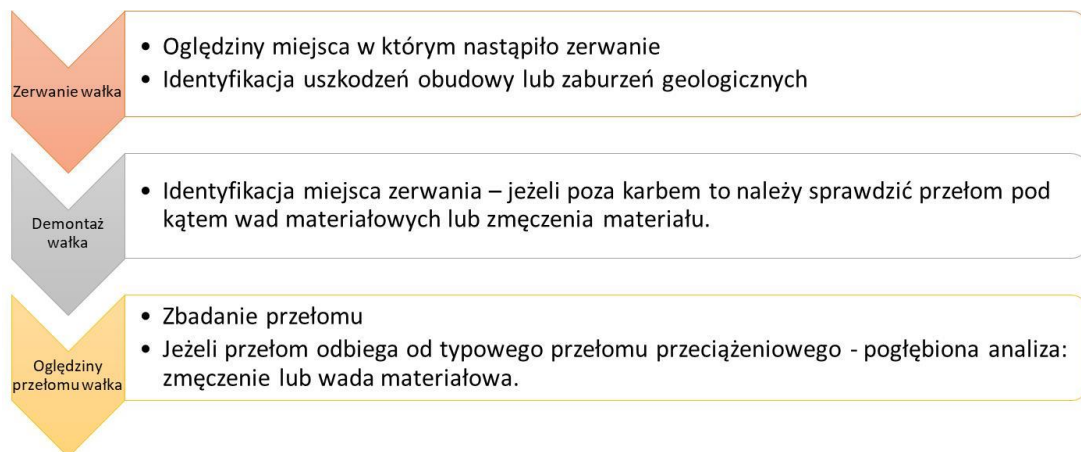
Charakterystyczny przełom zmęczeniowy umożliwia szybką identyfikację zmęczeniowego zerwania wałka w czasie jego demontażu i ewentualne roszczenia reklamacyjne.

4. Metodyka ustalania przyczyn zerwania wałka skrętnego w kombajnach ścianowych

Często podnoszona możliwość identyfikacji przyczyn zerwania wałka skrętnego przez analizę zapisów systemu diagnostyki kombajnu (komputera pokładowego) nie jest w pełni możliwa. Cyfrowy system monitorowania pracy kombajnu ścianowego nie zbiera danych w sposób ciągły (analogowy), tylko punktowo z powtarzalną częstotliwością. Zabezpieczenie przeciążeniowe w postaci wałka skrętnego reaguje szybciej niż można to zauważyć w systemie monitoringu, co jest jego zaletą. Cyfrowy (tzw. dyskretny) pobór danych ułatwia i wręcz umożliwia gromadzenie danych ze względu na możliwość ich gromadzenia i jest jednocześnie wystarczający do monitorowania pracy kombajnu. Różnice pomiędzy zabezpieczeniami mechanicznymi i elektronicznymi wynikają z potrzeb konstrukcyjnych i oczekiwanej szybkości zadziałania (im szybciej zabezpieczenie zadziała tym lepiej) - na gwałtowne przeciążenie wałek skrętny zareaguje natychmiast ulegając zerwaniu i chroniąc natychmiast pozostałe, chronione podzespoły. W przypadku zabezpieczenia elektronicznego czas reakcji na przeciążenie mechaniczne oznacza, że najpierw to przeciążenie musi zostać wykryte jakimś czujnikiem, a dopiero później uruchomione zostaje zadziałanie zabezpieczenia. Oznacza to, że destrukcyjny czas działania przeciążenia na elementy np. kombajnu będzie dłuższy i może spowodować uszkodzenia lub obniżenie trwałości tych elementów, które normalnie zabezpiecza wałek skrętny.

Dlatego wszyscy dostawcy (Komat'su/Joy Global/Eickhoff Polska i FAMUR/Greenevia S.A) kombajnów ścianowych (30 kwietnia 2024 r. było to ok. 65 maszyn w polskich kopalniach) stosują wałki skrętne jako standardowe zabezpieczenia swoich kombajnów przed przeciążeniem mechanicznym. Jest to rozwiązanie stosunkowo proste i o szybkim czasie reakcji.

Celem ustalenia przyczyny zerwania wałka skrętnego zaproponowano poniżej (rys. 6) metodykę postępowania pozwalającą na wyeliminowanie sporów pomiędzy użytkownikiem kombajnu a jego dostawcą.



Rys. 6. Metodyka badania przyczyny zniszczenia wałka skrętnego

Należy wskazać, że w technice zabezpieczeń stosuje się generalnie dla nagłych przekroczeń krytycznych czynników zabezpieczenia działające szybko i pewnie (zabezpieczenia siłowe typu kołki ścinane, wałki skrętne czy inne dedykowane najsłabsze elementy, także mechaniczne zawory bezpieczeństwa czy np. topikowe bezpieczniki elektryczne czy na instalacjach z gorącymi cieczami) – tego typu zabezpieczenia reagują bezpośrednio na czynnik przeciążający. Elektroniczne zabezpieczenia nadają się bardziej w sytuacjach, gdy przeciążenia narastają wolniej - nie mają gwałtownego charakteru (za wyjątkiem wprost przekroczeń czy przeciążeń elektrycznych jak wspomniane elektryczne bezpieczniki topikowe).

4. Podsumowanie

Określenie metodyki ustalania przyczyn zerwania wałka skrętnego w układzie urabiania lub posuwu kombajnu ścianowego, przy poprawnym podejściu do wyciągania wniosków i eliminacji zjawisk niepożądanych powinno ułatwić wykluczenie lub ograniczenie tej grupy awarii.

Literatura

- Opolski T., Korecki Z.: Ścianowe kombajny węglowe. Budowa, działanie i zastosowanie. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1977
- Warachim W., Maciejczyk J.: Ścianowe kombajny węglowe. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1993
- Jaszczuk M.: Ścianowe systemy mechanizacyjne / Marek Jaszczuk. - Katowice: Śląsk Wydawnictwo Naukowe, 2007
- Warachim W., Maciejczyk J.: Ścianowe kombajny węglowe. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1985
- Peng S.S.: Longwall Mining 3rd Edition. CRC Press/Balkema 2020

6. Sikora W., Spalek J., Mikuła S.: Badania i analiza wpływu wysoko wydajnych kompleksów na technikę eksploatacji: dobór materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, technologii, obróbki cieplnej i wykańczającej na elementy maszyn o dużej wydajności. Politechnika Śląska IMG, Gliwice 1996
7. Praca zbiorowa [Sikora W. - red.]: Obciążenia dynamiczne w układach ciągnięcia wysoko wydajnych kombajnów ścianowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005
8. Jaszczuk M., Cheluszka P., Mann R.: Komputerowe wspomaganie doboru cech konstrukcyjnych kombajnu ścianowego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2016
9. Korski J.: Capacity losses factors of fully mechanized longwall complexes. Mining Machines No. 3/2020 (163)
10. Korski J.: Efektywny czas pracy kompleksu ścianowego i przyczyny jego zmniejszania (Longwall complex efficient time and reasons of its decreasing). Inżynieria Mineralna 2/2019
11. Słowiński B.: Inżynieria eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011
12. Niezgodziński M. E., Niezgodziński T: Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004, ISBN 83-01-12484-9
13. Kowalewski Z. L.: Zmęczenie materiałów – podstawy, kierunki badań, ocena stanu uszkodzenia. Siedemnaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2011

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.7>

Badania wybranych ogniw wtórnych nowej generacji

Bartosz Polnik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Zdzisław Budzyński – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono zasady działania, budowę, skład chemiczny oraz parametry ogniw nowej generacji. Przeprowadzono test zwarcia, nieprawidłowego ładowania i rozładowania na wybranych ogniwach LFP o dużych pojemnościach przewidzianych do stosowania w napędach pojazdów wymagających posiadania dużych zasobników energii. Pobrano do analizy wydzielane gazy podczas próby przeładowania celem określenia ich procentowego składu. Badania prowadzono w akredytowanych laboratoriach badawczych. Poruszono zagadnienie bezpieczeństwa oraz techniczne i organizacyjne aspekty związane z ich zastosowaniem w wielu dziedzinach gospodarki. Szczególną uwagę zwrócono na ich wady oraz zalety.

Słowa kluczowe: ogniwo wtórne, rodzaje ogniw litowych, parametry ogniw litowo-jonowych, badania ogniw litowych LiFePO₄

Testing the selected new generation secondary cells

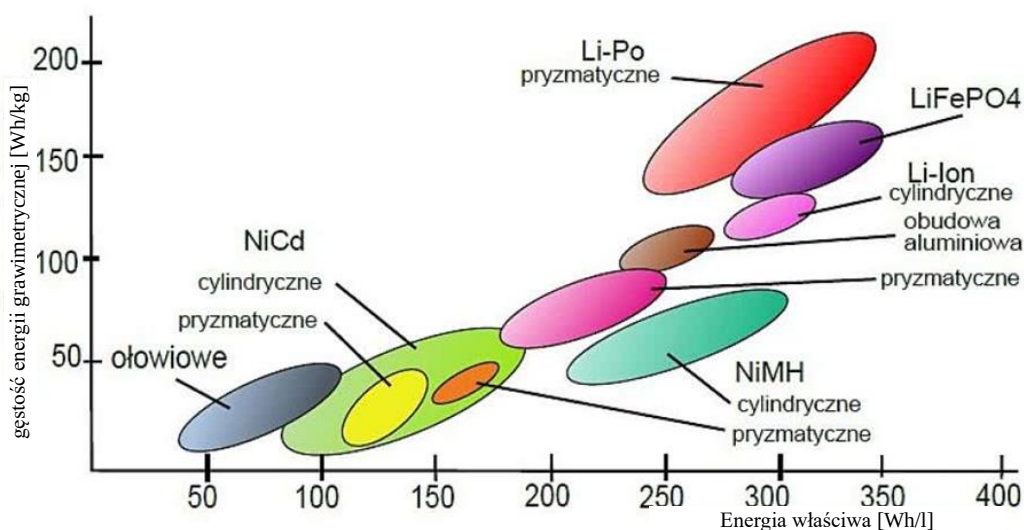
Abstract: The chapter presents the principles of operation, design, chemical composition and parameters of new generation cells. A short-circuit, incorrect charging and discharging were tested on the selected LFP cells with high capacities intended for use in the vehicle drives requiring large energy storage tanks. The samples of gases released during the overcharging test were taken for analysis to determine their percentage composition. The tests were conducted in the accredited testing laboratories. Safety as well as technical and organizational aspects related to their use in many areas of the industry are discussed. Special attention is paid to their advantages and disadvantages.

Keywords: secondary cell, lithium cell types, lithium-ion cell parameters, LiFePO₄ lithium cell test

1. Wprowadzenie

Ogniwo elektryczne jest elektrochemicznym zasobnikiem energii składającym się z obudowy, wewnątrz której umieszczone są dwie elektrody, katoda i anoda zanurzone w elektrolicie. Elektrolit jest związkiem chemicznym, kwasu, zasad lub soli i może występować w postaci roztworu lub żelu [7]. Elektrody są zwykle związkami metali lub grafitu. Ogniwa dzielimy na pierwotne i wtórne. Pierwotne z przepływem energii z ogniwa do odbiornika, które po wyczerpaniu energii należy utylizować. Ogniwa wtórne charakteryzujące się dwukierunkowym przepływem energii, dzięki tej zalecie są wielokrotnego użytku.

Przełomem w dziedzinie ogniw wtórnych było zastosowanie litu, najlżejszego po wodorze i helu w układzie okresowym pierwiastków. W ogniwach litowych katodę stanowią związki litu z metalami zaliczanymi do lekkich jak kobalt, mangan, nikiel i glin.



Rys. 1. Parametry wybranych ogniw [8]

Anoda w tych ogniwach wykonana jest z porowatego grafitu, materiału bardzo lekkiego a elektrolit stanowią rozpuszczone sole litu. Dla przykładu ciężar właściwy litu wynosi $0,534 \text{ g/cm}^3$ a dla ołowiu $11,4 \text{ g/cm}^3$. Te wszystkie czynniki spowodowały uzyskanie ponad 5-cio krotnego wzrostu gęstości energii w stosunku do klasycznych ogniw ołowiowych (rys. 1).

2. Ogniwa litowe nowej generacji

Obecnie na rynku istnieją ogniwa litowe różniące się budową, składem chemicznym i napięciem znamionowym. Ze względu na rodzaj elektrolitu ogniwa dzielimy na:

- litowo-jonowe, w których elektrolit stanowią rozpuszczone sole litu: LiBF_4 lub LiPF_6 [9],
- litowo-polimerowe, w których zamiast elektrolitu znajduje się przewodzący polimer: Nafion, Aciplex lub Flemion.

Nazwy ogniw pochodzą od składu chemicznego materiału katody np.:

- litowo-tytanowa (LTO), katoda jest tlenkiem tytanu litu $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$,
- litowo-żelazowo-fosforanowa (LFP), katoda jest fosforanem żelaza litu LiFePO_4 ,
- litowo-manganowa (LMO), katoda jest tlenkiem manganu litu LiMn_2O_4 ,
- litowo-kobaltowa (LCO), katoda jest w postaci tlenku kobaltu litu LiCoO_2 ,
- litowo-manganowo-kobaltowa (NMC), katoda jest z niklu, manganu, kobaltu i litu LiNixMnyCoz ,
- litowo-niklowo-kobaltowo-aluminiowa (NCA), katoda jest z litu, niklu, kobaltu i aluminium LiNixCoyAlz .

We wszystkich ogniwach litowych elektroda anodowa jest grafitowa (z porowatego węgla) za wyjątkiem ogniw litowo-tytanowych (LTO), w których anoda jest z tytanianu litu. Wszystkie ogniwa z grupy litowo-jonowych posiadają dodatkowo separator oddzielający katodę od anody. Podstawowe parametry typowych ogniw litowo-jonowych przedstawiono w tabeli 1. Wartości w nawiasach wykonuje się na specjalne zamówienie. Tabelę wykonano w oparciu o parametry zamieszczone w publikacji [10].

Parametry techniczne ogniw litowo-jonowych

Tabela 1.

