Bartosz Polnik Bogdan Miedziński

INNOWACYJNY UKŁAD ZASILAJĄCO-STERUJĄCY GÓRNICZEJ LOKOMOTYWY AKUMULATOROWEJ

Prace Naukowe - Monografie



Gliwice 2023

https://doi.org/10.32056/KOMAG/Monograph2023.2

Bartosz Polnik Bogdan Miedziński

Innowacyjny układ zasilająco-sterujący górniczej lokomotywy akumulatorowej

Autorzy:

dr inż. Bartosz Polnik – Instytut Techniki Górniczej KOMAG prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński – Politechnika Wrocławska

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Marek Jaszczuk - Politechnika Śląska dr hab. inż. Leszek Pawlaczyk, prof. Politechniki Wrocławskiej dr hab. inż. Krzysztof Kotwica, prof. Akademii Górniczo-Hutniczej dr hab. inż. Tomasz Trawiński, prof. Politechniki Śląskiej

Redaktorzy techniczni:

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

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą "Doskonała nauka", nr projektu DNM/SN/547636/2022, kwota dofinansowania 15000,00 zł, całkowita wartość projektu 16666,67 zł.

Copyright by Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2023

Wydawca:

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

ISBN 978-83-65593-17-7



NC Open Access (CC BY-NC 4.0)

Spis treści

		str.
1.	Wstęp	1
2.	Analiza wymagań formalnych, sposobów rozwiązań i parametrów użytkowych wybranych, stosowanych układów zasilająco- sterujących lokomotyw akumulatorowych	3
	2.1. Wymagania formalne związane z bezpieczeństwem użytkowania	3
	2.2. Charakterystyka rozwiązań i parametrów użytkowych układów górniczych lokomotyw akumulatorowych	7
	2.2.1. Lokomotywy akumulatorowe stosowane w krajowych kopalniach	7
	2.2.2. Przykłady rozwiązania układów sterowniczych	13
3.	Badania możliwości użytkowych wybranych układów napędowych górniczej lokomotywy akumulatorowej	20
	3.1. Ocena sprawności oraz bilansu energii układu zasilająco- sterującego	20
	3.2. Ocena praktycznej możliwości odzysku energii w procesie hamowania.	25
	3.3. Ocena warunków pracy silnika elektrycznego lokomotywy akumulatorowej dla wybranych lokalizacji	37
4.	Koncepcja innowacyjnego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej	45
	4.1. Dobór układu zasilania, sterowania i napędu	46
5.	Badania modelu fizycznego na stanowisku badawczym w symulowanych warunkach pracy	56
	5.1. Charakterystyka i sposób rozwiązania stanowiska badawczego	56
	5.2. Sposób i zakres prowadzenia badań	58
	5.3. Analiza uzyskanych wyników z badań	60
6.	Analiza symulacyjna i badania poziomu stężenia wodoru i jego rozpływu w osłonie baterii ogniw kwasowo-ołowiowych w warunkach ładowania	68

	6.1. Badania symulacyjne w celu określenia miejsc lokalizacji czujników wodoru podczas badań w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych pracy	68
	6.2. Badania i analiza pracy wybranych akumulatorowych źródeł energii elektrycznej lokomotywy górniczej podczas ładowania w komorze ładowania w kopalni	76
	6.3. Badania przebiegu procesu ładowania w symulowanych warunkach laboratoryjnych	84
7.	Propozycja rozwiązania systemu sterowania bezpieczną pracą zarówno innowacyjnego układu, jak i pracą istniejących w praktyce układów sterowania górniczych lokomotyw	
	akumulatorowych	100
	7.1. Sposób rozwiązania systemu i dobór jego elementów podstawowych	101
	7.2. Sposób współpracy systemu z nowoopracowanym innowacyjnym układem zasilająco-sterującym	106
	7.3. Badania laboratoryjne opracowanego systemu monitowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych	110
8.	Wnioski szczegółowe	115
	Literatura	119
	Streszczenie	127
	Abstract	129

1. Wstęp

W podziemnych wyrobiskach górniczych przewóz ludzi, a także transport materiałów i urobku stanowią jedno z ważniejszych ogniw procesu technologicznego wpływających zarówno na poziom bezpieczeństwa, jak i na efektywność produkcji. Transport ten wykorzystuje w znacznym stopniu zarówno lokomotywy spągowe, jak i ciągniki podwieszone. W przypadku maszyn spągowych, ze względu na sposób zasilania, można wyróżnić trzy podstawowe rodzaje stosowanych lokomotyw górniczych [2, 30, 31, 32, 50]:

- a) spalinowe stanowiące obecnie większość taboru wyposażenia kopalń,
- b) trakcyjne poruszające się w głównych chodnikach kopalnianych,
- c) akumulatorowe nie wymagające zewnętrznego zasilania.

W przypadku stosowania lokomotyw elektrycznych ich zasilanie realizowane jest za pomocą tzw. kabla wleczonego (przewodu oponowego). Rzadko natomiast wykorzystywane jest autonomiczne zasilanie akumulatorowe.

Z uwagi na problemy związane z przewietrzaniem wyrobisk podziemnych, aktualne tendencje wymuszają konieczność ograniczenia stosowania maszyn spalinowych na rzecz napędów elektrycznych [45, 51]. Obecnie, w najgłębszych pokładach, podczas drążenia przodków, wydobycie urobku oraz jego transport opiera się głównie na wykorzystaniu napedów elektrycznych [50]. Należy jednak zdać sobie sprawę, że maszyny transportowe zasilane energią elektryczną mają ograniczony zasięg stosowania. Wynika on z pojemności akumulatorów (w przypadku maszyn zasilanych z baterii ogniw), albo, tak jak to jest w przypadku lokomotyw trakcyjnych, z ograniczeń związanych z dostępnością i realną możliwością realizacji trakcji pod ziemią [2, 32, 34, 40]. Stosowanie coraz dłuższych kabli zasilających powoduje zwiększenie zarówno wartości spadku napięcia, jak i strat mocy w tych kablach. Zwiększa się również, wraz z ich długością, możliwość uszkodzenia mechanicznego zastosowanych kabli. Rozwiązaniami przyszłościowymi wydają się być w tej sytuacji, maszyny zasilane z baterii akumulatorów oraz/i maszyny zasilane z trakcji elektrycznej. Należy jednak zaznaczyć, że lokomotywy trakcyjne, z uwagi na sposób zasilania, mogą pracować wyłącznie w tzw. pomieszczeniach typu "a" zagrożenia wybuchem metanu [6, 7, 58]. Uniemożliwia to więc ich szersze stosowanie w innych rejonach kopalni, zwłaszcza w tzw. obszarach przyprzodkowych czyli tam, gdzie koniecznym i przewidywanym jest wyeliminowanie maszyn z napędem spalinowym. W tej sytuacji, pozostają do dyspozycji wyłącznie lokomotywy i ciągniki akumulatorowe. Mogą one, z uwagi na swoją mobilność

oraz rodzaj budowy, z powodzeniem być wykorzystywane w pomieszczeniach zarówno typu "a", "b" i "c" zagrożenia wybuchem metanu, jak i w pomieszczeniach A i B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego [14, 53, 58]. Należy w tym miejscu podkreślić, że lokomotywy akumulatorowe dorównują mobilnością lokomotywom spalinowym, przewyższając je przy tym sprawnością, jak i niższym poziomem emisji szkodliwych gazów. Wyższa sprawność lokomotyw akumulatorowych wpływa również dodatkowo na ograniczenie emisji ciepła do atmosfery kopalnianej [51, 56]. Zatem w celu efektywniejszego i bezpieczniejszego wykorzystania tych maszyn, należy przede wszystkim, odpowiednio zwiększyć sprawność stosowanych lokomotyw i/oraz ciągników z napędem elektrycznym. Osiągnięcie powyższego celu, może być zrealizowane, głównie poprzez zwiększenie sprawności elektrycznej całego tzw. układu zasilająco-sterującego. Pod tym pojęciem rozumie się łącznie: elektryczny układ połaczenia baterii ogniw, zespołu sterowania oraz zastosowanego elektrycznego silnika napędowego. Zastosowany układ napędowy powinien charakteryzować się również możliwością dwukierunkowego przesyłania energii elektrycznej (możliwością realizacji odzysku energii).

W stosowanych dotychczas rozwiązaniach tego typu układów, wykorzystuje się baterie ogniw kwasowo-ołowiowych, charakteryzujące się dużymi gabarytami oraz długim czasem ładowania [13, 38, 42, 65, 66, 67, 68, 69, 75]. Technologiczny rozwój nowoczesnych ogniw wtórnych, umożliwia aktualnie wykorzystanie baterii jonowych charakteryzujących się przede wszystkim, dużo lepszymi parametrami elektrycznymi. Baterie te, jednakże są nie tylko droższe od dotychczas stosowanych, ale z uwagi na brak wiarygodnych danych technicznych, dotyczących bezpiecznego ich wykorzystania, wymagają przeprowadzenia szeregu specjalistycznych i drogich badań w celu dopuszczenia ich do użytkowania w górnictwie, w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem. Z uwagi na powyższe, należy rozważyć zwiększenie sprawności aktualnie stosowanych lokomotyw elektrycznych. Może być to zrealizowane na drodze modyfikacji, tak układu napędowego, jak i układów sterowania. Jedną z propozycji, w tym zakresie, może stanowić wykorzystanie odpowiedniego, do celów trakcyjnych, silnika synchronicznego z magnesami trwałymi [10, 27, 43, 44, 73, 74].

2. Analiza wymagań formalnych, sposobów rozwiązań i parametrów użytkowych wybranych, stosowanych układów zasilającosterujących lokomotyw akumulatorowych

W górnictwie światowym stosowane są różne, nowoczesne rozwiązania lokomotyw akumulatorowych [5, 22, 36, 37, 40, 47, 59, 61, 62, 70, 87, 88, 90, 91]. Takie firmy, jak Clayton Equipment czy Brookvill Corporation, z powodzeniem od ponad 30 lat, projektują i wdrażają górnicze lokomotywy akumulatorowe o zróżnicowanych parametrach technicznych. Z uwagi jednak na rygorystyczne przepisy krajowe, dotyczące bezpiecznej pracy tych maszyn oraz specyfikę kopalnianych torowisk, większość rozwiązań zagranicznych, na chwilę obecną nie może zostać bezpośrednio wdrożona do pracy w górnictwie.

2.1. Wymagania formalne związane z bezpieczeństwem użytkowania

Wymogi formalne odnośnie bezpieczeństwa pracy i ochrony zdrowia, dotyczące stosowania maszyn akumulatorowych w podziemnych wyrobiskach górniczych, zostały sprecyzowane w czterech dyrektywach:

- a) Dyrektywa 2014/34/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (potocznie nazywana dyrektywą ATEX).
- b) Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE.
- c) Dyrektywa 2014/35/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku sprzętu elektrycznego przewidzianego do stosowania w określonych granicach napięcia.
- d) Dyrektywa 2014/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej.