Typ ogniwa	Napięcie U_N [V]	Zakres pracy [V]	Prąd ładowania	Prąd rozład.	Gęstość energii [Wh/kg]	Ilość cykli ładowania	Żywotność [lata]
LTO	2,4	1,8-2,85	1C (5C)	do 10C	50-80	10 000	20
LFP	3,2-3,3	2,5-3,65	1C	1C (25C)	90-120	3 000	8-12
LMO	3,7-3,8	3,0-4,2	0,7-1C (3C)	1C (10C)	100-150	700	10-12
NMC	3,6-3,7	3,0-4,2	0,7-1C	1C (2C)	150-220	2 000	7-10
NCA	3,6	3,0-4,2	0,7C	1C	230-300	500	10-20
LCO	3,6-3,8	3,0-4,2	0,7-1C	1C	100-180	1 000	5-8

3. Badanie ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych (LFP)

Badaniami objęto ogniwa LiFePo_4 (LFP) o pojemności 100 Ah (rys. 2) i będącą tego ogniwa częścią składową w postaci celi o pojemności 20 Ah (rys. 3). Program badań obejmował próby głębokiego rozładowania, zwarcia oraz przeładowania. Badania prowadzono w akredytowanym Laboratorium Badań Stosowanych ITG KOMAG w Gliwicach w 2016 r. [6].



Rys. 2. Ogniwo LFP 3,2 V, 100 Ah



Rys. 3. Pojedyncza cela 20 Ah

Parametry techniczne ogniwa:

- typ HYLFP 46182295,
- masa 3,5 kg,
- wysokość (d x s x h) 182x46x283 mm,
- napięcie znamionowe 3,2 V,
- napięcie minimalne 2,0 V,
- napięcie maksymalne 3,65 V,
- pojemność 100 Ah,
- max prąd rozładowania 200 A,
- znamionowy prąd rozładowania 30 A,
- impedancja 0,002 W.

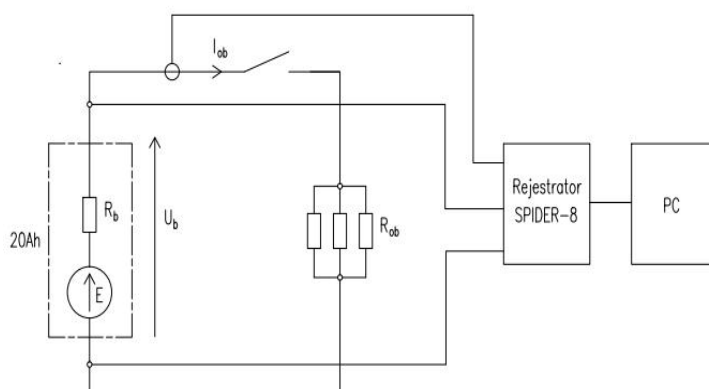
3.1. Badanie ogniw o pojemności 20 Ah na głębokie rozładowanie

Zakres badań ogniw litowych LiFePO₄ o parametrach 3,2 V i pojemności 20 Ah, na głębokie rozładowanie obejmował pomiar napięcia ogniwa, natężenia prądu oraz temperaturę na trzech miejscach obudowy (rys. 6) zgodnie ze schematem pomiarowym (rys. 5).

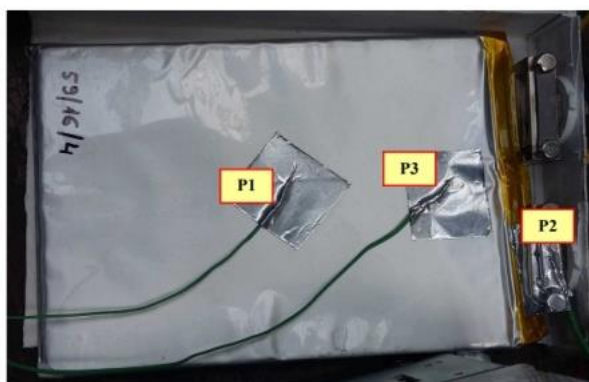
Przeprowadzone na stanowisku (rys. 4) próby głębokiego rozładowania prądem 1C nie spowodowały pożaru ani deformacji ogniwa. W trakcie badań rejestrowano prąd i napięcie oraz temperaturę na powierzchni w trzech miejscach (rys. 6) oraz temperaturę otoczenia. Najwyższa temperatura w środkowej części celki osiągnęła wartość 39,5°C to jest przyrost temperatury o około 11°C (rys. 7). Po zakończonej próbie całkowitego rozładowania i odłączeniu rezystorów obciążenia, na zaciskach ogniwa pojawiło się napięcie 1,23 V. Po upływie kolejnych 10 minut od czasu zakończenia próby napięcie na ogniwie osiągnęło wartość 2,14 V (tabela 2). Badania wykonane na kolejnych ogniwach zarejestrowały maksymalne napięcie na poziomie 2,72 V.



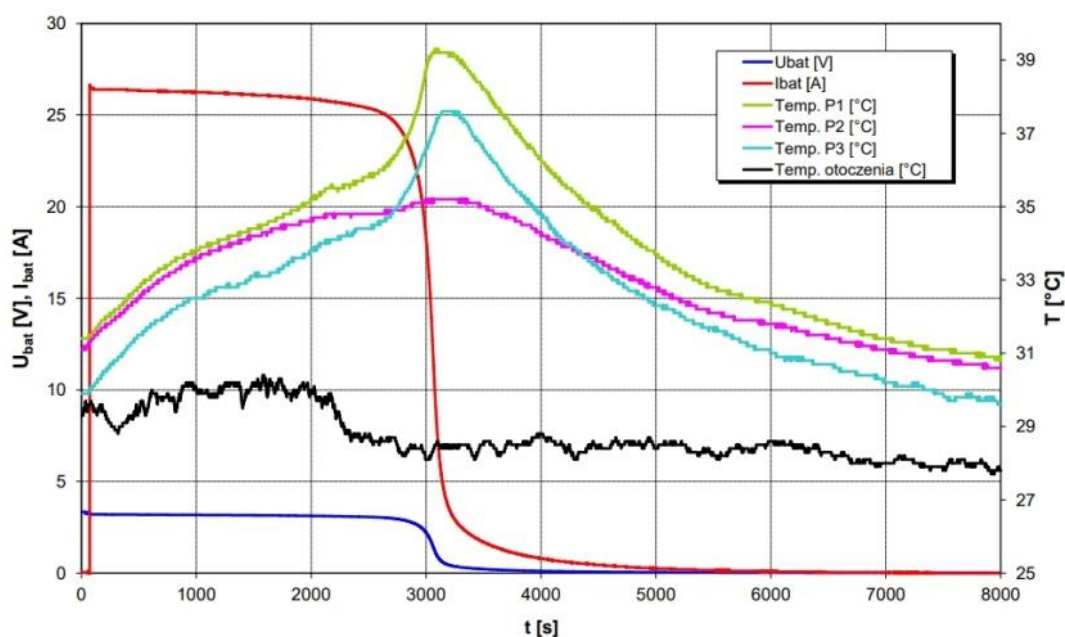
Rys. 4. Stanowisko do badań na głębokie rozładowanie



Rys. 5. Schemat pomiarowy badania napięć w czasie głębokiego rozładowania



Rys. 6. Rozmieszczenie czujników temperatury



Rys. 7. Wyniki pomiarów napięcia, prądu i temperatur

Wyniki pomiaru napięć po zakończeniu badań

Tabela 2.

<i>Lp.</i>	<i>Czas pomiaru [hh:mm]</i>	<i>U_{bat} [V]</i>
1	14:47	1,23
2	14:48	1,44
3	14:49	1,61
4	14:50	1,74
5	14:51	1,84
6	14:52	1,92
7	14:53	1,98
8	14:54	2,03
9	14:55	2,08
10	14:56	2,12
11	14:57	2,14

Przeprowadzone na stanowisku badawczym (rys. 4) próby głębokiego rozładowania prądem 1C nie spowodowały pożaru ani deformacji ogniwa. Nie badano stanu pojemności ogniwa po badaniach.

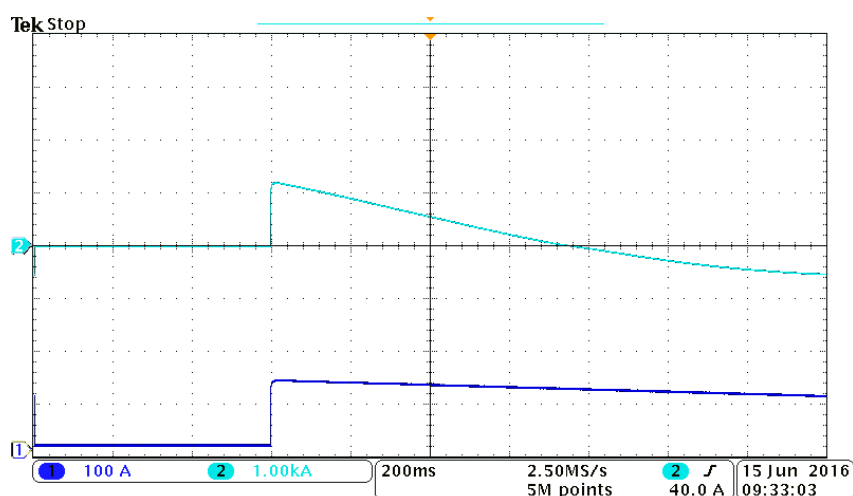
3.2. Badanie ogniów LFP o pojemności 20 Ah na zwarcia zacisków

Zakres badań ogniów litowych LiFePO₄ o parametrach 3,2 V i pojemności 20 Ah, na zwarcie na zaciskach, obejmował pomiar napięcia, płynącego prądu zwarcia oraz temperaturę. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym (rys. 8). Ze względów bezpieczeństwa badanie przeprowadzono w osłonie przeciwwybuchowej. Zwarcie zacisków ogniwa realizowano przez zwarcie styków stycznika.



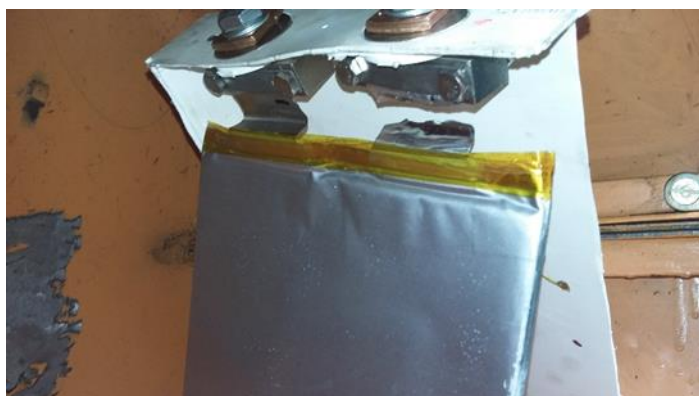
Rys. 8. Stanowisko do badań na zwarcie na zaciskach ogniwa

Pomiary prądu zwarcia przeprowadzono za pomocą cewek Rogowskiego typu CWT15LFB o zakresie 3 kA oraz CWT150LFB o zakresie 30 kA. Maksymalna wartość prądu zwarcia zmierzona cewką CWT15LFB wynosiła 1190 A (rys. 9), a cewką CWT150LFB wyniosła 1229 A.



Rys. 9. Przebiegi prądu zwarcia

Płynący prąd zwarcia spowodował przepalenie paska łączącego właściwe ogniwo z zaciskiem zewnętrznym, spełniającym rolę wewnętrznego bezpiecznika (rys. 10.) Nie stwierdzono deformacji ani uszkodzeń mechanicznych we właściwej części ogniwa.



Rys. 10. Ogniwo po próbie zwarcia

3.3. Badanie ogniw LFP o pojemności 20 Ah na przeładowanie

Badania w przeprowadzono ze względów bezpieczeństwa w komorze przeciwwybuchowej, wykonując próby przeładowania prądem 1C. Program badań obejmował rejestrację napięcia, prądu i temperaturę ogniwa (rys. 11, 14). W czasie próby doszło do rozszczelnienia się obudowy ogniwa i wydzielanie się gazów w postaci dymów (rys. 13). Próbę ponowiono i rozszerzono o badanie wydzielanych gazów.



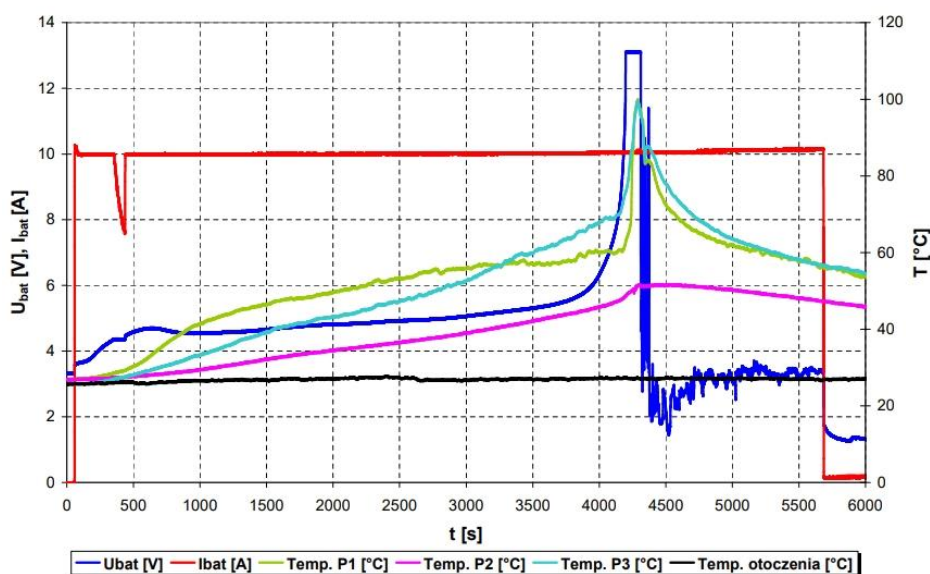
Rys. 11. Ogniwo przed próbą na przeładowanie



Rys. 12. Ogniwo w czasie próby na przeładowanie



Rys. 13. Ogniuwo po próbie na przeładowanie



Rys. 14. Wyniki pomiarów napięcia, prądu i temperatur

W tym celu zabudowano szczelny zawór (rys. 12) do poboru gazów powstałych w czasie próby przeładowania, celem ich identyfikacji metodą chromatograficzną. Do tego celu zastosowano 2 chromatografy:

- SRI 8610C z dwoma niezależnymi torami analitycznymi jednym do oznaczania składników węglowodorowych i drugim do oznaczania niektórych składników nieorganicznych (O_2 , N_2 , CO).
- INCO 505 do oznaczania niektórych składników nieorganicznych (H_2 , CO_2).

W zamieszczonych wynikach pomiarów (tabela 3) mogą być nieoznaczone inne śladowe składniki gazowe (argon, para wodna, tlenki azotu, eterów chlorowców i inne).

Wyniki składu gazów pobranych w czasie badań

Tabela 3.

Nazwa składnika	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]	Skład [% obj.]
Wodór	18,0	17,4	10,0	9,2	9,1
Tlen	7,0	7,3	7,9	8,2	8,3
Azot	38,3	39,8	58,4	62,2	63,1
Tlenek węgla	5,3	5,1	3,5	3,0	2,7
Dwutlenek węgla	12,3	12,0	5,9	5,3	5,3
Metan	5,4	5,5	1,3	1,1	1,0
Węglowodory wyższe:					
Etan	1,50	1,48	0,32	0,25	0,22
Etylen	8,0	7,9	5,8	4,8	4,9
propan	0,13	0,17	0,04	0,03	0,03
propylen	0,02	0,1	0,04	0,03	0,04
butany	0,11	0,10	0,16	0,13	0,11
C ₅₊	0,05	0,06	0,02	0,01	0,02
Suma	96,1	96,9	93,4	94,3	94,8

4. Wnioski po badaniach ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych (LFP) o pojemności 20 Ah

Badaniami objęto ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe LFP o pojemności 20 Ah, na przeładowania, zwarcia na zaciskach ogniw i głębokie rozładowanie.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że w ogniwach LFP, które poddano głębokiemu rozładowaniu następuje wzrost temperatury o około 9-11°C zmierzoną w dwóch miejscach obudowy i na zaciskach, co nie stanowi zagrożenia pożarowego. Głębokie rozładowanie do 0 V powoduje drastyczną utratę pojemności.

Ogniwa wyposażone w wewnętrzne bezpieczniki w postaci pasków topikowych, które zabezpieczają ogniwo przed zewnętrznymi zwarciami nie spowodowały wzrostu temperatury ani pożaru. Nie badano zwarć wywołanych mechanicznymi uszkodzeniami ogniwa, jak zgniecenie, przełamanie lub przedziurawienie, które mogą powodować znaczne zwiększenie temperatury i niekontrolowaną reakcję chemiczną elektrolitu, również pożar. Takie zdarzenia mogą wystąpić w katastrofach drogowych pojazdów elektrycznych zasilanych z baterii litowych. Nie badano zachowania się ogniwa w przypadku rażeniami płomieniami zewnętrznymi.

W czasie przeładowania ogniwa LFP o pojemności 20 Ah po rozszczelnieniu się obudowy wydzielają się gazy w tym gazy palne, jak wodór, metan, etan, etylen, propan, propylen i butan w znacznych ilościach. W początkowej fazie osiągają wartość 33,16% składu wszystkich gazów a w końcowej fazie 15,3%. W trakcie przeładowania ogniwo ulega deformacji, co może powodować zwarcie wewnętrzne i powstanie iskry. Tak znaczna ilość gazów palnych w połączeniu z źródłem iskry może być powodem pożaru. Brak wydzielania się tlenu nie spowoduje pożaru przed rozszczelnieniem się obudowy ogniwa.

Literatura

1. Budzyński Z.: Techniczne aspekty związane z produkcją na wielką skalę samochodów elektrycznych. „Napędy i Sterowanie” 4/2017
2. Budzyński Z., Polnik B.: Badania laboratoryjne ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych w aspekcie możliwości ich stosowania w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. „Maszyny Górnicze” 4/2016
3. Budzyński Z., Kaczmarczyk K., Pieczora E.: Akumulatory nowej generacji w górniczych systemach transportowych na przykładzie ciągnika PCA-1. „Napędy i Sterowanie” 2/2012
4. Budzyński Z., Drwięga A., Kaczmarczyk K., Pieczora E.: Innowacyjne rozwiązania górniczych urządzeń transportowych z napędem akumulatorowym. „Maszyny Górnicze” 1/2012
5. Budzyński Z., Polnik B.: Badania laboratoryjne ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych w aspekcie możliwości ich stosowania w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. „Maszyny Górnicze” 4/2016
6. Badanie ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych typu HYLFP 46182295, 100 Ah. „Sprawozdanie nr 94/BT/2016” KOMAG Gliwice
7. Tomczyk P.: Elektrochemiczne zasobniki energii. AGH Kraków 28 września 2013
8. Górecki P.: Akumulatory i nie tylko... 10.03.2015 http://ep.com.pl/artykuly/10300-Akumulatory_i_nietylko.html
9. Metrohm. Analizy chemiczne do produkcji akumulatorów litowo-jonowych https://www.metrohm.com/pl_pl/aktualnosci/nawosci/2022/chemical-analyses-for-the-production-of-lithium-ion-batteries.html 28.11.21024
10. Serafinowicz A.: Ogniwa litowo-jonowe, jakie są baterie w autach elektrycznych? Warto znać różnice. 19.02.2023 <https://www.motocaina.pl/artykul/ogniwa-litowo-jonowe-jakie-sa-455716.html>

<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.8>

Magazynowanie energii w szybach kopalnianych – grawitacyjny magazyn z ciągnem łańcuchowym

Jacek Korski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Zbigniew Rak – Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami AGH Kraków

Streszczenie: Magazynowanie energii i mocy stało się istotnym wyzwaniem z chwilą rozpowszechnienia wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych. Jednym z rozważanych sposobów magazynowania jest wykorzystanie energii potencjalnej, w tym wykorzystanie głębokich szybów kopalń kończących podstawową działalność operacyjną związaną z pozyskiwaniem surowców. Rozważane dotychczas koncepcje, choć teoretycznie wykonalne nie znalazły praktycznego zastosowania ze względu na praktyczne ograniczenia i znikomą ich użyteczność. W rozdziale przedstawiono nową ideę grawitacyjnego magazynu energii w szybie kopalnianym.

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, grawitacyjny magazyn energii, szyby kopalniane, łańcuchy przemysłowe, ciągną robocze

Energy storage in mine shafts – gravity storage with chain link

Abstract: Energy and power storage has become a major challenge with the spread of renewable energy. One of the methods of storage considered is the use of potential energy, including the use of deep shafts of mines ending the basic operational activity related to the acquisition of raw materials. The concepts considered so far, although theoretically feasible, have not been applied in practice due to their practical limitations and negligible usefulness. The chapter presents a new idea of gravitational energy storage in a mine shaft.

Keywords: energy storage, gravitational energy storage, mine shafts, industrial chains, working cables

1. Wprowadzenie

Magazyny energii znane są i stosowane od kilkuset lat. Jednak dopiero w ostatnich latach wobec rosnącej świadomości ekologicznej i związanej z nią rozwojem odnawialnych źródeł energii (OZE), nastąpił gwałtowny wzrost zainteresowania magazynowaniem energii. Na znaczenie energii w tym aspekcie wskazuje Agenda ONZ na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030, która jako siódmy z 17 celów zrównoważonego rozwoju uwzględnia przystępną cenowo i czystą energię [1]. Jednak potrzeba magazynowania energii pojawiła się praktycznie w XX wieku wraz z upowszechnieniem wykorzystania energii elektrycznej i rosnącego zapotrzebowania na nią. Magazynowanie energii oznacza przechwytywanie energii wytworzonej w danym momencie i magazynowanie jej do późniejszego wykorzystania. Współcześnie podejmuje się badania i aplikacje magazynów energii o różnej zasadzie działania jako magazyny, chemiczne, cieplne i mechaniczne. Wśród magazynów mechanicznych stosowane są magazyny wykorzystujące energię potencjalną, energię kinetyczną lub energię sprężania. Na rys. 1 pokazano typologię rozważanych współcześnie magazynów energii wykorzystujących energię potencjalną.



Rys. 1. Podstawowa typologia magazynów energii wykorzystujących energię potencjalną

Od końca XIX wieku są stosowane wodne elektrownie szczytowo-pompowe. Współcześnie w odniesieniu do magazynów energii wykorzystujących energię potencjalną z medium stałym rozważa się różne rozwiązania, w tym [2, 3, 4, 5, 6]:

- **T-SGES** Tower SGES – wieżowy grawitacyjny magazyn energii,
- **S-SGES** Shaft SGES – szybowy grawitacyjny magazyn energii,
- **P-SGES** Piston SGES – tłokowy grawitacyjny magazyn energii,
- **CAP-SGES** Compressed Air Piston SGES – kompresorowo-tłokowy grawitacyjny magazyn energii,
- **RP-SGES** Rope-hoisting Piston SGES – tłokowo-wyciągowy grawitacyjny magazyn energii,
- **MM-SGES** Mountain Mine-Car SGES – grawitacyjny magazyn na bazie wagoników szynowych ciągniętych i opuszczanych na zboczach gór,
- **MC-SGES** Mountain Cable-Car – grawitacyjny magazyn wykorzystujący przenośnik linowy na zboczach gór,
- **LEM-SGES** – wykorzystujące liniowe silniki elektryczne.

Z wymienionych rozwiązań dojrzałość techniczną i komercyjne wdrożenie osiągnęły wieżowe grawitacyjne magazyny energii [7, 8] w postaci uruchomionego w Chinach magazynu o pojemności 100 MWh i mocy 25 MW.

2. Grawitacyjne magazyny energii w wyrobiskach kopalń

W magazynach energii wykorzystujących energię potencjalną o pojemności magazynu decydują dwa parametry: masa obciążnika (obciążników) i dostępna różnica wysokości pomiędzy poziomami spoczynku obciążnika. Dlatego zainteresowanie wzbudzają szyby i pochyłe wyrobiska kopalń

podziemnych, zwłaszcza kończących operacje wydobywcze [9, 10, 11, 12]. Według autorów tego typu rozwiązań, oprócz magazynowania energii, proponowane rozwiązania oferują dodatkowe podrzędne, dodatkowe funkcje w postaci:

- możliwość wykorzystania istniejących w likwidowanej kopalni obiektów infrastruktury elektro-energetycznej,
- możliwość wykorzystania szybu i urządzeń wyciągowych,
- utrzymanie części miejsc pracy w specjalnościach górniczych w miejscu likwidowanej kopalni,
- pozostawienie szybu – nie ma konieczności jego bezzwłocznej likwidacji.

Należy jednak zwrócić uwagę, że z wykorzystaniem istniejącej infrastruktury kopalnianej wiąże się także dodatkowe, ale zbędne funkcje takie jak:

- utrzymanie odwadniania szybu (szyb, a właściwie część podziemna kopalni pozostaje specyficzną studnią),
- zachowanie przewietrzania szybu dla jego kontroli i utrzymania na potrzeby magazynu energii,
- konieczność prowadzenia w szybie prac konserwacyjnych i remontowych,
- w przypadku magazynów z wielokrotnymi obciążnikami (dzielonymi) konieczność budowy instalacji do załadunku i rozładunku obciążników, mas itd. na powierzchni i pod ziemią,
- konieczność likwidacji szybu po zakończeniu eksploatacji magazynu.

Dyskusji wymaga zdefiniowanie przepisów technicznych w oparciu, o które działałby magazyn energii wykorzystujący wyrobiska nieczynnego zakładu górniczego – przepisy polskiego górnictwa podziemnego narzucają bardzo restrykcyjny reżim kontroli i obsługi szybów i wyciągów szybowych, co może być źródłem wysokich kosztów utrzymania magazynu.

Nie są jednoznacznie zdefiniowane wymagania użytkowe wobec podziemnego magazynu grawitacyjnego, co utrudnia ocenę praktycznej wykonalności rzeczywistego magazynu [13].

3. Przegląd proponowanych rozwiązań grawitacyjnych magazynów energii rozważanych jako możliwe do zastosowania w wyrobiskach nieczynnych kopalń

Wśród przedstawionych powyżej i innych koncepcji budowy grawitacyjnych magazynów energii wykorzystujących infrastrukturę nieczynnych kopalń podziemnych należy wymienić:

- wodne elektrownie szczytowo-pompowe wykorzystujące podziemne wyrobiska kopalni jako, co najmniej, dolny zbiornik wody,
- magazyny grawitacyjne z pojedynczym stałym obciążnikiem,
- magazyny grawitacyjne z wieloma obciążnikami stałymi,
- magazyny grawitacyjne z pojemnikami na ciecz roboczą stanowiącą obciążenie,
- magazyny grawitacyjne z pojemnikami na sypki materiał balastowy.

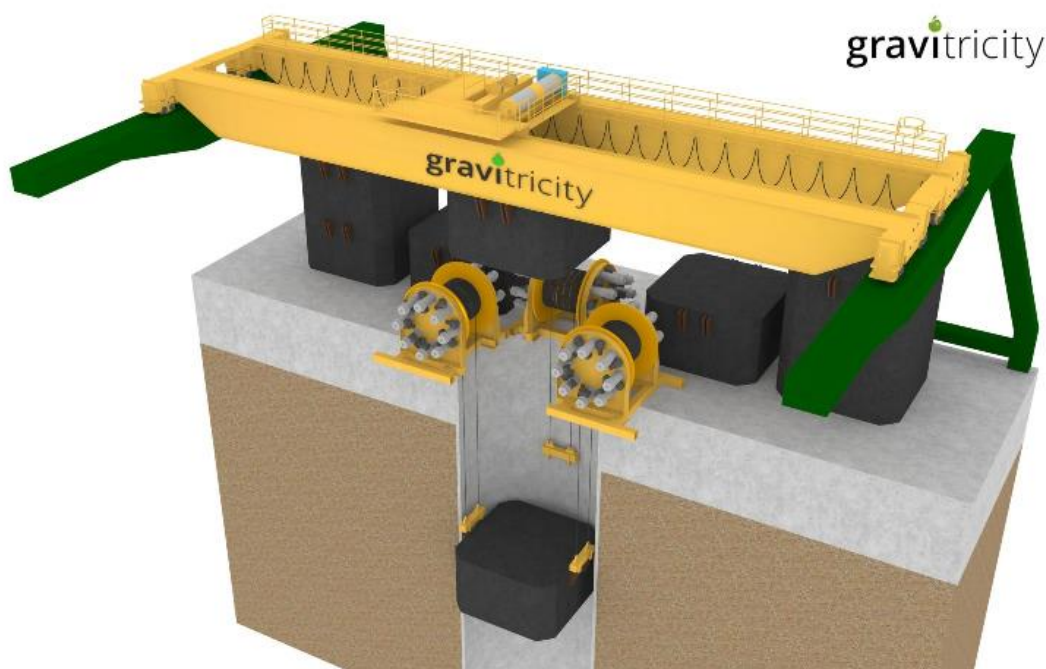
Pominięto w rozważaniach technologie magazynowania grawitacyjnego z wykorzystaniem grawitacji i np. przepływu wody (P-SGES, RP) i ciśnienia (CAP -SGES) oraz LEM-SGES ze względu na niski poziom zaawansowania technologicznego (LRT-1, 2) [14].