Powyższe dyrektywy, wspierane przez szereg norm zharmonizowanych, w sposób jednoznaczny określają wymagania bezpieczeństwa pracy maszyn zasilanych z baterii akumulatorów. Zgodnie bowiem z dyrektywą maszynową, w przypadku, gdy maszyna zasilana jest energią elektryczną, musi ona być zaprojektowana, wykonana i wyposażona w sposób jednoznacznie zapobiegający lub umożliwiający zapobieżenie wszelkim zagrożeniom o charakterze elektrycznym [77]. Maszyny powinny być więc tak zaprojektowane i skonstruowane, aby zapobiegać lub ograniczać gromadzenie się potencjalnie niebezpiecznych ładunków elektrostatycznych lub powinny być wyposażone w odpowiedni układ do ich rozładowywania [77]. Maszyna powinna być ponadto zaprojektowana i wykonana w taki sposób, aby uniknąć jakiegokolwiek ryzyka wywołania pożaru lub przegrzania spowodowanego przez nią samą albo gazy, ciecze, pyły, opary lub inne substancje przez nią wytwarzane lub używane podczas jej eksploatacji [77]. Maszyna powinna być również tak zrealizowana, aby nie występowało żadne ryzyko wybuchu spowodowanego przez nią samą lub przez gazy, ciecze, pyły, pary oraz inne substancje przez nią wytwarzane lub używane podczas jej eksploatacji. Jeżeli występuje zatem teoretyczne ryzyko wybuchu, spowodowanego eksploatacją maszyny (w przestrzeniach zagrożonych potencjalnym wybuchem) to powinna spełniać ona wymagania przepisów wspólnotowych dyrektyw szczególnych [77]. Maszyny tego typu powinny być ponadto wyposażone w urządzenia odłączające je od wszystkich źródeł energii. Urządzenia takie powinny być również wyraźnie oznakowane. Koniecznym jest zapewnienie możliwości zablokowania takich urządzeń, jeżeli ponowne podłączenie ich do zasilania mogłoby zagrażać użytkującym je osobom. Należy również zapewnić możliwość zablokowania urządzenia elektrycznego w przypadkach, gdy operator nie ma możliwości sprawdzenia jego odłączenia od źródła energii z każdego dostępnego mu miejsca [77]. Obudowa akumulatora powinna być tak zaprojektowana i wykonana, aby uniknąć wylania się (wycieku) elektrolitu na operatora (w przypadku wywrócenia się lub przechylenia maszyny) oraz gromadzenia się oparów w miejscach pracy operatorów. Powinna być również zapewniona możliwość odłączenia, bez trudności, akumulatora za pomocą łatwo dostępnego narzędzia przewidzianego do tego celu [77].

Zgodnie z dyrektywą ATEX urządzenia i systemy ochronne, przeznaczone do użytkowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, powinny być zaprojektowane pod kątem tak zwanego zintegrowanego bezpieczeństwa przeciwwybuchowego.

W związku z tym należy podjąć takie środki, aby:

 a) o ile to możliwe, zapobiec, przede wszystkim, pojawianiu się przestrzeni zagrożonych wybuchem, powodowanym przez same urządzenia i/lub systemy ochronne,

- b) zapobiec powstaniu zapłonu, w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, uwzględniając charakter każdego źródła zapłonu, elektrycznego i/lub nieelektrycznego,
- c) w przypadku, gdyby mimo wszystko doszło do wybuchu (zdolnego zagrozić swym działaniem, bezpośrednim lub pośrednim, bezpieczeństwu osób i w odpowiednim przypadku, zwierząt domowych lub mienia), należy natychmiast wybuch ten powstrzymać i/lub ograniczyć zasięg płomienia i ciśnienia wybuchu do wystarczającego poziomu bezpieczeństwa [78].

Aby uniknąć, na ile jest to możliwe, sytuacji niebezpiecznych, urządzenia i systemy ochronne powinny być zaprojektowane i wykonane dopiero po przeprowadzeniu odpowiedniej analizy ryzyka odnośnie do możliwych potencjalnych przyczyn uszkodzeń podczas użytkowania. Możliwości nieprawidłowego użytkowania, które są możliwe do przewidzenia, powinny być również brane pod uwagę [78]. Urządzenia i systemy ochronne powinny być ponadto zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby działały niezależnie od otaczających, aktualnych lub przewidywanych w przyszłości, warunków przestrzennych [78]. Nie mogą pojawiać się zatem potencjalne źródła zapłonu takie jak iskry, płomienie, łuki elektryczne, wysokie temperatury powierzchni, energia akustyczna, promieniowanie optyczne, fale elektromagnetyczne i inne potencjalne źródła zapłonu [78]. Ponadto należy zapobiegać występowaniu (na częściach elektrycznie przewodzących urządzenia) prądów błądzących lub upływowych, sprzyjających powstawaniu niebezpiecznej korozji, przegrzewaniu powierzchni lub iskrzeniu zdolnemu do wywołania zapłonu [78]. Urządzenia powinny być zatem wyposażone w odpowiednie środki zabezpieczające, tak aby:

- a) w przypadku awarii jednego ze środków zabezpieczających, przynajmniej drugi niezależny środek zapewniał wymagany poziom zabezpieczenia,
- b) albo wymagany poziom bezpieczeństwa był zapewniony w przypadku wystąpienia dwóch niezależnych od siebie uszkodzeń [78].

Powyższe wymagania obu dyrektyw stanowią podstawę do oceny poziomu bezpieczeństwa pracy i ochrony zdrowia oraz obsługi podczas konstruowania górniczych maszyn akumulatorowych. Dyrektywy te obligują zatem projektantów i konstruktorów do stosowania odpowiednich norm zharmonizowanych określających szczegółowe wymagania odnośnie do poziomu bezpieczeństwa jakie należy zapewnić przed wprowadzeniem maszyny do pracy w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem. Przed wprowadzeniem maszyny do pracy w podziemiach zagrożonych wybuchem, należy zapewnić jej odpowiedni stopień ochrony przeciwwybuchowej. Źródłem potencjalnych zagrożeń wybuchem, w lokomotywie, jest jej wyposażenie elektryczne stanowiące newralgiczną część układu zasilająco-sterującego. Zabezpieczenie wyposażenia elektrycznego lokomotywy akumulatorowej realizuje się w sposób opisany w wybranych normach zharmonizowanych. Dla przykładu bezpieczeństwo stosowania wyposażenia elektrycznego w atmosferach potencjalnie zagrożonych wybuchem można zapewnić poprzez:

- a) osłonę ognioszczelną [82],
- b) budowę wzmocnioną [84],
- c) osłonę gazową z nadciśnieniem [83],
- d) obudowę hermetyzowaną masą izolacyjną [86],
- e) wykonanie iskrobezpieczne [85].

Źródło zasilania, jakim w lokomotywach akumulatorowych jest bateria ogniw ołowiowych, należy umieścić w obudowie wzmocnionej [81]. Należy jednak pamiętać, że ogniwa ołowiowe w trakcie pracy wydzielają wodór, który w pewnych stężeniach staje się gazem wybuchowym. W związku z powyższym w skrzyni, przedziale i/lub pokrywie akumulatora należy zastosować odpowiednie otwory wentylacyjne, aby nie występowało niebezpieczne stężenie oparów. Podczas oceny rozwiązań odnośnie do wymaganej wentylacji, stężenie gazów elektrolitycznych powinno być mniejsze niż 2% obj., w celu uniknięcia niebezpieczeństwa zapłonu [80].

Wymagania i kryteria oceny skuteczności wentylacji modułu baterii ogniw górniczej lokomotywy określone są w normie PN-EN 60079-7:2016-02 Atmosfery wybuchowe - Część 7: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej "e". Wersja polska. Podstawę oceny skuteczności wentylacji stanowią wyniki badań maksymalnego pomiaru stężenia wodoru wydzielającego się wewnątrz modułu baterii akumulatorów [84]. Ocenę wyników badań przeprowadza się w oparciu o kryterium podane w powyższej normie. Bateria ogniw zatem spełnia kryterium dotyczące skuteczności wentylacji, jeżeli maksymalne stężenie wodoru uzyskane podczas badań nie przekracza 2% obj. [84]. W tym miejscu należy podkreślić, że zastosowanie układów sterowania z równoczesnym odzyskiem energii elektrycznej do źródła (akumulatora) może w istotny sposób zwiększać poziom zagrożenia bezpieczeństwa pracy z uwagi na potencjalne przekroczenie stężenia wodoru podczas eksploatacji. Jak dotychczas problem ten nie znalazł odpowiedniego zrozumienia, w związku z czym ani nie został wystarczająco wyjaśniony odpowiednimi badaniami, ani nie zostały zaproponowane odpowiednie środki zaradcze w tym zakresie.

2.2. Charakterystyka rozwiązań i parametrów użytkowych układów górniczych lokomotyw akumulatorowych

2.2.1. Lokomotywy akumulatorowe stosowane w krajowych kopalniach

Dostępne na świecie różnorodne i nowoczesne konstrukcje lokomotyw akumulatorowych nie mogą być wykorzystywane w krajowym górnictwie, z uwagi na rygorystyczne obowiązujące przepisy w polskim górnictwie. W związku z powyższym w krajowych rozwiązaniach górniczych lokomotyw akumulatorowych nadal stosuje się dość przestarzałe konstrukcje w wersji jedno lub dwu kabinowej. W zależności od rodzaju urobku i specyfiki prac transportowych lokomotywy jednokabinowe, potocznie nazywane "Karlikami" (rys. 2.1), nadal są wykorzystywane głównie do prac manewrowych oraz do transportowania niewielkich ładunków.



Rys. 2.1. Lokomotywa akumulatorowa typu Ldag-05 (Karlik) [10]

Napęd takiej jednokabinowej lokomotywy akumulatorowej (typu Ldag-05), stanowią dwa niezależne szeregowe silniki elektryczne prądu stałego (typu LDs 05a), połączone bezpośrednio z przekładniami mechanicznymi, po jednym zestawie na każdą z dwóch osi napędowych (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Widok układu napędowego lokomotywy typu Ldag-05 [54]

Podstawowe parametry techniczne stosowanych silników prądu stałego typu LDs 05a zestawiono, dla przykładu, w tabeli 2.1.

Podstawowe, parametry techniczne silnika prądu stałego typu LDs 05a [10]

Parametr	Jednostka	Wartość
Moc godzinowa (S2)	[kW]	5,5
Rodzaj pracy	[-]	S1 lub S2-60 min.
Napięcie	[V]	84
Prąd	[A]	81,6 (S2), 40 (S1)
Obroty	[obr/min]	1000 (S1), 700 (S2)
Sprawność	[%]	80,3
Stopień wzbudzenia min/znam/max	[%]	50 / 100 / -
Moment	[Nm]	23 (S1), 75 (S2)
Masa	[kg]	195

Dwukabinowe zaś kopalniane lokomotywy akumulatorowe (np. typu Lea, rys. 2.3), posiadają jednosilnikowy układ napędowy, realizowany początkowo za pomocą szeregowego silnika prądu stałego typu LDs 245 (rys. 2.4) (lub w późniejszych wykonaniach przy zastosowaniu silnika typu LDs 327 (rys. 2.5), którego wał wirnika, wyprowadzony z dwóch stron na zewnątrz kadłuba, umożliwia mechaniczne połączenie bezpośrednio z przekładniami umieszczonymi na każdej z osi napędowych.



Rys. 2.3. Lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM [20]



Rys. 2.4. Silnik prądu stałego typu LDs 245 [54]



Rys. 2.5. Silnik prądu stałego typu LDs 327 [56]

Wybrane użytkowe parametry techniczne silnika typu LDs 245 oraz LDs 327 zestawiono, dla przykładu, w tabeli 2.2.

		Tabela 2.2.
Dane Silnik	LDs 245	LDs 327
Rodzaj pracy	S1/S2	S1/S2
Moc [kW]	15,2/38	19,2/40
Napięcie [V]	144	144
Prąd [A]	120/295	150/308
Moment [Nm]	50/224	110/341
Obroty [obr/min]	2910/1620	1660/1120
Sprawność [%]	88/89	89/90,5

Wybrane parametry	techniczne silnika	typu LDs 245	oraz typu LD)s 327 [56]

Dotychczasowe szerokie wykorzystywanie szeregowych silników elektrycznych prądu stałego, wynikało zarówno z dobrych ich parametrów eksploatacyjnych, jak i braku alternatywy w tym zakresie. Silniki te bowiem charakteryzują się, przede wszystkim, płynną regulacją prędkości obrotowej. Ponadto możliwość regulacji przebiegu charakterystyki momentu napędowego silnika pozwalała na stosowanie układów napędowych bez skrzyni biegów [25, 28]. Do wad silników szeregowych prądu stałego należy zaliczyć bardziej

skomplikowaną, w porównaniu z maszynami indukcyjnymi budowę, większą masę, mniejszą niezawodność eksploatacyjną oraz bardziej kłopotliwą konserwację. W momencie zaprzestania produkcji ognioszczelnych silników prądu stałego, rozpoczęto prace nad poszukiwaniami nowoczesnych rozwiązań zastępujących starsze konstrukcje. W podziemiach kopalń KGHM Polska Miedź, zaczęto stosować lokomotywy akumulatorowe typu AE produkowane przez słowacką firmę PHS Strojarne. Maszyny tego typu (AE rys. 2.6) w zależności od wersji, są wyposażone w jeden lub dwa silniki prądu przemiennego (asynchroniczne) połączone bezpośrednio z przekładniami umieszczonymi na każdej z osi napędowych. Zastosowanie niezależnego ich sterowania pozwala na łatwiejsze wykrywanie i wychodzenie, z występujących podczas pracy maszyny poślizgów kół.



Rys. 2.6. Lokomotywa akumulatorowa typu AE 30 produkcji słowackiej [91]

Z kolei w polskich kopalniach węgla kamiennego zaczęto również korzystać z zagranicznych rozwiązań lokomotyw akumulatorowych np. typu DLPA produkcji Ferrit (Czechy). Taka lokomotywa (rys. 2.7) została przekazana do prób w podziemiach KWK Jankowice.



Rys. 2.7. Lokomotywa akumulatorowa typu DLPA90F produkcji czeskiej [90]

Lokomotywa typu DLPA była bliźniaczym odzwierciedleniem słowackiej konstrukcji typu AE90. Jako napęd służą dwa silniki asynchroniczne o mocy 45 kW każdy, sprzężone z przekładniami mechanicznymi umieszczonymi bezpośrednio na osiach jezdnych. Napięcie zasilania silników tych lokomotyw ma jednak wartość U = 3x230 V, co stwarza zasadniczy problem z punktu widzenia ich eksploatacji w polskich kopalniach (lokomotywy serii Lea zasilane były i są napięciem 144 V). Zastosowanie zatem tego typu lokomotyw wiązałoby się z koniecznością modernizacji ładowni akumulatorów, a tym samym z eliminacją dotychczas stosowanych lokomotyw krajowych. Jedyną zatem na dzień dzisiejszy odpowiedzią krajowych producentów (na zagraniczne rozwiązania górniczych lokomotyw akumulatorowych) jest lokomotywa typu ELA-44 [21, 26] produkcji firmy IZOL-PLAST – rysunek 2.8.



Rys. 2.8. Lokomotywa akumulatorowa typu ELA-44 produkcji polskiej [26]

Lokomotywę typu ELA-44 napędzają dwa trójfazowe silniki asynchroniczne typu dSkg 180L4-EP-f (rys. 2.9), którego podstawowe parametry techniczne zestawiono w tabeli 2.3 [21, 26].



Rys. 2.9. Trójfazowy asynchroniczny silnik typu dSkg 180L4-EP-f [89]

Podstawowe parametry techniczne silnika typu dSkg 180L4-1	EP-f [89]
Ta	abela 2.3.

Parametr	Jednostka	Wartość
Мос	[kW]	22
Rodzaj pracy	[-]	S1
Napięcie	[V]	105
Prąd	[A]	151
Obroty	[obr/min]	1467
Sprawność	[%]	90
Moment	[Nm]	143
Masa	[kg]	222

2.2.2. Przykłady rozwiązań układów sterowniczych

Jednym z ważniejszych do rozwiązania problemów jest odpowiednio oszczędne gospodarowanie energią baterii zastosowanych ogniw w trakcie eksploatacji lokomotyw akumulatorowych. Z tego też względu układy rozruchu oraz regulacji prędkości obrotowej silników są tak konstruowane, aby znacznie ograniczać straty tej energii. Na rysunku 2.10 pokazano przykładowe rozwiązanie układu połączenia silników i baterii ogniw, odpowiadające pozycjom (I-VIII) nastawnika (typu ONLD) sterowania lokomotywy typu Ldag-05 [24].



Rys. 2.10. Układ sterowania lokomotywą akumulatorową typu Ldag-05 [24]

W rozwiązaniu tym, regulację prędkości jazdy lokomotywy uzyskuje się poprzez odpowiednie połączenie elektryczne (szeregowe/równoległe) silników i baterii ogniw oraz dodatkowe bocznikowanie ich obwodów wzbudzenia. Na przykład w pozycji I nastawnika, bateria ogniw podzielona jest na dwie równe części połączone równolegle, zaś silniki M1 i M2 połączone są szeregowo poprzez rezystor dodatkowy (R). Natomiast w pozycji II rezystor R jest zwierany stykami nastawnika, podczas gdy w pozycji III następuje połączenie obu części baterii ogniw w szereg z jednoczesnym dołączeniem rezystancji (R). W pozycji IV rezystor R jest odpowiednio zwierany, zaś w celu zmiany prędkości jazdy lokomotywy (pozycja V) stosuje się odpowiednie bocznikowanie obwodu wzbudzenia silników. Z kolei podczas nastaw w pozycjach VI, VII i VIII silniki M1i M2 połączone są równolegle, przy czym w układzie nastawnika VIII realizowane jest dodatkowe osłabienie pola magnetycznego tych silników, co umożliwia zwiekszenie predkości jazdy lokomotywy [24]. Odpowiedni wiec podział baterii ogniw, przy zastosowaniu jednego stopnia oporowego, umożliwił uzyskanie ośmiu stopni prędkości jazdy. Dla pięciu pozycji rozruchu i jazdy (II, IV, V, VII i VIII) nie wymagane było włączenie w obwód silników rezystancji dodatkowej. W tych bowiem pozycjach nastawnika, całkowita energia pobrana z baterii ogniw jest zamieniana na energie użyteczną w silnikach. Natomiast w pozycjach I, III oraz VI (z rezystancją dodatkową w obwodzie silników), część energii pobieranej, z baterii akumulatorów, jest rozpraszana na ciepło na rezystorze, zaś część jest zamieniana na pracę użyteczną [24]. Producentem powyższego układu sterowania (typu ONLD) lokomotywy akumulatorowej była firma APATOR z Torunia, która w 1988 roku w wyniku załamania się rynku zbytu na maszyny i urządzenia górnicze zaniechała jego produkcji [35]. Z początkiem lat 90-tych w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG rozpoczęto zatem prace nad nową generacją sterowania energoelektronicznego przeznaczonego dla lokomotyw akumulatorowych serii Ldag oraz Lea. Nastawnik (ze sterowaniem elektronicznym) został oznaczony jako ONLD/M. Wprowadzenie takiego rozwiązania nastawnika, z wyposażeniem energoelektronicznym, zapewnia ograniczenie wartości prądu silników na poziomie prądu godzinowego [16]. Możliwe jest wówczas zapewnienie efektywnej pracy lokomotywy podczas całej zmiany roboczej. Uproszczony schemat zmodernizowanych elektrycznych obwodów sterowania lokomotywy akumulatorowej typu Ldag-05 pokazano dla przykładu na rysunku 2.11.



Rys. 2.11. Zmodernizowany schemat obwodów elektrycznych lokomotywy akumulatorowej Ldag-05 [16]

W powyższym układzie elektrycznym zrezygnowano całkowicie z zespołu stykowego (styków elektrycznych) sterowanego "wałkiem" nastawnika. Wybór kierunku jazdy realizowany jest w tym przypadku za pomocą układu dwóch styczników *QA* i *QB* oraz dwóch tranzystorów sterujących *VTA* i *VTB* odpowiadających za zmianę kierunku przepływu prądu w uzwojeniach wzbudzenia silników *M1* i *M2*. Ponadto tranzystory spełniają podwójną rolę zarówno jako łączniki elektryczne, w układzie zmiany kierunku przepływu prądu oraz elementy wykonawcze w układzie regulacji prądu. Powyższe rozwiązanie wykorzystuje zatem minimalną ilość podzespołów, dzięki czemu cały układ mógł być umieszczony w obudowie dotychczasowego nastawnika [16]. W lokomotywach akumulatorowych typu Lea BM-12 sterowanie prędkością lokomotywy odbywało się poprzez szeregowe dołączanie i odłączanie kolejnych sekcji rezystancji ((R1-R3) rys. 2.12) w obwodzie twornika silnika napędowego. Generowana wówczas (w procesie hamowania elektrycznego) energia była zamieniana na ciepło wydzielane na rezystancji hamującej (RH) [39, 55].



Rys. 2.12. Układ sterowania lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12 [55]

Rozwój energoelektronicznych układów sterowania, pozwolił w późniejszych latach na zastosowanie, do sterowania górniczą lokomotywą akumulatorową, przekształtników prądu stałego, co dla przykładu rozwiązania układu TUSO/M lokomotywy Lea BM-12 pokazano na rysunku 2.13 [8, 11, 18, 19].



Rys. 2.13. Obwody główne układu TUSO/M lokomotywy Lea BM-12 [8]

Aparatura elektryczna układu typu TUSO/M została zainstalowana w obudowach ognioszczelnych umieszczonych w dwóch kabinach lokomotywy typu Lea BM-12. Całkowity układ składa się z następujących podzespołów: łącznik prądu stałego, nawrotnik, sterownik elektroniczny, układ "zadawania" (nastawiania) wartości prądu i kierunku jazdy lokomotywy [63]. W układzie TUSO/M zastosowano jeden stopień "osłabienia" wzbudzenia silnika prądu stałego działający przy najwyższej wartości "zadanej" prądu jazdy, załączany automatycznie dla określonej wartości prądu silnika [17, 20, 64]. Układ zasilania i regulacji prędkości obrotowej został wykonany przy wykorzystaniu układów półprzewodnikowych (tyrystorów i diod) i charakteryzował się jednokierunkowym przepływem prądu. Zmiana kierunku obrotów realizowana jest zatem nawrotnikiem (układem styczników). Hamowanie natomiast realizuje się poprzez wykorzystanie diody hamowania VM4. W celu zwiększenia efektywności hamowania, silnik "dowzbudza" się z baterii ogniw poprzez rezystor RW (patrz na schemacie rys. 2.13). Układ TUSO/M stosowany był w lokomotywach typu Lea BM-12 aż do 2005 roku, kiedy to po wejściu Polski do Unii Europejskiej w Polsce zaczęła obowiązywać dyrektywa ATEX, a tym samym zaczęły obowiązywać nowe zasady dotyczące wprowadzenia urządzeń do pracy w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem. Modernizacia lokomotyw typu Lea BM-12, drogą wymiany wyposażenia elektrycznego, wymagała zatem opracowania nowych osłon ognioszczelnych dla tego wyposażenia, spełniających wymagania obowiązującej dyrektywy [41].

Wyposażenie to w nowych obudowach oznaczono symbolem TURO. W obwodzie elektronicznym wymieniono łącznik tyrystorowy, który został zastąpiony układem tranzystorów. Wyposażenie typu TURO użytkowane jest w lokomotywach akumulatorowych do dnia dzisiejszego. Nowoczesne lokomotywy producentów zagranicznych typu AE oraz DLPA, a także krajowe rozwiązanie firmy IZOL-PLAST (lokomotywa typu ELA-44), do napędu wykorzystują trójfazowe silniki asynchroniczne, sterowane za pośrednictwem falownika napięcia. Na rysunku 2.14 pokazano przykładowy układ sterowania tego typu lokomotyw akumulatorowych.



Rys. 2.14. Uproszczony schemat obwodu głównego lokomotyw akumulatorowych napędzanych silnikami asynchronicznymi [57]

Układ energoelektroniczny pokazany na rysunku 2.14 składa się z dwóch falowników niezależnie sterujących dwoma silnikami asynchronicznymi. Sterownik realizuje układ sterowania zamkniętego prędkością, momentem i strumieniem silnika wykorzystując do tego celu, algorytm nieliniowego sterowania tzw. skalarnego, wektorowego i bezpośredniego sterowania momentem [3, 4, 29, 49]. Wielkością "zadawaną" przez maszynistę lokomotyw jest w tym przypadku prędkość obrotowa. Układ sterowania stanowi dwustrefowy układ regulacji prędkości [12, 60, 71]. W zakresie częstotliwości do f = 50 [Hz] utrzymywany jest stały, znamionowy strumień wirnika, powyżej zaś częstotliwości znamionowej następuje odwzbudzanie silnika – strumień ten jest automatycznie zmniejszany [1, 23, 52].