3.1. Wodne elektrownie szczytowo-pompowe wykorzystujące podziemne wyrobiska kopalni

Wodne elektrownie szczytowo-pompowe wykorzystujące wyrobiska kopalni podziemnej pomimo swojej, pozornej, atrakcyjności nie znalazły zastosowania. Według niepotwierdzonych informacji tego typu instalację uruchomiono w latach 70-tych XX wieku w jednej z kopalń brytyjskich i szybko zaniechano eksploatacji. W 1997 roku rozważano przekształcenie KWK Pstrowski w elektrownię szczytowo-pompową, ale projekt pozostał tylko w sferze koncepcji. Przyczyną była mała pojemność magazynu, która pozwalała na uzyskanie mocy 36 MW przez mniej niż godzinę, co zostało uznane za nieużyteczne i zbyt kosztowne. Istotnymi problemami była konieczność kompletnej przebudowy jednego z szybów dla opuszczenia pod ziemię elementów elektrowni (pompo-turbina, generator i jednofazowe transformatory) oraz niepewność związana z zachowaniem stateczności obudowy wyrobisk podziemnych poddanych wielokrotnemu napełnianiu i opróżnianiu z wody. Wśród innych podnoszonych argumentów przeciwko temu projektowi wskazano także, że krytyczne elementy elektrowni zlokalizowane zostałyby pod ziemią z trudnym dostępem. Kilka lat temu zgłoszono pomysł wykorzystania jako elektrowni szczytowo-pompowej postawionej w stan likwidacji kopalni Krupiński (JSW S.A.). Temat nie został jednak podjęty.

3.2. Magazyny grawitacyjne z pojedynczym stałym obciążnikiem

Zlokalizowane w szybie kopalnianym magazyny energii potencjalnej wykorzystujące pojedynczy duży obciążnik zawieszony na linie są od 2016 roku lansowane szeroko przez jedną z firm brytyjskich [15].



Rys. 2. Idea grawitacyjnego magazynu energii w szybie kopalnianym [15]

Realizacja takiego rozwiązania zatrzymała się na etapie powierzchniowych demonstratorów technologii (poziom L3), które same w sobie ujawniają wady rozwiązania, tj. uzyskanie dużej mocy i długiego czasu pracy z generacją energii elektrycznej wymaga zastosowania bardzo dużych obciążników, a ponadto głębokość szybów jest zbyt mała [9]. Należy podkreślić, że wykorzystanie

istniejących w polskich kopalniach wyciągów szybowych jest mało efektywne ze względu na ograniczenia masowe i stosowanie napędów z kołem Koepe (kołem napędowym) o ciernym sprzężeniu z liną/linami szybowymi. Istotnym ograniczeniem gabarytowym jest zbrojenie szybów wyposażonych w górnicze wyciągi szybowe.

3.3. Magazyny grawitacyjne z wieloma obciążnikami stałymi

Wobec ograniczeń masowych i gabarytowych związanych z zastosowaniem pojedynczego dużego obciążnika, jedna z firm australijskich [16] zaproponowała zbudowanie magazynu grawitacyjnego z wieloma mniejszymi obciążnikami zakładanymi na ciągnio wyciągu szybowego i zdejmowanych z niego. Generowanie energii polega na opuszczaniu ciężarów zakładanych na powierzchni i jednoczesnym zdejmowaniu ich w rejonie podszybia. Magazynowanie zaś, to operacja odwrotna polegająca na wydawaniu na powierzchnię obciążników systematycznie ładowanych na podszybiu. Ideę rozwiązania pokazano na rys. 4.



Rys. 3. Wieloobciążnikowy grawitacyjny magazyn energii w szybie kopalnianym proponowany przez Green Gravity [16]

Rozwiązanie istnieje tylko w postaci niewielkiego powierzchniowego demonstratora technologii, które nie pozwala dostrzec problemów związanych z zakładaniem i zdejmowaniem obciążników oraz ich rozmieszczaniem w sytuacji, gdzie dla użyteczności magazynu koniecznym będzie załadunek i rozładunek obciążników o łącznej masie wielu tysięcy ton.

3.4. Magazyny grawitacyjne z pojemnikami na ciecz roboczą stanowiącą obciążenie

W ITG KOMAG wykonano model technologiczny elektrowni z wieloma pojemnikami na wodę. Przy pracy w układzie generacyjnym zbiorniki napełniane są na powierzchni wodą, która następnie samoczynnie wylewa się w miejscu rozładunku. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie wygodnego medium, tj. wody o stosunkowo małym ciężarze właściwym, istotnie ogranicza moc jednostkową możliwą do generowania. Ewentualne zastosowanie cieczy o większej gęstości ograniczone jest jej oddziaływaniem na instalację i górotwór oraz otoczenie instalacji. Ponadto cieczy o większej gęstości charakteryzują się też większą lepkością, co może ograniczyć sprawność napełniania i opróżniania pojemników oraz górnego i dolnego zbiornika cieczy. Rozwiązanie to przejmie ograniczenia dla elektrowni szczytowo-pompowej ze zbiornikiem dolnym w wyrobiskach kopalni podziemnej, ale komplikuje układ technologiczny magazynu. W porównaniu z elektrownią szczytowo-pompową, potencjalną zaletą jest lokalizacja podstawowych maszyn (silnik odwracalny – generator itp.) na powierzchni terenu.



Rys. 4. Demonstrator technologii grawitacyjnego magazynu energii z cięgnem zamkniętym z wieloma naczyniami napełnianymi wodą wykonany w ITG KOMAG

Prezentowane są także propozycje adaptacji typowego wyciągu szybowego do opuszczania lub podnoszenia wody, ale rozwiązanie takie ze względu na ograniczoną masę wody i niewielką wysokość opuszczania/podnoszenia ma niewielką użyteczność.

3.5. Magazyny grawitacyjne z pojemnikami na materiały sypkie

Jako rozwiązanie eliminujące wady zastosowania wody w opisanym w podrozdziale 3.4 systemie opuszczania wody w układzie z liną zamkniętą proponowane są rozwiązania z zastosowaniem podobnych pojemników z wykorzystaniem materiałów sypkich o dużej gęstości. Rozwiązanie takie zwiększa rzeczywiście masę roboczą obciążnika, ale uzysk mocy jest niewielki. Ponadto należy oczekiwać dużej złożoności systemu załadunku i rozładunku materiału sypkiego do pojemników i związaną z tym znaczną energochłonnością takich operacji, zwłaszcza w przypadku znacznej oczekiwanej pojemności energetycznej magazynu.

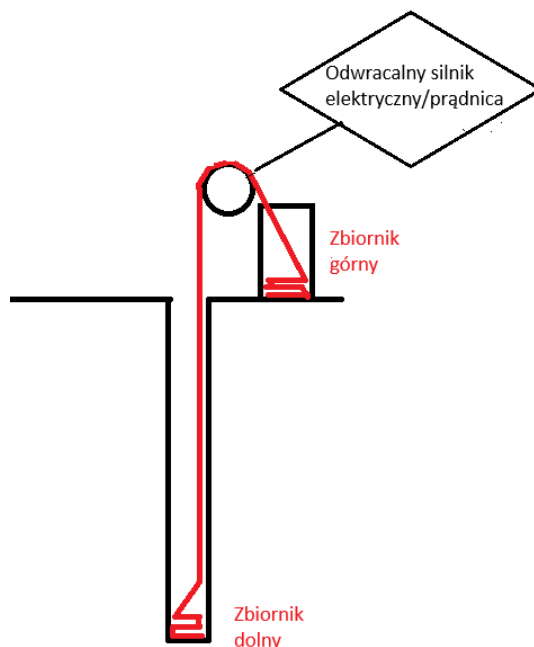
3.6. Wykonalność, użyteczność, skalowalność i ograniczenia grawitacyjnych magazynów energii w kopalniach podziemnych

Wykorzystanie siły grawitacji wskazuje na teoretyczną wykonalność magazynów energii potencjalnej także w kopalni podziemnej [13], jednak praktyczna wykonalność napotyka na liczne ograniczenia. Opisane powyżej ograniczenia eksploatacyjne w połączeniu z relatywnie ograniczoną masą obciążnika i ograniczoną wysokością opuszczania powodują, że praktyczna pojemność magazynu energii w szybie/kopalni podziemnej i potencjalnie możliwa do uzyskania moc będą miały niewielką użyteczność przy dużej złożoności technicznej i przewidywalnych wysokich kosztach eksploatacji. Jedynym sposobem zwiększenia pojemności magazynu jest zwiększanie masy

opuszczanego/podnoszonego obciążnika, ale należy zwrócić uwagę, że możliwość ta nie jest liniowo skalowalna i wynika to z ograniczeń masy, gabarytów, pojemności wyrobisk i nośności konstrukcji. Podkreślenia wymaga, iż proponowane wyżej rozwiązania z wykorzystaniem wyciągu szybowego lub równoważnego rozwiązania nie zapewniają uzyskania stałych parametrów mocy użytecznej w dłuższym przedziale czasu.

4. Wykorzystanie szybu kopalnianego jako grawitacyjny magazyn energii z ciężkim ciągnem przegubowym - łańcuchem

Krytyczny przegląd istniejących idei wykorzystania szybów kopalnianych i ich ograniczeń oraz poszukiwanie możliwości ich wyeliminowania przeprowadzono wykorzystując podejście stosowane w Teorii Ograniczeń (TOC) [17]. Występujące sprzeczności i ograniczenia analizowano także z zastosowaniem podstawowych elementów metody Altszuler (AIRZ) [18, 19]. Poszukiwanie rozwiązań eliminujących ograniczenia szybowych grawitacyjnych magazynów energii ze stałymi lub pojemnikowymi obciążnikami w postaci niewielkiej pojemności, dużej pracochłonności obsługi i technicznych ograniczeń masy i prędkości przemieszczania doprowadziło do wskazania ciężkiego łańcucha ogniwowego jako długiego, elastycznego obciążnika. Ideę grawitacyjnego magazynu energii w szybie kopalnianym wykorzystującego ciężko łańcuchowe pokazano na rysunku 4. Proponowane rozwiązanie zapewnia stałą energię potencjalną zależną w istocie od roboczej głębokości szybu (odcinek szybu z zawieszonym łańcuchem) i masy wiszącego odcinka łańcucha. Jak wskazują doświadczenia żeglugi i producentów łańcuchów kotwicznych przy odpowiednio dużej głębokości komory łańcuchowej (kotwicznej) łańcuch typu okrągłego ma tendencję do samoczynnego układania się [20]. Ideowy schemat grawitacyjnego magazynu energii wykorzystującego ciężkie ciągnie łańcuchowe pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Idea grawitacyjnego magazynu energii w szybie kopalnianym wykorzystującym ciężkie ciągnie łańcuchowe

Koło łańcuchowe powinno mieć charakter koła profilowanego do kontrolowanego prowadzenia łańcucha. Może być na przykład adaptacją koła napędowego wyciągu szybowego, którego układ techniczny odpowiada wymaganiom proponowanego magazynu energii. W tabeli 1 pokazano wstępne obliczenia parametrów roboczych szybowego grawitacyjnego magazynu energii z ciężkim cięgnem łańcuchowym dla dwóch rodzajów łańcucha: kotwicznego o średnicy 102 mm i łańcucha strugowego 42x137 mm firmy Thiele [21].

Wyniki wstępnych obliczeń parametrów szybowego grawitacyjnego magazynu energii z cięgnem łańcuchowym

Tabela 1

Typ łańcucha	Łańcuch kotwiczny d=102mm	Łańcuch strugowy f-my Thiele 42x137	Łańcuch strugowy f-my Thiele 42x137
Głębokość szybu [m]	700	700	700
Założona średnica koła napędowego (gwiazdowego) [m]	5,0	5,0	2,0
Prędkość opuszczania łańcucha [m/s]	1	1	2
Aktywna (robocza) długość łańcucha	5000	5000	5000
Masa części roboczej łańcucha [kg]	1160000	183000	183000
Założona gęstość magazynowa łańcucha wg łańcucha strugowego [kg/m ³]	1830	1830	1830
Długość odcinka szybu wypełnionej łańcuchem roboczym [m]	65,0	65,0	65,0
Siła zrywająca łańcuch [kN]	7320	2220	2220
Ciężar łańcucha wiszącego w szybie [kN]	1593,1	251,3	251,3
Energia potencjalna części łańcucha zawieszanej w szybie [kWh]	154,89	24,44	24,44
Moment na kole gwiazdowym [kNm]	3982,86	628,33	251,33
Prędkość kątowa koła gwiazdowego dla zadanej prędkości opuszczania łańcucha [1/s]	0,4	0,4	2
Moc uzyskiwana na kole gwiazdowym [kWh]	1593,11	251,33	502,66
Czas generacji energii (opuszczania części roboczej łańcucha) przy założonej prędkości [s.]	5000	5000	2500
Ilość energii generowanej na wale w czasie jednego cyklu roboczego opuszczania roboczej części łańcucha [kWh]	2 212,70	349,07	349,07

Uproszczone obliczenia wykazują, że podobnie jak inne grawitacyjne magazyny energii w szybach kopalnianych ilość magazynowanej energii jest stosunkowo niewielka w stosunku do technicznej złożoności takiego systemu i prawdopodobnych kosztów jego funkcjonowania. Wynika to z ograniczonej głębokości szybu i wynikających z tego bardzo dużych wymaganych mas obciążników. W koncepcji nie rozważano szczegółowych rozwiązań technicznych w tym elementów zabezpieczeń i regulacji. W obliczeniach pominięto ocenę sprawności energetycznej rozważanego rozwiązania, ponieważ może ona dodatkowo pogorszyć parametry użytkowe. Bardzo atrakcyjne obliczeniowo

wykorzystanie ciężkiego łańcucha kotwicznego, wymagałoby bardzo masywnej konstrukcji wsporczej.

W obliczeniach pominięto zmianę czynnej (roboczej) długości łańcucha wskutek stopniowego napełniania dennej części szybu opuszczanym łańcuchem.

4. Podsumowanie

Ogólna idea grawitacyjnego magazynu energii w wyłączonym z górniczej eksploatacji szybie kopalnianym, choć teoretycznie wykonalna, wymaga bardziej dokładnych analiz i obliczeń. Choć koncepcja szybowego grawitacyjnego magazynu energii z ciężkim ciągnym łańcuchowym upraszcza, w stosunku do wcześniejszych koncepcji wymienionych w rozdziale 3 rozwiązań, strukturę techniczną takiego magazynu, to pozostaje bardziej złożona od bateryjnych (elektrochemicznych) magazynów energii. Wykorzystanie szybów kopalnianych kopalń kończących działalność wydobywczych jako grawitacyjne magazyny energii powinno uwzględnić także stan techniczny takiego szybu w przewidywalnym dalszym czasie jego istnienia (dla magazynów energii wymienia się od 25 do 50 lat) i jego utrzymania.

Rozważania na temat grawitacyjnych magazynów energii w szybach kopalnianych wskazują na ich teoretyczną wykonalność, ale ich użyteczność z powodu słabej skalowalności (brak możliwości powiększenia parametrów technicznych i użytkowych) będzie niewielka.

Literatura

1. <https://sdgs.un.org/2030agenda> [dostęp: 02.2024]
2. Morstyn T., Botha Ch.D.: Gravitational Energy Storage with Weights, Encyclopaedia of Energy Storage. Elsevier, 2022
3. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/gravity-energy-storage-market213578483.html> [dostęp 03.2024]
4. Tong W., Lu Z., Sun J., Zhao G., Han M., Xu J.: Solid gravity energy storage technology: Classification and comparison. Energy Reports, Elsevier, 2022
5. Jędral W.: Wytwarzanie i magazynowanie wielkich ilości energii elektrycznej w transformacji energetycznej do 2050r. Energetyka ciepła i zawodowa 5/2022
6. <https://swiatoze.pl/grawitacyjne-magazynowanie-energii-jak-to-dziala-i-jakie-ma-korzysci/> [dostęp: 12-12-2024]
7. <https://www.pv-magazine.com/2024/03/07/energy-vault-connects-commercial-scale-gravity-energy-storage-system-in-china/> (access 10-04-2024)
8. <https://www.gramwzielone.pl/magazynowanie-energii/20155075/magazynowanie-energii-dzieki-grawitacji-to-najwieksza-instalacja-na-swiecie> [dostęp: 12-12-2024]
9. Korsiński J.: Solid gravity energy storage in mine shafts – feasibility and functionality. Mining Machines, 2024, Vol. 42 Issue 3, pp. 232-239
10. Hulak D., Remiorz L.: Grawitacyjne magazynowanie energii z wykorzystaniem szybów pogórnich. Rynek Energii 1/2024 s. 10-17
11. Siostrzonek T.: The mine shaft energy storage system—implementation threats and opportunities. Energies art. No 5615 vol. 16 iss. 15 /2024 s. 1–12

12. Kula J., Kamiński P., Stecuła K., Prostański D., Matusiak P., Kowol D., Kopacz M., Olczak P.: Technical and Economic Aspects of Electric Energy Storage in a Mine Shaft —Budryk Case Study. 2021, nr 14(21), 7337, s. 1-14
13. Kiliński A: Przemysłowe procesy realizacji. Podstawy teorii. WNT, Warszawa 1976
14. Łukasiński W. i Lis W.: Samoocena dojrzałości technologicznej organizacji. e-mentor, 5(102)/2023, 28–37. <https://doi.org/10.15219/em102.1639>
15. www.gravitricity.com (access 3-01.2024). [8] <https://greengravity.com> [dostęp: 10-02-2024].
16. <https://greengravity.com/> [dostęp: 20.03.2024]
17. Goldratt E.M., Cox J.: Cel I: Doskonałość w produkcji. MINT Books, Warszawa 2014.
18. Altszuler H.: Algorytm wynalazku. Seria: Omega tom 215. Wiedza Powszechna. Warszawa 1968
19. Altszuler H.: Elementy teorii twórczości inżynierskiej. WNT, Warszawa 1983
20. <https://ysm.com.pl/lancuchykotwiczne.html> 918-12 [dostęp: 18-12-2024]
21. <https://www.thiele.de/en/> [dostęp: 16-11-2024]



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMTECH2024.9>

Postać konstrukcyjna elektrolizera alkalicznego jako efekt prac badawczo-rozwojowych realizowanych w ITG KOMAG

Krzysztof Nieśpiałowski – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Mateusz Wójcicki – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Korneliusz Sierpowski – Akademia Wojsk Lądowych im. Gen. Tadeusza Kościuszki /ITG KOMAG

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono prace związane z rozwojem technologii wodorowych w ITG KOMAG pod kątem projektowania i potencjalnego wdrożenia wysokociśnieniowych elektrolizerów alkalicznych. W pierwszej części omówiono stan techniki, jak również perspektywy rozwoju przemysłu elektrolizerów w niedalekiej przyszłości. Drugą część poświęcono na przybliżenie prowadzonych prac projektowych i pierwszych prac badawczych laboratoryjnego modelu elektrolizera alkalicznego. Trzecią część poświęcono prezentacji obecnych prac związanych z projektem i budową wysokociśnieniowego elektrolizera i stanowiska badawczego realizowanego w ramach naboru 1/2023 Proof of Concept.



Fundusze Europejskie
dla Nowoczesnej Gospodarki



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Fundacja na rzecz
Nauki Polskiej

Słowa kluczowe: wodór, elektrolizer alkaliczny, elektroliza wysokociśnieniowa

The design of the alkaline electrolyzer as a result of research and development work in ITG KOMAG

Abstract: The chapter presents work related to development of hydrogen technology at ITG KOMAG regarding the design with potential implementation of high-pressure alkaline electrolyzers. The first part discusses the state of the art as well as the development prospects of the electrolyzer industry in the near future. The second part is devoted to presenting the ongoing design work and the first research work on the laboratory model of the alkaline electrolyzer. The third part is devoted to presentation of current work related to the design and manufacture of a high-pressure electrolyzer as well as test stand. The work has been realized as part of the Project financed from the 2nd Priority of the European Funds for a Modern Economy 2021–2027 Program (FENG) within call for proposals for the 1/2023 Proof of Concept.



European Funds
for Smart Economy



Republic
of Poland

Co-funded by the
European Union



Foundation for
Polish Science

Keywords: hydrogen, alkaline electrolyzer, high-pressure electrolysis



1. Wprowadzenie

Wodór, najpowszechniejszy pierwiastek we wszechświecie, odgrywa kluczową rolę w transformacji energetycznej, dążącej do redukcji emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcia neutralności klimatycznej. Jego unikalne właściwości sprawiają, że jest atrakcyjnym nośnikiem energii, mogącym zrewolucjonizować sektory, takie jak transport, przemysł czy energetyka. Jednym z najczystszych sposobów pozyskiwania wodoru jest elektroliza wody. Jest to proces polegający na rozkładzie cząsteczek wody (H_2O) na wodór (H_2) i tlen (O_2) z wykorzystaniem energii elektrycznej.

Elektrolizery to urządzenia umożliwiające przeprowadzenie tego procesu. W zależności od zastosowanej technologii, wyróżnia się kilka ich typów:

- elektrolizery alkaliczne (AEL):
wykorzystują roztwory alkaliczne, takie jak wodorotlenek potasu (KOH) lub sodu (NaOH), jako elektrolit – charakteryzują się dojrzałością technologiczną i niższymi kosztami eksploatacji, ale mają ograniczoną elastyczność w dostosowywaniu się do zmiennych źródeł energii odnawialnej [1, 2, 3],
- elektrolizery z membraną do wymiany protonów (PEM):
wykorzystują stałą membranę polimerową jako elektrolit – są bardziej elastyczne i mogą szybko reagować na zmiany w dostawie energii, co czyni je odpowiednimi do współpracy z niestabilnymi źródłami OZE, jednak ich koszty są wyższe ze względu na użycie metali szlachetnych w konstrukcji [2, 3, 4],
- elektrolizery stałotlenkowe (SOEC):
działają w wysokich temperaturach ($850-1200^{\circ}C$) i wykorzystują stałe elektrolity ceramiczne – oferują wysoką sprawność, ale ich trwałość i koszty wciąż stanowią duże wyzwanie eksploatacyjne [2],
- elektrolizery z membraną anionowowymienną (AEM):
technologia w fazie rozwoju, stanowiąca obiecującą alternatywę dla elektrolizerów PEM, oferując potencjalnie niższe koszty oraz możliwość pracy z wodą o różnym stopniu czystości [5].

Przewiduje się, że produkcja wodoru za pomocą elektrolizy będzie miała kluczowe znaczenie dla dekarbonizacji gospodarki. Obecnie tylko około 2% wodoru na świecie jest pozyskiwane w ten sposób, głównie jako produkt uboczny przy produkcji chloru [6, 7]. Pomimo to rozwój technologii i rosnące inwestycje w infrastrukturę wodorową mogą znacząco zwiększyć ten udział w najbliższych latach.

W Polsce również podejmowane są inicjatywy mające na celu rozwój produkcji zielonego wodoru. Planowane jest uruchomienie elektrolizerów o łącznej mocy 250 MW, co przyczyni się do zwiększenia krajowej produkcji tego ekologicznego paliwa [8].

Mimo, że elektroliza znana jest od ponad 220 lat, w skali komercyjnej zaczęła być stosowana dopiero w pierwszej połowie XX wieku. Przewiduje się, że wodór coraz częściej będzie wykorzystywany w wielu sektorach gospodarki, jak chociażby:

- energetyka i ciepłownictwo:
może służyć do magazynowania nadwyżek energii z OZE oraz jako paliwo w kotłach wodorowych, zapewniając zeroemisyjne źródło ciepła [9, 10],

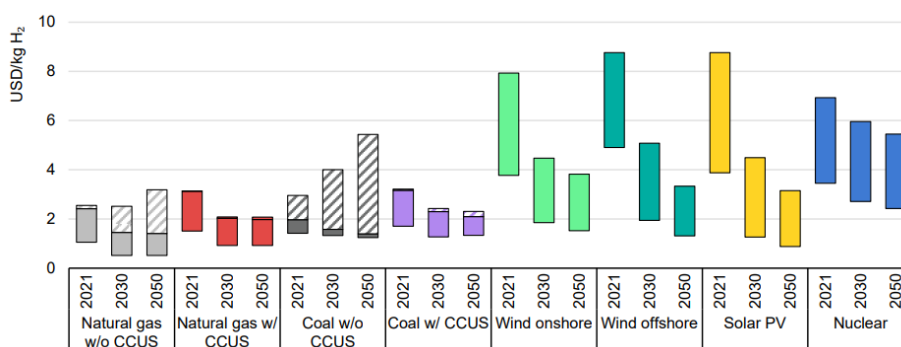
- przemysł:
jest wykorzystywany w procesach chemicznych, takich jak produkcja amoniaku czy rafinacja ropy naftowej. Zielony wodór może zastąpić tradycyjnie używany szary wodór, redukując emisję CO₂ [10, 11],
- transport:
stosowany jako paliwo w pojazdach z ogniwami paliwowymi (FCEV), może przyczynić się do dekarbonizacji sektora transportowego [10, 12, 13, 14, 15].

Rozwój technologii elektrolizerów oraz infrastruktury wodorowej jest kluczowy dla przyszłości gospodarki niskoemisyjnej. Inwestycje w badania i rozwój, a także wsparcie regulacyjne, mogą przyspieszyć wdrażanie tych rozwiązań, przyczyniając się do osiągnięcia celów klimatycznych i zrównoważonego rozwoju.

Obecnie, na świecie najpopularniejszą metodą produkcji wodoru jest tzw. reforming gazu ziemnego. Pomimo to, sytuacja geopolityczna na świecie oraz światowe trendy klimatyczne wymuszają zmiany w strukturze produkcji wodoru. Ważnym katalizatorem zmian są zmiany kosztów produkcji wodoru z danego źródła. W roku 2016 kształtowały się one następująco (USD/kg) [16]:

- reforming gazu ziemnego 1.56
- elektroliza + farma wiatrowa 6.64
- gazyfikacja węgla 1.03
- gazyfikacja biomasy 4.63
- termalny rozkład wody 1.63

Wysokość kosztów produkcji wodoru z różnych źródeł w roku 2021 oraz prognozowane koszty jego produkcji do roku 2050 pokazano na rys. 1. Prowadzone przez specjalistów różnych branż scenariusze zakładają, że ceny produkcji wodoru z różnych źródeł pomiędzy rokiem 2030, a 2050 stopniowo będą się wyrównywały [17]. Scenariusze te jednak nie uwzględniają obecnego zaburzenia łańcuchów dostaw węgla oraz gazu. Ponadto, prowadzona polityka klimatyczna coraz bardziej ogranicza korzystanie (do całkowitej eliminacji) z takich źródeł, jak gaz ziemny czy węgiel [18, 19].



Rys. 1. Wyrównany koszt produkcji wodoru według technologii w 2021 r. i w scenariuszu zerowej emisji netto do 2050 r., 2030 r. i 2050 r. [Źródło: 17]

Słowniczek:

Natural gas w/o CCUS – gaz ziemny bez technologii wychwytywania, wykorzystania i składowania dwutlenku węgla;

Natural gas w/ CCUS – gaz ziemny z technologią wychwytywania, wykorzystania i składowania dwutlenku węgla;

Coal w/o CCUS – węgiel bez technologii wychwytywania, wykorzystania i składowania dwutlenku węgla;

Coal w/ CCUS – węgiel z technologią wychwytywania, wykorzystania i składowania dwutlenku węgla;

Wind onshore – energia wiatru generowana na lądzie;

Wind offshore – energia wiatru generowana na morzu;

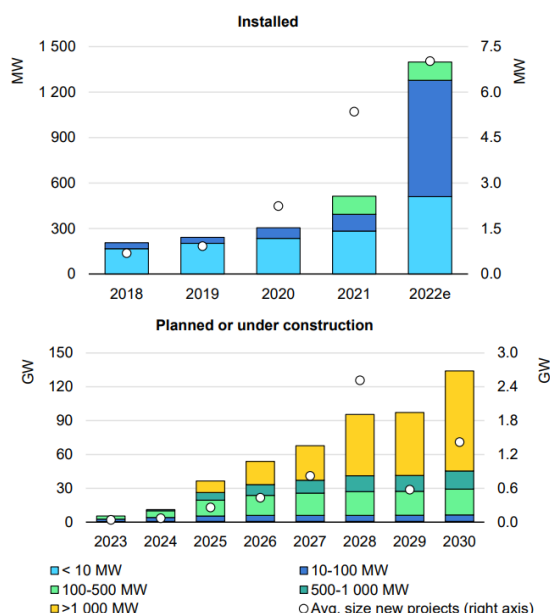
Solar PV – fotowoltaika;

Nuklear – energia jądrowa

Wodór stanowi czyste i teoretycznie niemal niewyczerpywalne źródło energii. Niemniej, zasadniczym problem z jego wykorzystywaniem na szeroką skalę jest proces wytwarzania. Powszechnie stosuje się system przypisywania kolorów do procesu produkcji wodoru, aby określić jego źródło i metodę wytwarzania. Wodór czarny i brązowy pochodzi z węgla kamiennego lub brunatnego, wodór różowy wytwarzany jest z wykorzystaniem energii jądrowej, natomiast wodór szary powstaje w wyniku reformingu gazu ziemnego. Wodór biały to wodór naturalny, pozyskiwany bezpośrednio ze złóż, choć obecnie takie źródła nie są eksploatowane. Wodór zielony, uznawany za najbardziej ekologiczny, produkowany jest w procesie elektrolizy zasilanej energią odnawialną, co pozwala na uniknięcie emisji gazów cieplarnianych [19].