Z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy oraz techniki z zakresu górniczych lokomotyw akumulatorowych stosowanych w podziemiach polskich kopalń wynika, że stosowane w podziemiach polskich kopalń węgla kamiennego lokomotywy akumulatorowe w większości są to rozwiązania krajowe opracowane w połowie ubiegłego wieku. Z uwagi na możliwości techniczne w tamtym okresie czasu, układy zasilająco-sterujące tych lokomotyw cechują się stosunkowo niską sprawnością. Ponadto część z nich nadal jest wyposażona w nastawniki rezystorowe, uniemożliwiające zwrot energii do baterii w procesie hamowania elektrycznego. Z biegiem czasu układy sterowania tych lokomotyw zostały zamienione na rozwiązania wyposażone w elementy półprzewodnikowe. Od tego czasu możliwym było doładowywanie baterii podczas hamowania elektrycznego z rekuperacją energii. Wszystkie lokomotywy wyprodukowane w Polsce, napędzane były silnikami elektrycznymi prądu stałego, które w porównaniu z silnikami prądu przemiennego miały niższą sprawność. Ponadto z czasem zaprzestano ich produkcji, a uszkodzone w wyniku eksploatacji napędy elektryczne były poddawane remontom zamiast wymianie na fabrycznie nowy egzemplarz.

Dopiero po 2010 r., bazując na rozwiązaniach stosowanych za granicą, zaczęły się pojawiać w Polsce lokomotywy akumulatorowe wyposażone w napędy elektryczne bazujące na silnikach prądu przemiennego. Dzięki zastosowaniu do sterowania przekształtników energoelektronicznych, możliwym było odzyskanie energii w szerokim zakresie prędkości obrotowej silnika w czasie hamowania Tego typu rozwiązania umożliwiły poprawę bilansu elektrycznego. energetycznego maszyny akumulatorowej. Niemniej nowe rozwiązania lokomotyw akumulatorowych nie bazują na możliwościach technicznych dostępnych obecnie na rynku, a wykorzystują znane od lat rozwiązania napędów elektrycznych w postaci np. silników prądu stałego. Pomimo dostępności na rynku nowych rozwiązań lokomotyw akumulatorowych produkcji zarówno polskiej, jak i zagranicznej, w dalszym ciągu w podziemiach polskich kopalń przeważają rozwiązania z ubiegłego wieku. Należy również zaznaczyć, że rozwiązania produkowane za granicą nie zawsze nadają się do wykorzystania w warunkach pracy krajowych kopalń węgla kamiennego.

Podsumowując, należy stwierdzić, że brak jest na rynku nowych rozwiązań lokomotyw akumulatorowych wyposażonych w zaawansowane układy zasilająco-sterujące, które pozwolą na maksymalne wykorzystanie możliwości napędu elektrycznego przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa ich eksploatacji w podziemiach kopalń zagrożonych wybuchem.

3. Badania możliwości użytkowych wybranych układów napędowych górniczej lokomotywy akumulatorowej

W związku z opracowaniem nowego układu zasilająco-sterującego zaszła konieczność przeprowadzenia odpowiednich badań rozpoznawczych mających na celu:

- 1. określenie sprawności wybranych pracujących układów zasilającosterujących lokomotyw akumulatorowych,
- 2. określenie możliwości odzysku energii tych maszyn,
- 3. zdefiniowanie stanu pracy silnikowej lub generatorowej układów napędowych na podstawie wybranych lokalizacji ich pracy.

3.1. Ocena sprawności oraz bilansu energii układu zasilającosterującego

Sprawność maszyny, z definicji, jest to stosunek energii (pracy) oddanej (użytecznej) przez zespół napędowy lokomotywy elektryczny (W_{od} - na którą składa się różnica energii pobranej ze źródła przez maszynę pomniejszona o straty energii występujące w maszynie) do energii pobranej ze źródła (W_{pob} – energia na wejściu maszyny).

$$\eta = \frac{W_{od}}{W_{pob}} \tag{3.1}$$

co wyrażając pracę jako iloczyn mocy (P) i czasu (t) przyjmuje znaną postać:

$$\eta = \frac{P_u \cdot t}{P_{pob} \cdot t} \tag{3.2}$$

gdzie:

 P_u – moc użyteczna (moc na wale silnika składająca się z mocy na wejściu silnika pomniejszonej o sumę strat występujących w silniku), *W*,

Ppob – moc pobrana ze źródła (moc na wejściu silnika), W,

t – okres czasu, w którym silnik pracuje, s.

Zależność (3.2) jest prawdziwa tylko dla stałej w czasie mocy $P_u(t) = \text{const.}$ i $P_{\text{pob}}(t) = \text{const.}$ Po skróceniu czasu t w liczniku i mianowniku otrzymuje się chwilową wartość sprawności określoną chwilowymi wartościami mocy. Jeżeli moc jest zależna od czasu P(t) wówczas P(t) = $\frac{dw(t)}{dt}$, a wtedy:

$$W(t) = \int_0^T P(t)dt \tag{3.3}$$

Równanie (3.2) powinno mieć zależność "całkową".

$$\Pi = \int_0^T \frac{Pu(t)dt}{Ppob(t)dt}$$
(3.4)

gdzie: T - czas trwania cyklu, w którym wyznaczana jest sprawność.

Zatem w celu określenia wartości sprawności oraz wyznaczenia bilansu energii w dotychczas stosowanych rozwiązaniach, jak również sformułowania wytycznych do opracowania nowego układu i/oraz zmodernizowania rozwiązań stosowanych należało zaplanować i przeprowadzić odpowiedni zakres badań tak w warunkach laboratoryjnych, jak i rzeczywistych pracy kopalni.

Badania przeprowadzono dla najczęściej stosowanej lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12 (rys. 3.1) pracującej w wybranych lokalizacjach dwóch kopalń węgla kamiennego (KWK Halemba oraz KWK Szczygłowice).



Rys. 3.1. Górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-12 podczas badań w KWK Halemba [56]

W tabeli 3.1 zestawiono wybrane parametry techniczne obiektu badań.

Parametry techniczne górniczej lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12 [56]

Parametr	Jednostka	Wartość
Maksymalna siła uciągu (na haku)	[kN]	16,8
Maksymalna prędkość jazdy	[m/s]	4
Masa lokomotywy	[kg]	12000
Moc silnika elektrycznego	[kW]	15,2 (38)
Rodzaj silnika elektrycznego	[-]	szeregowy prądu stałego

Tabela 3.1.

Rodzaj pracy	[-]	S1 (S2-30 min.)
Napięcie znamionowe	[V]	144
Prąd maksymalny	[A]	350
Pojemność baterii akumulatorów	[Ah]	760 lub 840
Długość między zderzakami	[mm]	5650
Wysokość od główki szyny do końca dachu kabiny	[mm]	1650
Rozstaw torów - wykonanie standardowe	[mm]	600 - 950
Szerokość lokomotywy - dla torów 600-750	[mm]	1050
Szerokość lokomotywy - dla torów 900	[mm]	1100

Trasa jazdy lokomotyw górniczych podczas badań była zróżnicowana i wynikała bezpośrednio z warunków i zakresu pracy tej maszyny. Główne drogi przewozowe były pozbawione nachyleń. Lokomotywy transportowały ładunek o średniej masie około 10 ton. Na rysunku 3.2 pokazano przykładowy widok jednego z obiektów badanych (lokomotywa Lea BM-12) wraz z transportowanym ładunkiem. Należy w tym przypadku zaznaczyć, że wybrana lokomotywa typu Lea BM-12 zasilana była z baterii akumulatorów o znamionowym napięciu U = 144 V DC.

Przyrządy pomiarowe użyte zaś do pomiaru i rejestracji przebiegów prądu i napięcia wymagały dostosowania do zasilania prądem przemiennym o wartości napięcia U = 230 V AC. W celu zatem rozwiązania tego problemu zastosowano przetwornicę napięcia DC/AC o odpowiednio dobranej mocy źródła. Przetwornica ta wymagała jednak zasilania napięciem U = 20-35 V DC stąd, po przeanalizowaniu układu zasilania, zdecydowano się na podłączenie przetwornicy napięcia do obwodu wskaźnika rozładowania baterii TWWO, który pozostaje przez cały czas pod napięciem, idealnie więc nadaje się do zasilania obwodu przetwornicy napięcia. Na rysunku 3.3 pokazano przykładowe rozmieszczenie przyrządów pomiarowych rejestrujących wartości prądu oraz napięcia baterii ogniw.

cd. tabeli 3.1.



Rys. 3.2. Lokomotywa typu Lea wraz z transportowanym ładunkiem [54]



Rys. 3.3. Widok zainstalowanej aparatury pomiarowo-rejestrującej [54]

W efekcie przeprowadzonych badań otrzymano wyniki dla sześciu pełnych cykli jazdy lokomotyw akumulatorowych typu Lea BM-12. W tabeli 3.2 przedstawiono bilans energii oraz obliczoną wartość średnią sprawności zespołu napędowego lokomotywy typu Lea BM-12.

N	Bilans energi	– Sprawność średnia zespołu napędowego	
Nr cyklu badawczego	Suma energii Suma energii pobranej oddanej		
	[kWh]	[kWh]	[•]
Ι	4,85	0,59	0,694
II	4,85	0,58	0,692
II	4,71	0,60	0,696
IV	4,79	0,56	0,696
V	4,81	0,60	0,688
VI	4,81	0,60	0,679
sumarycznie I-VI	28,82	3,53	0,691

Bilans energii z akumulatora oraz średnia sprawność zespołu napędowego z silnikiem prądu stałego podczas badań w cyklach badawczych I - VI [54] Tabela 3.2.

Z przeprowadzonych badań na lokomotywach akumulatorowych typu Lea BM-12, dla dwóch ich wybranych lokalizacji wynika, że sprawność η układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej nie przekracza 70%. Oznacza to, że znaczna część energii pobranej z baterii ogniw jest tracona. Straty występujące w maszynach elektrycznych związane są bowiem ze stratami [52]:

- w uzwojeniach wskutek przepływu prądu (ΔP_{Cu}),
- w rdzeniu: histerezowe i wiroprądowe (ΔP_{Fe}),
- mechanicznymi wskutek tarcia wału w łożyskach, tarcia szczotek o komutator, tarcia części wirujących o powietrze lub o inny czynnik chłodzący (ΔP_m),
- wzbudzenia (ΔP_w),
- w dielektryku wskutek działania przemiennego pola elektrycznego (ΔP_{iz}) .

Powyższe straty, mają według danych literaturowych, następujące przybliżone wartości procentowe:

- straty jałowe od 2 do 4% P_n ,
- straty obciążeniowe od 4 do 8% P_n ,
- straty wzbudzenia od 1 do $3\% P_n$.

Poza stratami mocy czynnej w silniku elektrycznym, należy uwzględnić również straty wynikające z przesyłania prądu przewodami elektrycznymi, straty na złączach energetycznych oraz straty w tyrystorowym łączniku prądu stałego (układzie sterowania). Wszystkie powyższe elementy wpływają bowiem bezpośrednio na obniżenie się wartości sprawności układu zasilająco-sterującego maszyny górniczej.

Zdolność układu zasilająco-sterującego do realizacji efektywnej i bezpiecznej rekuperacji energii (w wyniku hamowania elektrycznego) stanowi istotny czynnik poprawiający w wydatny sposób bilans energetyczny górniczych lokomotyw akumulatorowych.

3.2. Ocena praktycznej możliwości odzysku energii w procesie hamowania

Rekuperacja energii elektrycznej stanowi istotny czynnik w procesie zwiększania sprawności w pojazdach z napędem elektrycznym lub hybrydowym przy wykorzystaniu silników elektrycznych jako źródła energii elektrycznej. Silniki te bowiem w trakcie hamowania elektrodynamicznego przekształcają energię kinetyczną rozpędzonej masy pojazdu na energię elektryczną. Odzyskana w ten sposób energia może być gromadzona w baterii ogniw.

Praktyczna możliwość wykorzystania rekuperacji energii elektrycznej w górniczych lokomotywach akumulatorowych została wzięta pod uwagę w latach 90-tych ubiegłego stulecia. Istotną rolę w unowocześnieniu, usprawnieniu i poprawieniu właściwości eksploatacyjnych kopalnianych maszyn trakcyjnych odegrał Instytut Technik Innowacyjnych EMAG. Zostały wówczas opracowane i wykonane odpowiednio zmodernizowane sterujące zespoły przekształtnikowe wyposażone w łączniki prądu stałego (początkowo tyrystorowe, obecnie tranzystorowe) i układy regulacji przeznaczone do rozruchu, regulacji prędkości i hamowania elektrycznego górniczych lokomotyw akumulatorowych o mocach silników od 12 do 90 kW [63, 64]. Przykładowy uproszczony schemat elektryczny układu do sterowania napędu lokomotywy akumulatorowej lub trakcyjnej z wykorzystaniem tranzystorowego łącznika prądu stałego pokazano na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Uproszczony schemat sterowania z zastosowanym tranzystorowym łącznikiem prądu stałego [64]: **T1** – łącznik okresowy do jazdy lokomotywy,

T2 - łącznik okresowy do hamowania lokomotywy, CIz - człon "zadawania" prądu,

SJ – łącznik jazdy, SP, SL – łączniki do rewersji prądu w obwodzie twornika,

DZ – dioda zwrotna, DH – dioda hamowania, CI – czujnik prądu, ST – sterownik elektroniczny

Uzyskana sprawność lokomotyw wyposażonych w tego typu układ sterowania, w stosunku do rezystorowych układów była wyższa o około 25%, a ponadto w wyniku kontroli wartości prądu w silnikach trakcyjnych, wydłużyła się znacznie żywotność silników oraz przekładni mechanicznych lokomotyw.

Poprawa bilansu energetycznego układu zasilająco-sterującego, wynikająca z możliwości rekuperacji energii w procesie hamowania elektrycznego znajduje również swoje odzwierciedlenie w jego sprawności, jak wynika z zależności (3.5):

$$\eta = \frac{P_u \cdot t}{P_{pob} \cdot t - P_{odd} \cdot t_1} \tag{3.5}$$

gdzie:

 P_u – moc użyteczna (zamieniona na pracę), W,

 P_{pob} – moc pobrana (energia z źródła), W,

 P_{odd} – moc oddana (energia rekuperacji), W,

t – okres czasu, w którym silnik pobiera energię ze źródła, s,

t1 – okres czasu, w którym następuje rekuperacja energii, s.

Każdy zatem, chociażby najmniejszy odzysk energii, będzie odgrywał istotną rolę w zmniejszeniu zużycia energii elektrycznej, czyli w poprawie sprawności elektrycznej lokomotywy akumulatorowej.

Jednak istotnym problemem w tym przypadku, jest zapewnienie odpowiedniego bezpieczeństwa pracy związanego z niekontrolowanym wydzielaniem się gazów elektrolitycznych podczas procesu hamowania elektrycznego. Źródłem zasilania górniczych lokomotyw akumulatorowych są bowiem ogniwa kwasowo-ołowiowe, które w procesie ładowania, bądź doładowania (np. w czasie hamowania elektrycznego) wydzielają niestety wodór [38, 68]. Ilość wydzielanego wodoru z ogniwa zależy między innymi od takich czynników, jak:

- stopień naładowania baterii akumulatorów,
- natężenie prądu ładowania (doładowywania),
- czasu trwania ładowania,
- temperatura elektrolitu.

Z uwagi na fakt, że wodór jest gazem wybuchowym, to w skrzyni, przedziale i/lub pokrywie baterii ogniw należy zastosować odpowiednie otwory wentylacyjne, tak aby nie występowało niebezpieczne stężenie wydzielanych gazów [79]. Efektywność wymaganej wentylacji, powinna być taka, aby stężenie gazów elektrolitycznych nie przekraczało 2% obj., w celu uniknięcia niebezpieczeństwa zapłonu [79]. Z praktyki jednak wynika, że skuteczność wentylacji baterii ogniw w czasie pracy maszyny nie jest w żaden sposób weryfikowana. Z tego więc powodu, koniecznym było przeprowadzenie odpowiednich badań mających na celu wyjaśnienie, czy istnieje konieczność monitorowania stopnia stężenia wodoru w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy, przy zachowaniu odpowiedniej efektywności procesu hamowania elektrycznego z odzyskiem energii [56, 57].

Obiektem badań w rzeczywistych warunkach kopalni był układ zasilającosterujący górniczych lokomotyw akumulatorowych typu Lea BM-12 i Lea 12P3A – rysunek 3.5.



Rys. 3.5. Badane lokomotywy akumulatorowe [56]

Układ zasilająco-sterujący (rys. 3.6) badanych lokomotyw akumulatorowych składa się z następujących podzespołów:

- baterii zasilającej,
- łącznika energoelektronicznego prądu stałego DC-DC,
- elektrycznego silnika napędowego.



Rys. 3.6. Uproszczony schemat blokowy obiektu badań [54]

Podstawowe parametry techniczne poszczególnych podzespołów układu zasilająco-sterującego zestawiono w tabeli 3.3.

Obiekt Dane	Moc [kW]	Napięcie [V]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Pojemność baterii [Ah]	Prąd [A]
Lea BM-12	15,2	144	2910	840	120
Lea 12P3A	19,2	144	1660	840	150

Parametry techniczne badanych układów zasilająco-sterującego [57]

Tabela 3.3.

Badania przeprowadzono w wyrobisku korytarzowym jednej z krajowych kopalń węgla kamiennego. W czasie badań mierzono i rejestrowano następujące parametry:

- stężenie wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw kwasowoołowiowych,
- natężenie oraz charakter przebiegu prądu elektrycznego płynącego do baterii w czasie hamowania silnikiem elektrycznym, z rekuperacją energii.

Pomiar poziomu stężenia wodoru przeprowadzano za pomocą dwóch zastosowanych czujników katalitycznych typu MX4, mierzących i rejestrujących stężenie wodoru w zakresie od 0 do 100% DGW (dolna granica wybuchowości) z dokładnością do \pm 1%. Poza stężeniem wodoru, zastosowane czujniki mierzą również wartość temperatury. Czujniki gazu typu MX4 zbudowane są jako urządzenie przeciwwybuchowe z cechą Ex ia IIC T4 Ga, co umożliwiało ich bezpieczne zastosowanie w komorze baterii ogniw (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Rozmieszczenie czujników MX4 we wnętrzu osłony bateryjnej [54]

Sposób doboru miejsc lokalizacji czujników stężenia wodoru wynikał z konstrukcji budowy ognioszczelnej osłony baterii SBS-4 oraz kierunku jazdy lokomotywy. Czujniki stężenia wodoru umieszczone we wnętrzu naładowanej baterii ogniw rejestrowały poziom stężenia wodoru podczas pracy lokomotywy górniczej aż do momentu rozładowania badanej baterii. Pomiar trwał przez około 4 zmiany robocze (ok. 24 h). Rejestrowano procentowe stężenie wodoru DGW (Dolna Granica Wybuchowości). Wykonane przeliczenie ze stężenia procentowego na objętościowe wynikało z potrzeby określenia wybuchowego stężenia wodoru (wodór w powietrzu jest gazem wybuchowym w stężeniu od 4 do 75% obj.). Do przeliczeń jako 100% DGW przyjęto wartość 4% obj. Odniesienie % DGW do zapisu z normy PN-EN 1889-2+A1:2010, dotyczące konieczności przewietrzania skrzyni akumulatorowej (tak, aby stężenie wodoru nie przekraczało 2% obj.) skutkowało tym, że pomiar poziomu stężenia wodoru poniżej 50% DGW oznaczał spełnienie wymagań bezpieczeństwa. Należy podkreślić, że przekroczenie poziomu stężenia wodoru powyżej 50% DGW nie stanowiło zagrożenia, a jedynie sygnalizowało niespełnienie wymogów normy. Realne zagrożenie wybuchem wodoru pojawia się zatem w przypadku przekroczenia poziomu jego stężenia dopiero powyżej 90% DGW. Pomiar natężenia oraz kształtu przebiegu prądu elektrycznego mierzono i rejestrowano za pośrednictwem odpowiedniej sondy prądowej (rys. 3.8).



Rys. 3.8. Zespół urządzeń do pomiaru natężenia i kształtu prądu [54]

Z uwagi na fakt, że emisja wodoru następuje tylko podczas procesu ładowania (doładowania) ogniw, rejestrowano przebiegi prądu wyłącznie w czasie hamowania silnikiem elektrycznym, z odzyskiem energii. Zarejestrowane w czasie badań przebiegi natężenia prądu okazały się być okresowe, ale o charakterze zanikającym, co znacząco utrudniało ich analizę. Każdy przebieg składał się bowiem z dwóch części: biegu jałowego (przejścia w tryb hamowania) oraz hamowania. Przykładowe zarejestrowane przebiegi natężenia prądu doładowującego baterię pokazano na rysunku 3.9. Hamowanie elektryczne lokomotywy odbywało się każdorazowo podczas przepływu prądu o amplitudzie $I_M = 300$ A, zaś jego czas (od momentu rozpoczęcia procesu hamowania aż do zatrzymania lokomotywy) wynosił 3 s. Tak zwane zaś hamowanie manewrowe (wytracanie prędkości) odbywało się poprzez jazdę na biegu jałowym (faza przejścia pomiędzy pracą, a hamowaniem elektrycznym). Hamowanie elektryczne, z rekuperacją energii, prowadziło oczywiście do zatrzymania się lokomotywy.


Rys. 3.9. Wybrane dla przykładu (o różnych czasach trwania) przebiegi prądu zarejestrowane podczas badań lokomotywy Lea BM-12 [54]

Najwyższe stężenie wodoru (rys. 3.10) rejestrowano zazwyczaj podczas pracy pierwszej zmiany roboczej. W tym miejscu należy wyjaśnić, że wysokie

stężenie wodoru, zarejestrowane podczas pierwszej zmiany roboczej, wynika z faktu, że bateria jest w pełni naładowana, a hamowanie elektryczne z rekuperacją energii powoduje doładowanie ogniw i emisję wodoru. Ponadto w trakcie trwania pierwszej zmiany, ruch maszyn transportowych jest najbardziej intensywny. Podczas kolejnych zmian pracy kopalni przebiegi stężenia wodoru nie różniły się jednak zbyt znacząco (stężenie wodoru nie przekraczało 20% DGW-0,8% obj.)



Rys. 3.10. Przykładowy przebieg poziomu stężenia wodoru zarejestrowany podczas pracy lokomotywy typu Lea BM-12 [54]

Badania układu zasilająco-sterującego innej górniczej lokomotywy akumulatorowej typu Lea 12P3A wykazały, że amplituda prądu wynosiła $I_M = 600$ A i była dwukrotnie wyższa niż w przypadku pracy układu zasilającosterującego z lokomotywą typu Lea BM-12. Średnia wartość skuteczna tego prądu była również wyższa niż w przypadku lokomotywy Lea BM-12 i wynosiła $I_{Sr} \approx 400$ A. Na rysunku 3.11 przedstawiono przykładowe przebiegi natężenia prądu dla lokomotywy Lea 12P3 A, zarejestrowane podczas pierwszej zmiany roboczej. Czas trwania hamowania lokomotywy, z uwagi na wyższą wartość prądu, był o 30% krótszy i wynosił 2 s. Różnica wartości natężenia prądu pomiędzy badanymi obiektami wynikała z zastosowanego ogranicznika prądu w układach sterowania lokomotyw, napędzanych silnikiem prądu stałego typu LDs-245. Układy sterowania dedykowane bowiem dla lokomotyw typu Lea 12P3A, wyposażonych w silnik napędowy prądu stałego typu LDs-327, nie posiadały ogranicznika prądu. Skutkowało to wzrostem efektywności hamowania i sprawności całego układu zasilająco-sterującego. Dzięki temu można było zmieniać parametry elektryczne silnika, poprzez np. obniżanie jego prędkości obrotowej.