Obecnie około 96% globalnej produkcji wodoru pochodzi z technologii związanych z emisją CO₂, w tym głównie wodoru szarego. Jednak rozwój technologii odnawialnych źródeł energii (OZE) i spadek ich kosztów otwierają możliwości zwiększenia udziału wodoru zielonego. Szczególnie obiecujący jest postęp w dziedzinie elektrolizerów alkalicznych, które oferują czystość wodoru porównywalną z technologią PEM, przy znacznie niższych kosztach budowy i eksploatacji [20, 21, 22].

Światowe trendy na rynku elektrolizerów, związane z polityką klimatyczną, wskazują na rosnący popyt na urządzenia do produkcji wodoru, szczególnie „zielonego”. Budowane są coraz większe jednostki do jego produkcji, co wiąże się z sumarycznym wzrostem mocy w nich zainstalowanej. Na rys. 2 pokazano wykres przedstawiający światowy rynek elektrolizerów obejmujący instalacje już działające oraz będące w budowie i planowane, natomiast rys. 3 przedstawia przykładowy proces produkcji i wykorzystania zielonego wodoru.



Rys. 2. Globalna wydajność elektrolizerów według wielkości w oparciu o planowane projekty, 2018-2030 [Źródło: 17]

Słowniczek:

Installed – Zainstalowane

Planned or under construction – Planowane lub w budowie

Avg. size new projects (right axis) – Średnia wielkość nowych projektów (oś prawa)



Rys. 3. Przykładowy proces produkcji i wykorzystania zielonego wodoru
[Źródło: 23]

Światowy rynek producentów elektrolizerów jest bardzo dynamiczny, a oferowane przez nich produkty wciąż są usprawniane i dostępne w nowych wariantach. Dotyczy to zwłaszcza elektrolizerów PEM oraz ALK. Elektrolizery SOE są aktualnie przedmiotem rozwoju i wdrożeń w projektach badawczych, a także integracji z przemysłem. W minionym dziesięcioleciu Chiny wykorzystywały niskie ceny materiałów, aby zdominować produkcję paneli fotowoltaicznych i zdetronizować zachodnich konkurentów w momencie, gdy światowy popyt na fotowoltaikę zaczął gwałtownie rosnąć. Europejscy i amerykańscy naukowcy nie chcą, aby ten scenariusz powtórzył się w dziedzinie zielonego wodoru. Obecnie ponad 40 % wszystkich produkowanych elektrolizerów pochodzi z Chin. Choć nie są one tak wydajne jak te produkowane w USA i Europie, to koszty ich produkcji są znacznie niższe w porównaniu do rozwiązań zachodnich. Przewiduje się, że w nadchodzących latach amerykańskim i europejskim producentom uda się tylko częściowo zbliżyć cenowo do chińskich konkurentów. Dodatkowo przewiduje się, że wydajność chińskich elektrolizerów będzie wzrastać, co może osłabić obecną przewagę spółek technologicznych z USA i Europy. Dla Unii Europejskiej zielony wodór, produkowany w procesie elektrolizy wody zasilanej energią ze źródeł odnawialnych, stanowi kluczowy element strategii dotyczącej osiągnięcia planowanych celów klimatycznych i energetycznych. Może on być wykorzystywany jako bezemisyjne paliwo w sektorach trudnych do elektryfikacji, takich jak transport dalekobieżny i ciężki, jako surowiec chemiczny np. do produkcji nawozów i innych chemikaliów oraz w procesach przemysłowych np. w produkcji stali lub cementu.

2. Elektrolizer alkaliczny w skali laboratoryjnej

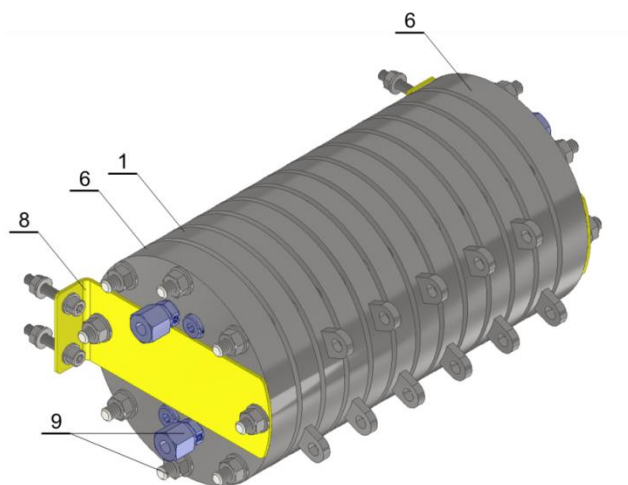
Przez wiele dekad wodór był szeroko wykorzystywany w przemyśle procesowym (np. w rafineriach i syntezie amoniaku), a doświadczenie pokazuje, że może być bezpiecznie stosowany w zastosowaniach przemysłowych, o ile przestrzegane są odpowiednie standardy, przepisy i najlepsze praktyki [24]. Dotyczy się to również produkcji wodoru w procesie elektrolizy wody, jednego z najbardziej obiecujących kierunków spośród technologii produkcji wodoru. Proces ten oparty jest na reakcji elektrochemicznej, w wyniku której cząsteczka wody rozpada się na wodór i tlen pod wpływem doprowadzonej energii elektrycznej. Produkcja wodoru wykorzystująca energię elektryczną i elektrolizery nie przekracza 4%. Szansą na zwiększenie tego udziału jest współdziałanie z OZE i traktowanie wodoru powstałego z nadwyżki produkcyjnej OZE, jako magazynu energii. Rozwijanie

tego zagadnienia wymaga podjęcia działań zmierzających do przygotowania krajowego zaplecza, pozwalającego na seryjną produkcję elektrolizerów. Elektrolizery alkaiczne, pomimo że nie pozwalają uzyskać wodoru tak wysokiej czystości jak z elektrolizerów PEM, są tańsze, a to pozwala na ich szerokie stosowanie w dużych instalacjach OZE.

Mając na uwadze powyższe oraz to, że powstają nowe rozwiązania konstrukcyjne elektrolizerów, głównie PEM, działających pod ciśnieniem powyżej 5 MPa (50 bar) [25, 26], specjaliści ITG KOMAG podjęli się opracowania elektrolizera alkalicznego wytwarzającego wodór pod ciśnieniem 20 MPa (200 bar). W tym celu przeprowadzone zostały niżej wymienione prace:

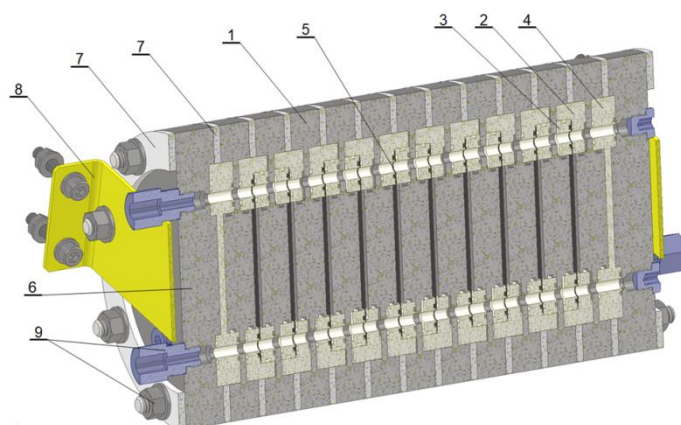
- identyfikacja zagadnień technicznych związanych z budową, działaniem oraz prowadzeniem badań elektrolizera alkaicznego w skali laboratoryjnej,
- opracowanie uwarunkowań technicznych i wymagań normatywnych oraz metodologii obliczeń elektrolizerów i metodyki prowadzenia przyszłych badań,
- opracowanie dokumentacji technicznej wysokociśnieniowego elektrolizera alkalicznego (laboratoryjnego), o kołowym kształcie komory,
- nadzór nad budową elektrolizera i laboratoryjnego stanowiska badawczego do badań elektrolizerów alkalicznych.

Elektrolizer pomysłu ITG KOMAG jest typu alkalicznego. Zasadniczym elementem zespołu jest tzw. stos elektrolizera. Jego widok izometryczny i przekrój przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Zespół elektrolizera – model 3D:

1- elektroda, 6 - pokrywa zamykająca, 8 - mocowanie, 9 - przyłącza hydrauliczne



Rys. 5. Elektrolizer alkaliczny w przekroju– model 3D:

1- elektrody, 2 - uszczelnienia wewnętrzne, 3 - uszczelnienia zewnętrzne, 4 - uszczelnienia skrajne, 5 - membrany, 6 - pokrywy, 7 - przekładki izolujące, 8 - wsporniki, 9 - przyłącza hydrauliczne

Elektrody zaprojektowane zostały w formie stalowych krążków wykonanych ze stali nierdzewnej/kwasoodpornej z wytoczeniami pod uszczelnienia, stanowiące jednocześnie element separujący i ustalający dystans między elektrodami.

Uszczelnienia wewnętrzne i zewnętrzne zaprojektowane zostały w taki sposób, aby umożliwić zabudowę w nich pierścieni uszczelniających (o-ringów). Szczelność między elektrodami, a wspomnianymi uszczelnieniami, realizowana jest promieniowo z wykorzystaniem rowka na mniejszej średnicy elektrody. Uszczelnienia kanałów dopływowych z membraną, z uwagi na stosunkowo małą średnicę i brak problemów z zabudową, zaprojektowano w układzie osiowym. Membrana elektrolityczna zaciśnięta i uszczelniona jest pomiędzy wspomnianymi uszczelnieniami wewnętrznymi i zewnętrznymi.

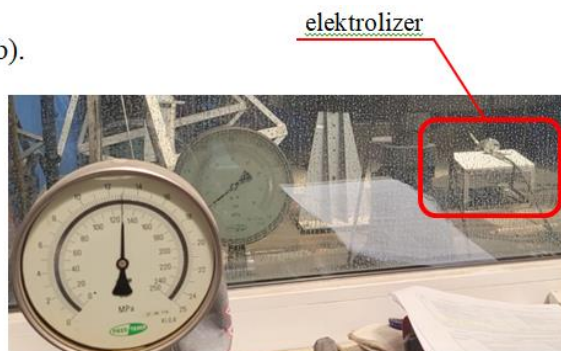
Przekładki izolujące pełnią rolę separatora elektrod oraz wspomagają montaż całego zestawu. Zestaw uszczelnień i elektrod zaciśnięty jest między dwoma pokrywami wyposażonymi w króćce przyłączeniowe i elementy montażowe. Każda z pokryw wyposażona jest w zestaw króćców umożliwiający podłączenie dwóch linii tłocznych i spływowych. System uszczelnień i przekładek opracowany został w taki sposób, że w konstrukcji elektrolizera występują dwa niezależne obiegi elektrolitu. Oznacza to, że elektrolit każdego z obiegów omywa jedynie katodową lub anodową stronę poszczególnych elektrod, co znaczy, że już na etapie produkcji wodoru, jego przepływ jest całkowicie odseparowany od strony produkującej tlen. Takie podejście umożliwi uzyskanie wysokiej czystości gazów.

Wyprodukowany egzemplarz laboratoryjny elektrolizera poddany został ciśnieniowym próbom wodnym (rys. 6). Próba wykazała, że urządzenie jest szczelne do ciśnienia wynoszącego 13 MPa (130 bar).

a).



b).

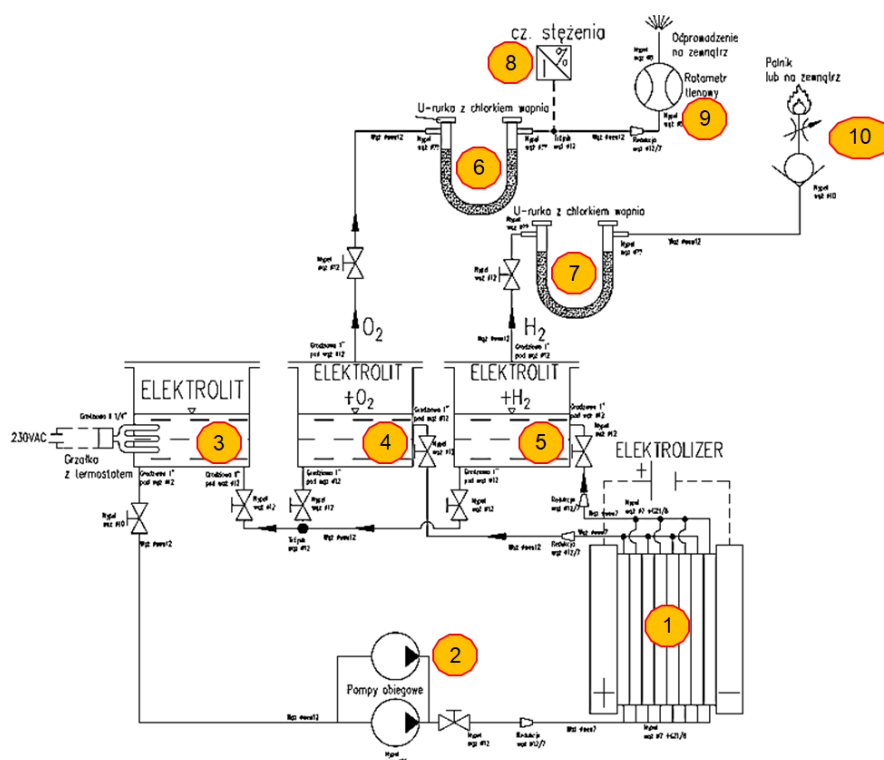


Rys. 6. Elektrolizer w czasie prób ciśnieniowych:

a) podłączenie hydrauliczne elektrolizera, b) próba ciśnieniowa

Następnym krokiem było przeprowadzenie prób produkcji wodoru na stanowisku badawczym. Stanowisko badawcze, pokazane schematycznie (rys. 7), złożone było z:

- elektrolizera (poz. 1),
- zespołu pompowego (poz. 2),
- zbiornika elektrolitu (poz. 3),
- separatora tlenu (poz. 4),
- separatora wodoru (poz. 5),
- osuszacza tlenu (poz. 6),
- osuszacza wodoru (poz. 7),
- czujnika stężenia tlenu (poz. 8),
- rotametu (poz. 9),
- króćca odprowadzenia wodoru na zewnątrz (poz. 10).