Rys. 3.11. Przykładowe przebiegi prądu zarejestrowane podczas pracy lokomotywy Lea 12P3A w warunkach hamowania [54]

Dla lokomotywy typu Lea 12P3A najwyższy poziom stężenia wodoru (rys. 3.12) zarejestrowano również podczas pierwszej zmiany - 60% DGW (2,4% obj.), ponadto w trakcie trwania drugiej zmiany stężenie wodoru przekraczało 40% DGW (1,6% obj.). Dopiero na trzeciej zmianie, stężenie wodoru spadło poniżej 20% DGW (0,8% obj.). Wysokie stężenie wodoru zarejestrowane podczas pierwszej zmiany wynikało z tych samych uwarunkowań warunków pracy, co w przypadku badań lokomotywy Lea BM-12. Jego wartość, przewyższająca wartości zarejestrowane wcześniej, wynikała z większego natężenia prądu jaki płynął do baterii w czasie hamowania elektrycznego lokomotywy Lea 12P3A, w porównaniu z lokomotywą Lea BM-12.



Rys. 3.12. Przykładowy przebieg stężenia wodoru zarejestrowany podczas pracy lokomotywy typu Lea 12P3A [54]

Przeprowadzone w warunkach rzeczywistych badania układów zasilającosterujących górniczych lokomotyw akumulatorowych typu Lea BM-12 oraz Lea 12P3A wykazały, że lokomotywy te posiadają dość znaczną możliwość odzysku energii w procesie hamowania elektrycznego. Średnia wartość skuteczna natężenia prądu ładującego (doładowującego) baterie akumulatorów zmieniała się bowiem od 200 A do 400 A, w zależności od rodzaju zastosowanego silnika napędowego, oraz zainstalowanego w układzie sterowania ogranicznika prądu baterii. Z przeprowadzonych badań wynika, że dotychczas stosowane układy sterowania, umożliwiają efektywną rekuperację energii w procesie hamowania elektrycznego. Pozwala to oczywiście na potencjalne zwiększenie sprawności układu zasilająco-sterującego, co wiąże się jednocześnie, jak już powiedziano, ze wzrostem poziomu stężenia wodoru. Emisja gazu elektrolitycznego nie stanowi jednak istotnego problemu, tak długo aż poziom jego stężenia nie przekracza dolnej granicy wybuchowości. Prowadzi to wówczas do zagrożenia wybuchem, co jest niedopuszczalne. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że intensywność gazowania ogniw jest jednoznaczna z wartością dostarczanej energii i ulegnie zwiększaniu ze wzrostem sprawności lokomotywy uzyskanej poprzez poprawę sprawności układu zasilająco-sterującego (stosunek mocy użytecznej do pobranej pomniejszonej o zwrot energii).

3.3. Ocena warunków pracy silnika elektrycznego lokomotywy akumulatorowej dla wybranych lokalizacji

Na podstawie uzyskanych wyników rozpoznawczych badań można stwierdzić, że pracujące aktualnie układy zasilająco-sterujące górniczych lokomotyw akumulatorowych umożliwiają praktyczną realizację odzysku energii. Stąd w celu optymalnego i bezpiecznego ich wykorzystania należy określić specyfikę pracy silników elektrycznych napędzających lokomotywy akumulatorowe. W tym celu przeanalizowano otrzymane z kilku kopalń węgla kamiennego schematy głównych dróg przewozowych, po których poruszają się lokomotywy akumulatorowe. Na podstawie analizy tych schematów, możliwym było procentowe oszacowanie czasu trwania przejazdu (drogi), w którym silnik napędowy pracuje w trybie hamowania elektrycznego z potencjalnym odzyskiem energii do źródła.

Na rysunkach 3.13, 3.14 i 3.15 przedstawiono przykładowe schematy kopalnianych dróg transportowych. Na rysunku 3.13 dodatkowo zaznaczono fragmenty trasy, w których lokomotywy akumulatorowe poruszają się z ładunkiem (kolor czerwony) oraz fragmenty trasy, w których poruszają się bez

ładunku (wyłącznie masa własna składu – kolor zielony). Każdy ze schematów ma oznaczone punkty załadunkowe oraz wyładunkowe transportowanego urobku lub materiału, a także zaznaczone postoje ("dworce osobowe" do wsiadania i wysiadania załóg górniczych). Schematy kopalnianych dróg transportowych mają zaznaczone długości poszczególnych odcinków tras, jak i również wartości kątów ich nachylenia. Na podstawie tych wszystkich informacji możliwym było określenie uśrednionego cyklu pracy (przejazdu) lokomotywy akumulatorowej, celem zdefiniowania charakteru pracy jej silnika napędowego.

W celu uzyskania wyników najbardziej zbliżonych do trasy rzeczywistej, należało dodatkowo "przejechać" i sprawdzić wspólnie z maszynistą wybraną lokalizację. Na podstawie bowiem samych schematów nie można było określić prędkości jazdy lokomotywy oraz miejsc, w których faktycznie maszyniści zmniejszają prędkość czy wręcz się zatrzymują. Właśnie tego typu informacje były bardzo istotne do oceny sytuacji, w której faktycznej części przejazdu (pracy) lokomotywy silnik napędowy pełni funkcję hamulca, a w której - napędu. Spośród wszystkich uzyskanych lokalizacji, możliwość pełnego przejazdu trasy wspólnie z maszynistą w trakcie normalnej pracy lokomotywy akumulatorowej była możliwa wyłącznie w KWK Jankowice (rys. 3.14). Na podstawie tego przejazdu, analizy jego schematu oraz w oparciu o informacje uzyskane od maszynisty przyjęto, że w trakcie jazdy maszyny ze składem "pełnym" występowało obciążenie momentem nominalnym (M = M_N), a podczas jazdy ze składem "pustym" przyjęto moment równy 0,3 M_N . Zamodelowany cykl pracy lokomotywy akumulatorowej pokazano na rysunku 3.16.



Rys. 3.13. Schemat układu transportu pod ziemią KWK Halemba na poziomie 450 m [54]



Rys. 3.14. Schemat układu transportu pod ziemią KWK Jankowice na poziomie 400 m [54]



Rys. 3.15. Schemat układu transportu pod ziemią KWK Szczygłowice na poziomie 850 m [54]



Rys. 3.16. Zamodelowany cykl pracy lokomotywy akumulatorowej [54]

Zamodelowany, na podstawie wybranej lokalizacji cykl pracy lokomotywy akumulatorowej, podzielono na dwie strefy:

- jazda lokomotywy ze znamionowym momentem M_n ,
- jazda lokomotywy z momentem równym $0,3 M_n$.

Powyższy podział wynikał z czasu trwania jazdy maszyny z ładunkiem oraz bez ładunku (tylko masa własna). W związku z powyższym, można było stwierdzić, że lokomotywy akumulatorowe, poruszające się po wybranej lokalizacji, praktycznie 50% czasu transportują ładunek. Na zamodelowanym cyklu pracy lokomotywy akumulatorowej, zaznaczono kolorem zielonym fragmenty, w których lokomotywa pobiera dużą ilość energii (rozpędza się) oraz kolorem czerwonym fragmenty, w których lokomotywa oddaje energię (hamuje). Pozostałe fragmenty czasu pracy lokomotywy stanowią postój lub jazdę z ustaloną prędkością. Na podstawie powyższego możliwym było określenie charakteru pracy elektrycznego silnika napedowego i stwierdzenie, że w normalnych warunkach pracy silnik napędowy lokomotywy akumulatorowej przez czas około t = 3100 s znajduje się w trybie pracy silnikowej, przez czas t = 500 s w trybie biegu jałowego, zaś przez czas t = 1050 s, w trybie pracy generatorowej - hamuje z odzyskiem energii do baterii ogniw. Powyższe uzyskane wartości liczbowe odnoszą się do hipotetycznego pojedynczego cyklu pracy lokomotywy akumulatorowej. Natomiast w trakcie normalnej zmiany roboczej, lokomotywa akumulatorowa wykonuje do sześciu takich cykli pracy. W związku z powyższym, można założyć, że silnik napędowy lokomotywy akumulatorowej w ciągu jednej zmiany roboczej, w normalnych warunkach pracy przez czas:

- t = 18600 s znajduje się w trybie pracy silnikowej,
- t = 6300 s znajduje się w trybie pracy generatorowej,
- t = 3000 s znajduje się w trybie biegu jałowego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy specyfiki pracy silnika napędowego górniczej lokomotywy akumulatorowej, można stwierdzić, że przez około 30% czasu pracy maszyny górniczej, pracującej w wybranej lokalizacji, jej silnik napędowy odzyskuje energię, którą ładuje baterie akumulatorów. Ilość oddanej wówczas energii zależy od wartości prądu, przy którym silnik hamuje oraz czasu trwania procesu hamowania (od momentu rozpoczęcia hamowania aż do zatrzymania się maszyny lub ponownego powrotu napędu lokomotywy do trybu pracy silnikowej). Czas trwania procesu hamowania jest ponadto proporcjonalny do wielkości ładunku transportowanego przez maszynę. Im bowiem cięższy jest ładunek tym droga hamowania (czas zatrzymania) jest dłuższa – oczywiście w granicach wartości dopuszczalnych zdefiniowanych przez producenta maszyny górniczej. W wyniku przeprowadzonych badań i analiz szacunkowych, dla układu zasilająco-sterującego górniczych lokomotyw akumulatorowych, można stwierdzić, że:

- sprawność elektryczna badanych układów zasilająco-sterujących jest stosunkowo niska (nie przekracza 75%), co przekłada się bezpośrednio na efektywność pracy maszyny akumulatorowej, a tym samym na aspekt ekonomiczny jej wykorzystania,
- istniejące układy sterowania, zastosowane w pracujących lokomotywach akumulatorowych, umożliwiają praktyczny odzysk energii w wyniku hamowania elektrycznego. Amplituda prądu elektrycznego generowanego w procesie hamowania elektrycznego może bowiem osiągać wartość $I_M = 600$ A,
- z uwagi na stosowane ogniwa kwasowo-ołowiowe, wraz z odzyskiem energii w procesie hamowania elektrycznego, z baterii ogniw wydzielany jest wodór o zróżnicowanym poziomie stężenia, przekraczającym w niektórych przypadkach wartość dopuszczalną,
- przez około 25% czasu pracy lokomotywy akumulatorowej, silnik napędowy znajduje się w trybie pracy generatorowej – oddaje więc energię do baterii.

W celu istotnej poprawy powyższej sytuacji zaszła konieczność opracowania nowego układu zasilająco-sterującego, dedykowanego dla górniczych lokomotyw akumulatorowych, zwiększającego ich sprawność oraz wykorzystującego maksymalnie parametry tras jezdnych pod kątem odzysku energii przy jednoczesnym zapewnieniu utrzymania bezpiecznego poziomu emisji wodoru.

4. Koncepcja innowacyjnego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej

W niniejszym rozdziale przedstawiono koncepcję nowego układu zasilająco-sterującego, dedykowaną dla lokomotyw akumulatorowych. Układ zasilająco-sterujący maszyny akumulatorowej (rys. 4.1), jak już powiedziano stanowi elektryczne połączenie trzech ściśle powiązanych ze sobą podczas pracy układów: układu zasilania (bateria ogniw), układu sterowania (przekształtnik energoelektroniczny), układu napędowego (silnik elektryczny), tak aby cały ten układ, umożliwiał dwukierunkowe przesyłanie energii elektrycznej.