Rys. 7. Stanowisko badawcze produkcji wodoru - schemat

Podczas prac badawczych prowadzono:

- identyfikację uzyskiwanego stężenia gazów,
- badania na parametrach nominalnych i pomiar dynamiki temperaturowej,
- próby stabilności produkcji wodoru w różnych temperaturach pracy,
- długotrwały pomiar stabilności działania elektrolizera.

Przeprowadzone badania wykazały, że:

- uzyskano czystość produkcji wodoru >96%,
- zgodnie z oczekiwaniem, sprawność rośnie wraz ze wzrostem temperatury (rys. 8),
- na obecnym etapie prac, sprawność elektryczna prototypu (rys. 8) wyznaczona eksperymentalnie wykazuje dobrą zgodność z modelem obliczeniowym,
- niezauważono oznak korozji wżerowej elementów metalowych elektrolizera, co sugeruje duży potencjał w wykorzystaniu zastosowanego materiału w produkcji urządzenia.

3. Elektrolizer – Proof of Concept

Na podstawie pozyskanej wiedzy oraz doświadczenia podczas prowadzenia prac badawczych elektrolizera w wersji laboratoryjnej, specjaliści ITG KOMAG wystąpili z wnioskiem o dofinansowanie projektu badawczego na budowę i przeprowadzenie badań elektrolizera w wersji komercyjnej. Tytuł projektu brzmi: **Wysokociśnieniowy Elektrolizer Alkaliczny 200 bar** (akronim: HiPE 200). Projekt jest dofinansowany w ramach naboru 1/2023 Proof of Concept, ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG). Umowa o dofinansowanie nr FENG.02.07-IP.05-0048/23.



Projekt zakłada współpracę z partnerem przemysłowym: SBB ENERGY S.A. i podzielony jest na dwa zadania:

1. Projekt i budowa wysokociśnieniowego elektrolizera alkalicznego.
2. Badania wysokociśnieniowego elektrolizera alkalicznego

Powyższe zadania realizowane są przez zespół ITG KOMAG, natomiast zadaniem partnera przemysłowego będzie:

- w zadaniu 1:
 - konsultacje techniczne w zakresie doboru elementów układu pompowego elektrolitu,
 - weryfikacja doboru elementów opomiarowania w zakresie ciśnienia i temperatury w ramach projektowanego stanowiska badawczego,
 - analiza wyników prób szczelności prowadzonych w ramach badań ciśnieniowych,
- w zadaniu 2:
 - konsultacje wyników badań z zakresu czystości produkowanego wodoru, jednostkowego zużycia energii, sprawności LHV i HHV w funkcjach ciśnienia i temperatury,
 - współudział w opracowaniu porównania prototypowego rozwiązania do dostępnych na rynku produktów w aspekcie analizy kosztu energetycznego produkowanego wodoru i propozycji optymalizacji rozwiązania pod kątem potencjalnej komercjalizacji.

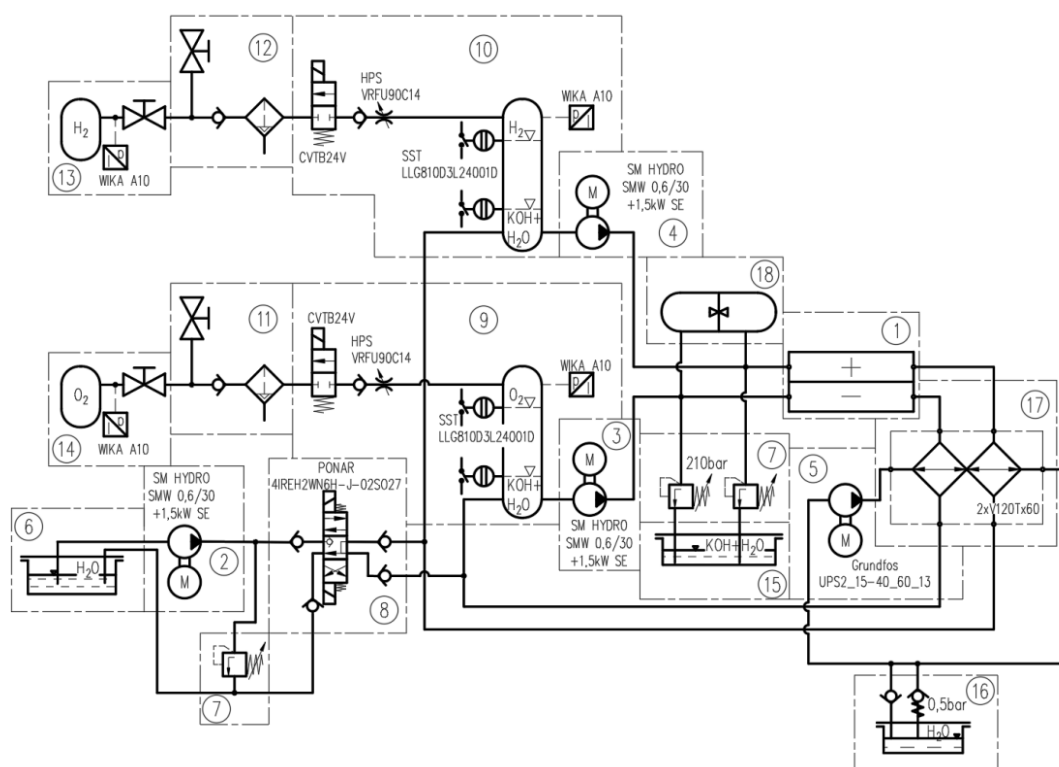
Na potrzeby realizacji projektu i po uwzględnieniu zdobytej wiedzy i doświadczenia, wprowadzono zmiany w konstrukcji elektrolizera. Zmiany dotyczyły głównie węzłów uszczelniających, umożliwiających uzyskanie wyższego ciśnienia produkcji wodoru. Niezbędnym okazało się także zmodyfikowanie stanowiska badawczego wraz z zaprojektowaniem dedykowanych mu podzespołów.

Sercem układu zespołu elektrolizera jest jak w wersji laboratoryjnej tzw. „Stos”, wyposażony w dwa niezależne obiegi: po stronie tlenowej i wodorowej. Obieg elektrolitu realizowany jest przez dwa zespoły pompowe pracujące w układzie zamkniętym, pobierające po stronie ssawnej medium z separatorów poszczególnych gazów. Po elektrolizie, elektrolit z pęcherzykami gazów, przepływając przez wysokociśnieniowy wymiennik ciepła, ponownie trafia do separatorów, gdzie następuje rozdzielenie frakcji. Linie tłoczne poszczególnych obiegów połączone są poprzez kompensator, którego rolą jest wyrównywanie ciśnienia w poszczególnych obiegach (ze względu na różną objętościową produkcję gazów). Separatory wyposażone są w czujniki poziomu sygnalizujące ubytek elektrolitu oraz czujniki ciśnienia determinujące moment opróżnienia separatorów z gazu pod ciśnieniem. Opróżnienie gazu odbywa się poprzez zainstalowane na separatorach elektrozapory i zawory dławiące ograniczające efekt „dynamicznego uderzenia” pneumatycznego. Gazy pod ciśnieniem poprzez osuszacze trafiają do zbiorników wysokociśnieniowego składowania gazów.

Poza obwodem zasadniczym, zespół elektrolizera wyposażony jest w układy peryferyjne. Pierwszy z nich stanowi układ doładowania elektrolitu ubywającego w czasie trwania procesu roboczego. Elektrolit doładowywany jest poprzez pompę hydrauliczną, a za sterowanie nią odpowiada zespół rozdzielacza kierunkowego, zamontowanego na dedykowanej płycie z zabudowami zaworami zwrotnymi i przelewowym.

Drugi z układów peryferyjnych stanowi układ obiegowy medium chłodniczego. Wyposażony jest on w zespół pompowy ze zmiennym wydatkiem, pracujący w niskociśnieniowym układzie zamkniętym, wyposażonym w zbiornik wyrównawczy. Rolą układu jest regulacja temperatury elektrolitu.

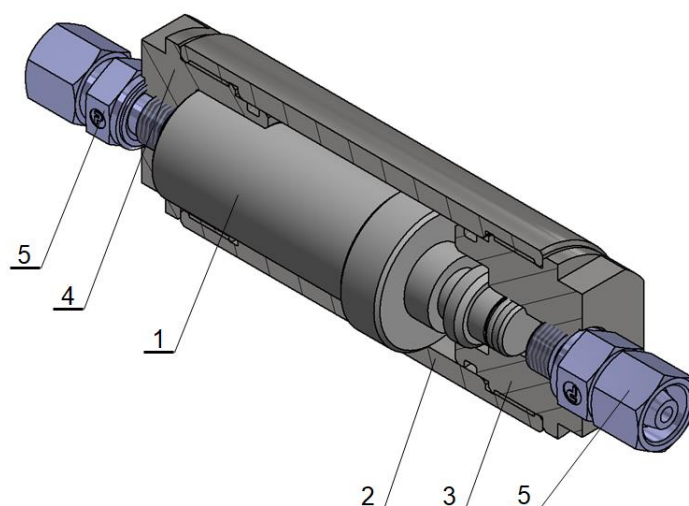
Schemat stanowiska badawczego wysokociśnieniowego elektrolizera alkalicznego pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Schemat stanowiska badawczego wysokociśnieniowego elektrolizera alkalicznego: 1 - elektrolizer, 2 - pompa doładowania, 3 i 4 - pompy elektrolitu, 5 - pompa układu chłodzenia, 6 - zbiornik wody doładowania, 7 - zawór przelewowy, 8 - zespół rozdzielacza wody, 9 - separator tlenu, 10 - separator wodoru, 11 - osuszacz tlenu, 12 - osuszacz wodoru, 13 - zbiornik wysokociśnieniowego składowania tlenu, 14 - zbiornik wysokociśnieniowego składowania wodoru, 15 - zbiornik przelewowy, 16 - zbiornik wyrównawczy chłodnicy, 17 - chłodnica elektrolitu, 18 - kompensator

Zespół zaworu przelewowego

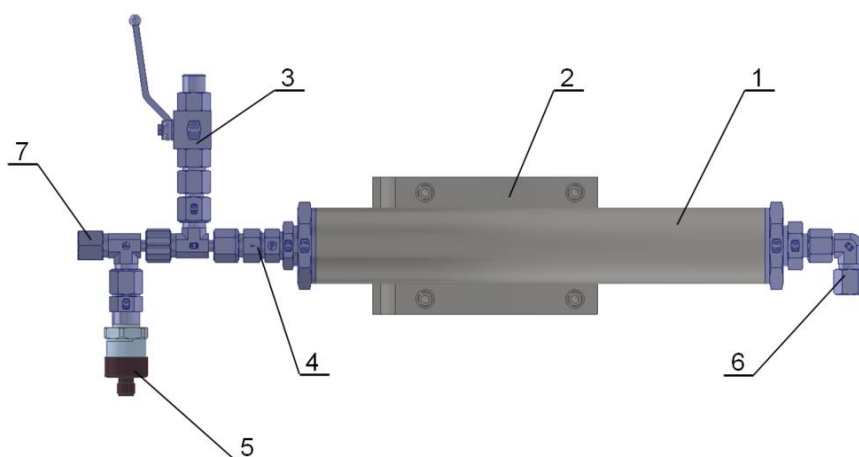
Zespół zaworu przelewowego (rys. 9) jest zespołem wykonanym ze stali nierdzewnej. W układzie hydraulicznym elektrolizera są trzy tego typu zespoły. Jeden zabezpieczający układ wody doładowania i dwa w obiegu elektrolitu, zabudowane na zbiorniku przelewowym.



Rys. 9. Zespół zaworu przelewowego – model 3D: 1 - suwak, 2 - obudowa, 3 i 4 - tuleje przyłączeniowe z gniazdami, 5 - przyłącza hydrauliczne

Zespół osuszacza tlenu/wodoru

Produkowane gazy zawierają w sobie pewien procent wilgoci, która pochodzi z parującego elektrolitu. Składowanie gazu wymaga zastosowania odpowiednich urządzeń przeznaczonych do jej usuwania. W związku z powyższym, wysokociśnieniowy elektrolizer alkaliczny będzie wyposażony w dwa zespoły osuszacza: jeden tlenu, drugi wodoru. Konstrukcja obu (rys. 10) jest podobna. Składają się one z osuszacza (tlenu/wodoru), zaworu odcinającego, przyłączy hydraulicznych oraz czujnika ciśnienia. Każdy osuszacz wyposażony jest we wspornik, umożliwiającą pewne mocowanie do tablicy (ściany). Osuszacze wypełnione są środkiem absorbującym wilgoć.

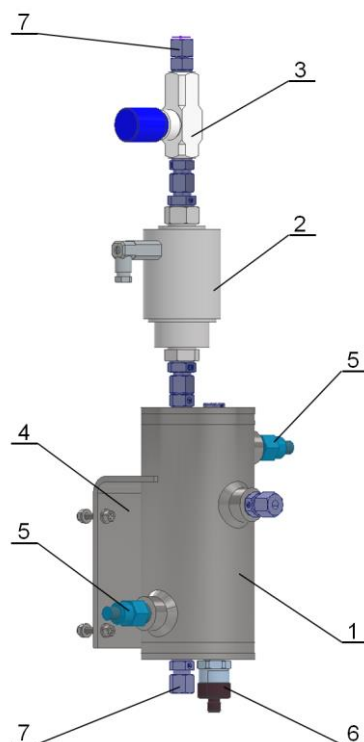


Rys. 10. Zespół osuszacza tlenu/wodoru – model 3D: 1 - osuszacz, 2 - wspornik, 3 - zawór odcinający, 4 - zawór zwrotny, 5 - przetwornik ciśnienia, 6 i 7 - przyłącza hydrauliczne

Zespół separatora tlenu / wodoru

Celem rozdzielenia gazu na dwie frakcje (tlen i wodór), urządzenie wyposażono w separator (rys. 11). Głównym zespołem separatora jest zbiornik wykonany ze stali nierdzewnej, do którego wpływa elektrolit wraz z wyprodukowanym w elektrolizerze gazem (odpowiednio: tlenem lub wodorem). W zbiorniku następuje „uspokojenie” przepływu elektrolitu i właściwe wydzielanie się

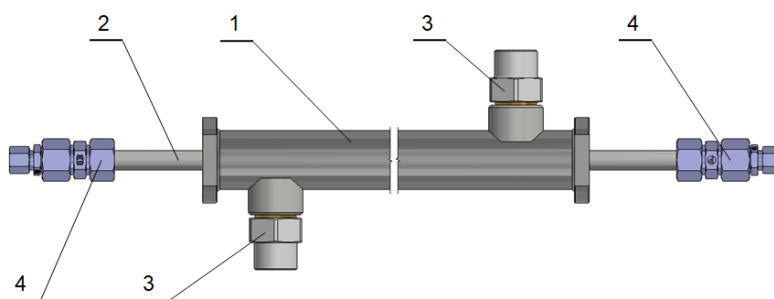
z niego gazu. Zbiornik wyposażony jest w dwa czujniki poziomu („górny” i „dolny”), czujnik ciśnienia oraz przyłącza hydrauliczne. Na przyłączach górnej pokrywy zbiornika zabudowano elektrozawór (umożliwiający odcięcie przepływu gazu) oraz zawór dławiący (umożliwiający regulację ilości wypływającego z separatora gazu). Zespół wyposażony jest we wspornik, pozwalający na zamontowanie go na ścianie.