Rys. 4.1. Schemat blokowy układu zasilająco-sterującego lokomotywy akumulatorowej [54]

Podstawowymi założeniami przyjętymi podczas opracowywania koncepcji było, aby nowoopracowany układ zasilająco-sterujący cechował się wyższą sprawnością, dłuższym czasem pracy, podwyższonym bezpieczeństwem użytkowania oraz wyższą bezawaryjnością w odniesieniu do aktualnie eksploatowanych układów zasilająco-sterujących górniczych lokomotyw akumulatorowych. Podczas opracowywania nowego układu zasilającosterującego prace podzielono na trzy etapy:

- dobór układu zasilania,
- dobór układu sterowania,
- dobór układu napędowego.

Na podstawie przyjętej koncepcji i dobranych poszczególnych części składowych układu, opracowano schemat ideowy nowego układu zasilającosterującego.

4.1. Dobór układu zasilania, sterowania i napędu

Zgodnie z obowiązującymi wymaganiami przepisów [79] możliwym jest stosowanie baterii ogniw znajdujących się wyłącznie w skrzyniach (osłonach) wzmocnionej, wskazując jednocześnie budowie na ich ceche 0 przeciwwybuchowa I M2. Skrzynia (osłona) baterii akumulatorów stanowi więc jeden z newralgicznych podzespołów całej lokomotywy z punktu widzenia jej eksploatacji. Cecha przeciwwybuchowości oznacza, że w razie pojawienia się zagrożenia metanowego w otoczeniu urządzenia, należy urządzenie to wyłączyć spod napięcia. Zapis ten nie odnosi się jednak do baterii ogniw posiadających zdolność do gromadzenia ładunku elektrycznego. W tym przypadku stosuje się inne zabezpieczenia, dzięki którym podniesione zostaje bezpieczeństwo użytkowania baterii ogniw. Jednym z podstawowych sposobów zabezpieczania użytkownika przed zagrożeniami jakie potencjalnie stanowią skrzynie (osłony) z baterią ogniw, jest wyłącznie używanie przebadanych i dopuszczonych do kopalnianych warunków pracy ogniw. W lokomotywach serii Lea jako źródło zasilania stosuje się baterię ogniw kwasowo-ołowiowych typu 8SPzS produkcji firmy Hawker. Napiecie znamionowe pojedynczego ogniwa wynosi $U_N = 2 V$ a pojemność, w zależności od wykonania, $Q = 760 \div 840$ Ah. Ogniwa te są budowy przeciwwybuchowej I M2 Ex e I, i sa jednymi z dwóch znanych typów ogniw, które charakteryzują się cechą przeciwwybuchowości pozwalając na ich stosowanie w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem. Z uwagi jednak na fakt wydzielania się z nich gazów elektrolitycznych [48, 66, 68], podczas procesu ładowania (doładowywania w wyniku rekuperacji energii), jednostka notyfikowana dopuszcza stosowanie tego typu ogniw wyłącznie w odpowiednio wentylowanych obudowach. Dla potrzeb nowego układu zasilająco-sterującego autorzy zdecydowali się wykorzystać ogniwa firmy Hawker typu 8SPzS 1000 (rys. 4.2). Sa to ogniwa o pojemności Q = 1000 Ah, które umożliwiają zwiększenie długości czasu pracy maszyny dla jednego cyklu naładowania baterii. Ponadto im wyższa jest wartość pojemności tym większa jest możliwość odzysku energii bez niebezpieczeństwa przeładowania stosowanych baterii ogniw. Większy ciężar baterii ogniw jest w tym przypadku zaletą, gdyż umożliwia uzyskanie większej wartości siły pociagowej lokomotywy, uzależnionej w znacznym stopniu od wartości siły docisku kół do szyn.



Rys. 4.2. Widok ogniw kwasowo-ołowiowych typu 8SPzS 1000 produkcji firmy Hawker [54]

Założeniem koncepcji było również to, aby ze względów czysto praktycznych nowoopracowany układ zasilający mógł być ładowany w istniejących kopalnianych stacjach prostownikowych. W związku z powyższym wartość napięcia baterii nie powinna przekraczać 144 V. Oznacza to, że nowy układ zasilający powinien składać się z 72 sztuk ogniw, połączonych szeregowo, co pozwala na uzyskanie napięcia $U_B = 144$ V oraz energii W = 14400 Wh. Z uwagi na fakt, że bateria ogniw jest instalowana we wnętrzu skrzyni (osłony) budowy wzmocnionej, to wszystkie połączenia elektryczne pomiędzy ogniwami oraz ich wyprowadzenia poza skrzynię muszą być również izolowane. Przepisy ponadto nie dopuszczają umieszczania we wnętrzu skrzyni (budowy wzmocnionej) jakichkolwiek elementów stanowiących potencjalne źródło wyładowań iskrowych (styczniki, przekaźniki itd.). Wobec powyższego, całe wyposażenie elektryczne baterii ogniw będzie musiało być zainstalowane w oddzielnych komorach tejże skrzyni.

Dotychczasowe układy sterowania lokomotyw akumulatorowych stosowane w polskim górnictwie bazowały na aparaturze łączeniowej prądu stałego. Istniejące tendencje rozwojowe, zwłaszcza w maszynach zagranicznej produkcji, opieraja sie wyłacznie na sterowaniu z wykorzystaniem przekształtników energoelektronicznych. W nowej koncepcji układu zasilającosterującego oparto się zatem, przede wszystkim, na wymianie silnika prądu stałego na silnik pradu przemiennego, sterowany odpowiednim przekształtnikiem energoelektronicznym. Z uwagi na fakt, że dostępne na rynku przekształtniki energoelektroniczne nie spełniają wymagań co do parametrów elektrycznych odpowiadających koncepcji nowego układu zasilająco-sterującego (głównie odnośnie do wartości napięcia zasilającego), koniecznym było zaprojektowanie i wykonanie dedykowanego przekształtnika energoelektronicznego (rys. 4.3).



Rys. 4.3. Opracowany przekształtnik energoelektroniczny typu FNTGIa-18/150/K [9]

przekształtnika Podstawowymi elementami opracowanego energoelektronicznego oznaczonego jako FNTGIa-18/150/K, są moduły tranzystorowe CM400DU-5F, wyposażone w parę tranzystorów komplementarnych IGBT (element A na rys. 4.3). Układy sterowania falownika napięcia (element B na rys. 4.3) umieszczono bezpośrednio nad modułem tranzystorowym, co pozwala na wykonanie bardzo zwartej i prostej konstrukcji. Całość umieszczono na płycie miedzianej (element C na rys. 4.3) pełniącej funkcję radiatora. Przekształtnik energoelektroniczny wyposażono w system mikroprocesorowy, oparty na wykorzystaniu mikroprocesora sygnałowego typu TMS320F2812, wykonującego wszystkie funkcje związane z poprawną pracą przekształtnika oraz nadzorowaniem systemu zabezpieczeń. Opracowany przekształtnik energoelektroniczny zapewnia wytworzenie trójfazowego napięcia (do zasilania silnika elektrycznego), z wykorzystaniem modulacji szerokości impulsów (PWM - Pulse Width Modulation). Do regulacji prędkością i kierunkiem obrotów silnika zastosowano sterowanie wektorowe, wartością momentu elektromagnetycznego [33, 76]. W czasie hamowania odzyskowego stosowana jest ta sama metoda sterowania silnikiem. Parametry opracowanego przekształtnika energoelektronicznego zestawiono w tabeli 4.1.

Dane	Jednostka	Wartość
Napięcie zasilania U _N	[V] DC	$144\pm25\%$
Maksymalna moc czynna P_{Nmax}	[kW]	30
Zakres napięcia wyjściowego U _{WY}	[V]	2÷105
Maksymalny prąd wyjściowy I _{WYmax}	[A]	260
Temperatura pracy T	[°C]	<60
Częstotliwość przełączania f	[kHz]	3

Parametry przekształtnika energoelektronicznego typu FNTGIa-18/150/K [76]

Tabela 4.1.

Podobnie do baterii akumulatorów, również przekształtnik energoelektroniczny musi być umieszczony w obudowie przeciwwybuchowej wraz z pozostałą aparaturą zabezpieczeniową i sterowniczą.

Silnik napędowy lokomotywy akumulatorowej stanowi oczywiście najważniejszy element całego układu zasilająco-sterującego, stąd właściwy jego dobór umożliwia odpowiednie podniesienie wartości sprawności całego układu zasilająco-sterującego.

W koncepcji układu zasilająco-sterującego, z uwagi na tendencje rozwoju napędów elektrycznych, sprawność silnika oraz możliwości rekuperacji energii przewidziano zastosowanie silnika prądu przemiennego, z tym, że istnieje możliwość wykorzystania silnika asynchronicznego lub silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Wartości strat w żelazie ΔP_{Fe} tak w silnikach z magnesami trwałymi, jak i silnikach asynchronicznych zasilanych z przekształtnika energoelektronicznego, są podobne z uwagi na podobną budowę pakietów blach stojana. W silnikach z magnesami trwałymi, straty w uzwojeniach stojana ΔP_{Cu} są jednak mniejsze, gdyż silniki te wymagają mniejszej liczby zwojów na fazę przy takiej samej wartości napięcia zasilającego. Ze względu natomiast na brak uzwojenia w wirniku oraz na pracę synchroniczną, straty w wirniku silnika z magnesami trwałymi praktycznie nie występują. Jedynym źródłem strat w wirniku są tylko straty dodatkowe. Suma więc strat w silniku z magnesami trwałymi jest mniejsza, wskutek czego jego sprawność jest wyższa, a co za tym idzie, jego nagrzewanie się jest mniejsze.

Silniki z magnesami trwałymi zdobywają więc coraz większą popularność, głównie z uwagi na:

- wyższą sprawność w całym zakresie zmiany prędkości obrotowej,
- dużą przeciążalność momentem,
- szeroki zakres zmiany prędkości obrotowej,
- mniejsze wymiary gabarytowe (w porównaniu do silników indukcyjnych i/lub silników prądu stałego),
- efektywną regulację prędkości obrotowej,
- większą niezawodność ruchową w porównaniu do silników prądu stałego.

Stosowanie coraz to doskonalszych układów sterowania w połączeniu z dobrymi właściwościami ruchowymi samych silników z magnesami trwałymi spowodowało, iż coraz częściej silniki prądu stałego z komutatorem mechanicznym oraz silniki indukcyjne są przez nie wypierane z eksploatacji.

Biorąc pod uwagę powyższe podjęto decyzję, że nowy układ zasilającosterujący górniczej lokomotywy akumulatorowej wyposażony zostanie w odpowiednio dobrany silnik synchroniczny z magnesami trwałymi (*PMSM – permanent magnet synchronous motor*).

Dla istniejącego schematu kinematycznego przedmiotowej maszyny bazującego na modelu lokomotywy Lea BM-12, określono wymaganą moc i moment silnika elektrycznego. Podobnie jak podczas doboru przekształtnika energoelektronicznego, tak również w przypadku doboru silnika nie za bardzo można było skorzystać z gotowych produktów dostępnych na rynku. Główną przeszkodą jest tutaj brak silników (PMSM) w wykonaniu przeciwwybuchowym oraz jego nietypowe parametry elektryczne – głównie wartość napięcia zasilania. Wobec powyższego w tym celu specjalnie opracowano i wykonano, w Branżowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Maszyn Elektrycznych KOMEL, prototyp odpowiedniego silnika PMSM typu SMwsd200S-4 (rys. 4.4). W silniku tym zaadaptowano (wydłużono) standardowy kadłub silnika asynchronicznego górniczego typu 3SGKH 200S-4. Poszerzono ponadto skrzynkę przyłączeniową dodając jeden wpust sterowniczy. Podstawowe parametry techniczne nowo opracowanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi zestawiono w tabeli 4.2.