Rys. 11. Zespół separatora tlenu/wodoru – model 3D: 1 - separator, 2 - elektrozawór, 3 - zawór dławiący, 4 - wspornik, 5 - przetwornik poziomu, 6 - przetwornik ciśnienia, 7 - przyłącza hydrauliczne

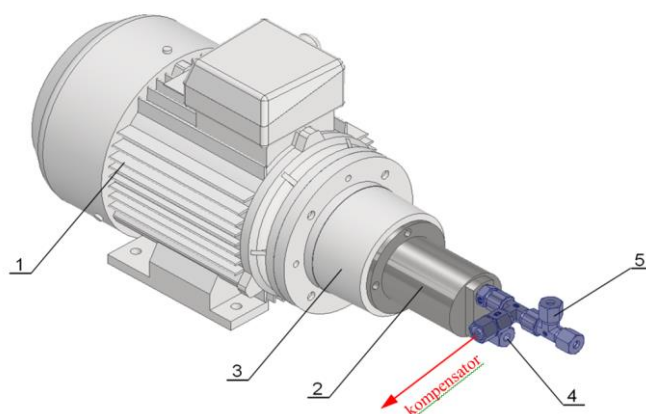
Zespół chłodnicy elektrolitu

Zespół chłodnicy elektrolitu (rys. 12), jest odpowiedzialny za utrzymanie właściwej jego temperatury i składa się z dwóch wysokociśnieniowych jednostek, wykonanych ze stali nierdzewnej. Pierwsza jednostka połączona jest hydraulicznym obiegiem z celami „-” elektrolizera i separatorem tlenu. Druga natomiast, połączona jest hydraulicznym obiegiem z celami „+” elektrolizera i separatorem wodoru. Obieg elektrolitu zapewniają zespoły pompowe (rys. 13).



Rys. 12. Zespół chłodnicy elektrolitu – model 3D:

1 - rura płaszczka wodnego, 2 - rura transportująca elektrolit, 3 - przyłącza rurociągu wodnego, 4 - przyłącza hydrauliczne

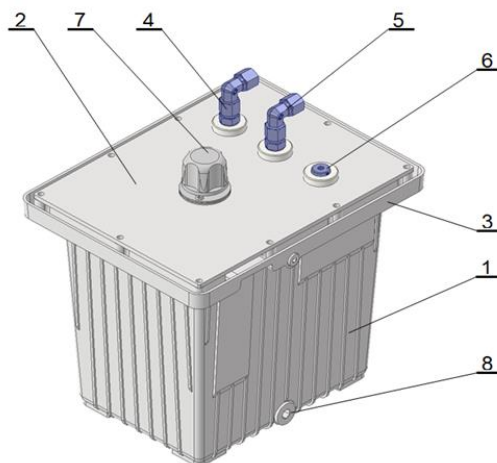


Rys. 13. Zespół pompowy – model 3D:

1 - silnik elektryczny, 2 - pompa hydrauliczna, 3 - obudowa sprzęgła, 4 i 5 - przyłącza hydrauliczne

Zespół zbiornika wody doładowania

W skład zespołu (rys. 14) wchodzi zbiornik wody, który jest jednostką handlową i zapewnia wystarczającą jej ilość w przypadku konieczności uzupełnienia w układzie hydraulicznym elektrolizera. Jest to konstrukcja, wyposażona w kołnierz zabezpieczający przed przedostaniem się cieczy na zewnątrz podczas eksploatacji bądź napełniania zbiornika. W pokrywie znajdują się dwa przyłącza hydrauliczne, jedno gniazdo rezerwowe (zaślepienie) oraz filtr oddechowy. Zbiornik posiada korek spustowy i nogi z gwintowanymi gniazdami do przykręcenia konstrukcji do podłoża.

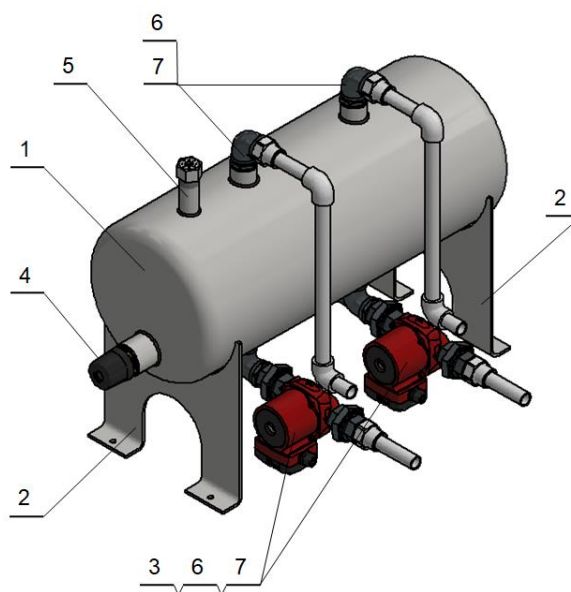


Rys. 14. Zespół zbiornika wody doładowania – model 3D: 1 - zbiornik, 2 - pokrywa, 3 - kołnierz zbiornika, 4 i 5 - przyłącza hydrauliczne, 6 - korek zaślepiający, 7 - filtr oddechowy, 8 - korek spustowy

Zespół zbiornika wody

Zespół zbiornika wody (rys. 15) przeznaczony jest do magazynowania wody i dostarczania jej do chłodziń elektrolitu. Pierwotnie zespół zbiornika wyposażony był w jedną pompę obiegową, jednak w trakcie prowadzenia prac projektowych, zespół autorski zdecydował się na zastosowanie drugiej, takiej samej pompy. Takie podejście umożliwi pełną kontrolę temperatury elektrolitu w obu chłodziaczach. Dodatkowo, zbiornik wyposażono w grzałkę elektryczną, której zadaniem będzie

podgrzewanie wody transportowanej do chłodnic w przypadku, gdyby temperatura elektrolitu podczas pracy elektrolizera była zbyt niska, co mogłoby powodować spadek sprawności urządzenia.



Rys. 15. Zespół zbiornika wody – model 3D: 1 - zbiornik, 2 - wsporniki, 3 - pompy obiegowe, 4 - grzałka, 5 - odpowietrznik, 6 - przyłącza hydrauliczne, 7 - rurociągi wody

4. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono stan techniki, jak również perspektywy rozwoju przemysłu elektrolizerów w niedalekiej przyszłości. Przybliżono prowadzone w ITG KOMAG prace projektowe i badawcze laboratoryjnego modelu elektrolizera alkalicznego. Na podstawie pozyskanej wiedzy oraz doświadczenia podczas prowadzenia prac badawczych elektrolizera, specjaliści ITG KOMAG wystąpili z wnioskiem o dofinansowanie projektu badawczego na budowę i przeprowadzenie badań elektrolizera w wersji komercyjnej. Dofinansowanie w ramach naboru 1/2023 Proof of Concept, ze środków 2. Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG) zostało przyznane, a projekt pod tytułem: Wysokociśnieniowy Elektrolizer Alkaliczny 200 bar (akronim: HiPE 200) jest realizowany.

Elektrolizer alkaliczny w formie zaproponowanej przez KOMAG, jest całkowitą nowością na rynku elektrolizerów. Dzięki technicznym i technologicznym przewagom nad innymi rynkowymi rozwiązaniami oraz przy podkreśleniu, że jest to polski produkt, zainteresowanie rynku tym rozwiązaniem jest bardzo duże. Zaczynając od dużych spółek chcących zainwestować w tą technologię, poprzez podmioty mające w swoim portfolio produkcję elektrolizerów i chcących rozszerzyć swój zakres produkcji, aż po instytucje publiczne typu szkoły i uczelnie wyższe, oczekujące na dostarczenie stanowisk edukacyjnych do celów kształcenia specjalistów w zakresie elektrolizy. W związku z powyższym, KOMAG podjął rozmowy z partnerami przemysłowymi zainteresowanymi wdrażaniem na rynku systemów opartych o wysokociśnieniowy elektrolizer. W zależności od wielkości elektrolizera będą to różne podmioty. Przewiduje się, że w ramach wdrożenia powstaną rozwiązania o mocach 5 kW, 50 kW i wielokrotności 50 kW.



Literatura

1. Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Bessarabov, D. G., & Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 34346–34377
2. <https://globenergia.pl/jakie-elektrolizery-stosuje-sie-do-produkcji-wodoru> [dostęp 25-11-2024]
3. http://zs9elektronik.pl/inne/karolina/podr_4_elektrolizery.pdf [dostęp 25-11-2024]
4. Barbir, F.: PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources. *Solar Energy* 2013, 78(5), 661–669
5. <https://decentralisedhydrogen.com/2024/03/13/przewodnik-po-technologiach-elektrolizerow-wodoru-od-teorii-do-praktycznych-zastosowan> [dostęp 25-11-2024]
6. Bhandari, R., Trudewind, C. A., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – A review. *Journal of Cleaner Production*, 85, 151–163
7. <https://h2poland.eu/pl/kategorie/produkcja/zielony-wodor-z-oze/elektroliza-klucz-do-gospodarki-niskoemisyjnej> [dostęp 25-11-2024]
8. <https://wysokienapiecie.pl/82287-elektrolizery-wyprodukuja-wodor-w-polsce> [dostęp 25-11-2024]
9. Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111
10. <https://seshydrogen.com/elektroliza-wody-produkcja-zielonego-wodoru-przebieg-procesu-i-obszary-zastosowania> [dostęp 26-11-2024]
11. Eberle, U., Müller, B., & von Helmolt, R. (2012). Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure: Status 2012. *Energy & Environmental Science*, 5(10), 8780–8798
12. <https://seshydrogen.com/wykorzystanie-wodoru-w-transporcie/> [dostęp 26-11-2024]
13. <https://www.cire.pl/artykuly/opinie/155695-raport-pojazdy-zasilane-wodorem-przyszloscia-transportu-ciezarowego-i-autobusowego> [dostęp 26-11-2024]
14. https://klasterwodorowy.pl/images/zdjecia/9_Analiza_potencjalu_tehnologii_wodorowych_opracowanie.pdf [dostęp 26-11-2024]
15. <https://www.cire.pl/artykuly/przeglاد-prasy/stacje-wodorowe-w-polsce-czy-czeka-nas-rewolucja-paliwowa> [dostęp 27-11-2024]
16. Hosseini S. E., Wahid M. A.: Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016) p. 850–866a
17. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf> [dostęp 27-11-2024]
18. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-resources> [dostęp 27-11-2024]
19. https://www.ey.com/pl_pl/insights/climate-change-sustainability-services/wodor-zielony-niebieski-szary-wszystkie-kolory-wodoru [dostęp 27-11-2024]
20. Instrukcja laboratoryjna 2-OP: badanie elektrolizera i ogniwa paliwowego, Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Gdańskiej, POWR.03.05.00-00-Z044/17
21. Sakr I. M., Mahrous A-F. M., Balabel A., Ibrahim K.: Experimental investigation of the operating parameters affecting hydrogen production process through alkaline water electrolysis, *The International Journal of Thermal & Environmental Engineering*, Volume 2, No. 2, 2011, p. 113-116



22. Kotowicz J., Szykowska K.: Wodór i współczesne metody jego produkcji oraz wykorzystania. Rynek Energii Nr 2 (153) – 2021, 23-29
([https://www.cire.pl/filemanager/Materia%C5%82y%20Problemowe%20\(Wies%C5%82aw%20Drozdowski\)%20/a591c92b9567b0a8c75e665de2cc9c1c5a2eb448e5e16cc32583fe6fba424d0a.pdf](https://www.cire.pl/filemanager/Materia%C5%82y%20Problemowe%20(Wies%C5%82aw%20Drozdowski)%20/a591c92b9567b0a8c75e665de2cc9c1c5a2eb448e5e16cc32583fe6fba424d0a.pdf) [dostęp 02-01-2025])
23. <https://wysokienapiecie.pl/82850-vestas-wezmie-upadle-st3-offshore/> [dostęp 27-11-2024]
24. Skiba R.: Competency Standards for Emerging Hydrogen Related Activities. Open Journal of Safety Science and Technology, Vol.10 No.2, May 18, 2020
(<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2737574> [dostęp 28-11-2024])
25. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422004381> [dostęp 28-11-2024]
26. <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v321y2022ics0306261922006961.html> [dostęp 28-11-2024]

INDEKS AUTORÓW

Adamczyk Wojciech (rozdz. 5)	Przybyła Grzegorz (rozdz. 5)
Bałaga Dominik (rozdz. 3)	Rak Zbigniew (rozdz. 8)
Bogatyrev Petr (rozdz. 1)	Tarkowski Artur (rozdz. 3)
Budzyński Zdzisław (rozdz. 7)	Siegmund Michał (rozdz. 3)
Chondrokostas Piotr (rozdz. 2, 3)	Sierpowski Korneliusz (rozdz. 4, 9)
Debita Grzegorz (rozdz. 4)	Szkudlarek Zbigniew (rozdz. 3)
Figiel Andrzej (rozdz. 5)	Szturmaj Maja (rozdz. 4)
Gawron Stanisław (rozdz. 1)	Śliwak-Orlicki Tomasz (rozdz. 4)
Górski Krzysztof (rozdz. 4)	Wiśniewski Karol (rozdz. 4)
Janik Bartłomiej (rozdz. 2, 3)	Wójcicki Mateusz (rozdz. 9)
Kaczmarczyk Krzysztof (rozdz. 3)	Życzkowski Piotr (rozdz. 2, 3)
Kalita Marek (rozdz. 2, 3)	
Korski Jacek (rozdz. 6, 8)	
Krawczyk Piotr (rozdz. 2, 3)	
Kuczera Zbigniew (rozdz. 2, 3)	
Łuczak Rafał (rozdz. 2, 3)	
Mikoś Jan (rozdz. 1)	
Niedworok Andrzej (rozdz. 5)	
Nieśpiałowski Krzysztof (rozdz. 3, 9)	
Nocoń Adrian (rozdz. 5)	
Obrębski Marek (rozdz. 2, 3)	
Polnik Bartosz (rozdz. 4, 7)	