Rys. 4.4. Prototyp silnika synchronicznego z magnesami trwałymi typu SMwsd200S-4 [76]

Podstawowe parametry techniczne silnika typu SMwsd200S-4 [76]

		Tabela 4.2.
Dane	Jednostka	Wartość
Napięcie znamionowe U_N	[V]	88
Moc znamionowa P_N	[kW]	18
Rodzaj pracy	[-]	S1
Częstotliwość znamionowa f	[Hz]	50
Prąd znamionowy I _N	[A]	140
Prąd max. silnika I _{Nmax}	[A]	500
Sprawność η	[%]	92
Prędkość obrotowa n	[obr/min]	1500
Moment znamionowy M_N	[Nm]	115
Moment bezwładności M _{Bz}	[kgm ²]	0,26
Masa silnika M	[kg]	360

Dopuszczalna krotność momentu rozruchowego silnika, jak i jego przeciążalność zależne są od wydajności prądowej zastosowanego przekształtnika energoelektronicznego. Silnik jest chłodzony powietrzem (IC410) i wykonany w formie kołnierzowej (IM4001). Wewnątrz silnika jest zabudowany enkoder absolutny (BFF 1G24K 1024) oraz dodatkowo hamulec elektromagnetyczny (HPSX20) o napięciu pracy $U_h = 24$ V DC i maksymalnym

momencie statycznym hamulca $M_h = 460$ Nm. Dzięki zastosowaniu hamulca elektromagnetycznego, wyposażenie zmodernizowanej lokomotywy akumulatorowej nie wymaga stosowania mechanicznego hamulca postojowego. Ponadto celem dodatkowego podwyższenia bezawaryjności pracy nowego układu zasilającosterującego, podjęto decyzję o zastosowaniu dwóch niezależnych tego typu silników napędowych. Należy nadmienić, że dotychczas wszystkie lokomotywy z serii Lea, pracujące w podziemiach polskich kopalń wyposażone są tylko w jeden silnik napędowy. Zatem w sytuacji jego uszkodzenia się lokomotywa jest wyłączana z ruchu. Dzięki zastosowaniu, w nowo opracowanym układzie zasilająco-sterującym, dwóch silników napędowych (po jednym na każdą z dwóch osi napędowych) zwiększona została bezawaryjność pracy lokomotywy akumulatorowej. Pozwoli to również na uniknięcie poślizgu przy ruszaniu lokomotywy akumulatorowej, jak również na łatwiejsze zdiagnozowanie wystąpienia efektu poślizgu przekazując tę informację do operatora lokomotywy, który będzie mógł podjąć odpowiednią reakcję (np. włączenie "piasecznicy"). Na rysunku 4.5 pokazano elektryczny schemat ideowy nowoopracowanego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej.

Według opracowanej koncepcji rozwiązanie nowego układu zasilającosterującego lokomotywy akumulatorowej zawiera następujące podstawowe elementy:

- moduł baterii akumulatorów,
- moduł przekształtnika (x 2),
- silnik synchroniczny z magnesami trwałymi (x 2).



Rys. 4.5. Schemat ideowy nowoopracowanego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej [54]

Wszystkie obwody sterowania, diagnostyki i monitoringu zostały zaprojektowane i wykonane w wersji iskrobezpiecznej. Wyposażenie elektryczne całej lokomotywy spełnia odpowiednie wymagania formalne takich aktów prawnych, jak:

- Dyrektywa 2014/34/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej.
- Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE.
- Dyrektywa 2014/35/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do udostępniania na rynku sprzętu elektrycznego przewidzianego do stosowania w określonych granicach napięcia.
- Dyrektywa 2014/30/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej.
- Normy zharmonizowane z ww. dyrektywami.

Całość zastosowanego wyposażenia elektrycznego jest przystosowana do eksploatacji w pomieszczeniach o stopniu "a", "b" i "c" niebezpieczeństwa wybuchu metanu oraz klasy A i B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego.

Sposób zamocowania baterii ogniw wykonanej w obudowie przeciwwybuchowej, umożliwia szybkie jej rozłączenie mechaniczne od konstrukcji lokomotywy oraz odłączenie elektryczne od pozostałych elementów aparatury elektrycznej za pomocą odpowiednich złączy ognioszczelnych. Układ baterii ogniw składa się z trzech komór: komory głównej baterii ogniw budowy wzmocnionej (zamkniętej czterema wentylowanymi pokrywami zabezpieczonymi przed dostępem wody), komory aparaturowej budowy ognioszczelnej oraz komory sterowniczej. W komorze baterii umieszczono 72 ogniwa ołowiowe (mokre) typu 8SPzS1000 o pojemności 1000 Ah i napięciu 2 V, z cechą budowy przeciwwybuchowej IM2 Exe I, spełniające wymagania odpowiednich norm. Na ścianie komory baterii zabudowano dwa złącza ognioszczelne tzw. obwodów mocy typu dKAW-400 (A(+) i B(-)). W komorze aparaturowej znajduje się aparatura sterownicza i zabezpieczenia. Układ zasilania elektrycznego silnika zabezpieczony jest przed skutkami zwarć i przeciążeń za pomocą specjalnego wyłącznika mocy typu REKORD D400 i dodatkowo jest zabezpieczony bezpiecznikami mocy 350 A znajdującymi się we wnętrzu obudowy złączy ognioszczelnych. Wewnątrz komory aparaturowej znajduje się zabezpieczenie ziemnozwarciowe kontrolujące stan izolacji, tak przed załączeniem, jak i podczas pracy (zarówno w obwodzie głównym, jak i w obwodzie pomocniczym), jak i odpowiednia aparatura łączeniowa obwodów pomocniczych przy zastosowaniu styczników itp. W komorze sterowniczej znajdują się wyprowadzone przewody obwodów iskrobezpiecznych do połączeń z modułem zasilania za pośrednictwem złącza wielowtykowego. Komora aparaturowa połączona jest elektrycznie z komorą baterii ogniw za pośrednictwem izolatorów przepustowych. Analogicznie połączone są komory sterownicza z komorą aparaturową. Napięcie pomocnicze 24 V DC wyprowadzone jest, z komory aparaturowej do modułu zasilania, za pomocą złącza wtykowego w wykonaniu przeciwwybuchowym.

5. Badania modelu fizycznego na stanowisku badawczym w symulowanych warunkach pracy

Celem określenia efektywności odzysku energii w procesie hamowania elektrycznego oraz w celu wyznaczenia sprawności nowoopracowanego układu zasilająco-sterującego przeprowadzono odpowiednie badania w warunkach laboratoryjnych. Badania prowadzone były w oparciu o zamodelowany cykl pracy lokomotywy akumulatorowej (wyznaczony w pkt. 3.3 niniejszej pracy).

5.1. Charakterystyka i sposób rozwiązania stanowiska badawczego

Badania zostały zrealizowane w laboratorium badawczym zlokalizowanym w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG w Gliwicach, na stanowisku pomiarowym, którego schemat blokowy pokazano na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu badawczo-pomiarowego [9]

Główne elementy układu badawczo-pomiarowego stanowiły:

- zespół hamowni elektrodynamicznej z zastosowaniem sterownika silnika hamowni (silnik prądu stałego 223 kW),
- zespół napędowy składający się ze sterownika, falownika oraz badanego silnika,
- zespół baterii akumulatorów zasilających badany zespół napędowy,
- nadrzędny regulator pracy,
- układ pomiarowo-rejestrujący wraz z układem obróbki i przetwarzania danych.

Silnik hamowni sprzęgnięto mechanicznie, poprzez wał Cardana, z bezszczotkowym badanym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. Kierunek obrotów i tryb pracy silnika był identyfikowany na podstawie zadanych parametrów za pomocą sterownika na hamowni. W trakcie realizacji badań obydwa silniki pracowały w odpowiednich, różnych warunkach pracy, a mianowicie:

- podczas pracy silnika badanego w trybie silnikowym, silnik hamowni pracował w trybie pracy generatorowej, oddając energię do sieci zasilającej 400 V AC,
- podczas pracy silnika badanego w trybie generatorowym silnik hamowni pracował w trybie pracy silnikowej, a badany zespół napędowy oddawał energię do zasilającego go zespołu baterii ogniw.

Układ pomiarowy pracował "on-line" i rejestrował niezbędne wielkości fizyczne takie jak:

- napięcie zasilania badanego zespołu napędowego,
- prąd pobierany z baterii ogniw,
- moment obrotowy (na wale Cardana),
- prędkość obrotową silników,
- temperaturę wybranych podzespołów sterownika silnika badanego.

Przetwarzanie wyników pomiarów następowało w trybie "off line". W wyniku przetwarzania można było wyznaczyć:

- sprawność badanego układu zasilająco-sterującego,
- energię pobraną z akumulatora w zadanym cyklu pracy,
- energię oddaną do akumulatora w zadanym cyklu pracy,
- procentowy odzysk energii w zadanym cyklu pracy.

Stanowisko badawcze zostało dodatkowo wyposażone w oscyloskop z funkcją analizatora FFT (*Fast Furier Transform*). Oscyloskop ten współpracował z cęgami prądowymi dedykowanymi do pomiaru natężenia prądu stałego w zakresie do 500 A. Widok stanowiska badawczo-pomiarowego pokazano na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Widok stanowiska badawczo-pomiarowego [9]

5.2. Sposób i zakres prowadzenia badań

Program badań umożliwiał odtworzenie (zasymulowanie przebiegu), na stanowisku badawczym, sześciu cykli pracy (I – VI) lokomotywy akumulatorowej, które sumarycznie odzwierciedlały warunki pracy podczas jednej zmiany roboczej (w oparciu o dane z wybranej lokalizacji). Celem porównania uzyskanych wyników pomiarów z wynikami pomierzonymi i zarejestrowanymi w warunkach rzeczywistych (dla lokomotywy Lea BM) wybrano odpowiedni cykl pracy lokomotywy zarejestrowany w KWK Jankowice (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Zamodelowany cykl pracy lokomotywy akumulatorowej na podstawie lokalizacji w KWK Jankowice [9]

Z wyników uzyskanych w warunkach rzeczywistych można stwierdzić, że lokomotywa w czasie pojedynczego cyklu pracy transportuje masę urobku z obciążeniem momentem znamionowym przez około 40% czasu trwania pracy, po czym następuje rozładowanie tego urobku. Przez zaś około 55% czasu pracy lokomotywa akumulatorowa pracuje z momentem równym 0,3M_N, co wynika z transportu materiałów pomocniczych po wyładunku urobku. Natomiast przez około 5% czasu pracy maszyny pozostaje wyłączona. Taki cykl pracy został odtworzony fizycznie na stanowisku badawczym (parametrami wymuszanymi była prędkość obrotowa silnika napędowego oraz jego moment). Wartość momentu hamującego na stanowisku pomiarowym wyznaczono na drodze eksperymentalnej. Poza odzwierciedleniem rzeczywistego cyklu pracy dużą uwagę poświęcono procesowi rekuperacji energii. Silnik napędowy pracował więc jako hamulec generując moment hamujący o wartościach równych: 30, 50, 70, 90 i 110 Nm, przy prędkościach obrotowych równych: 250, 500, 750, 1000, 1250 i 1500 obr/min dla każdej z założonych wartości momentu hamującego. W trakcie próby rekuperacji energii, rejestrowany był przebieg prądu doładowującego celem określenia poziomu jego odkształcenia - określenia współczynnika zawartości harmonicznych prądu THD_I.

5.3. Analiza uzyskanych wyników z badań

Badania podzielono na dwa etapy:

- odzwierciedlenie rzeczywistego cyklu pracy oraz wyznaczenie charakterystyki sprawności nowoopracowanego układu zasilającosterującego,
- zarejestrowanie przebiegu prądu doładowującego oraz określenie jego współczynnika odkształcenia prądu (*THD_l*).

Na rysunku 5.4 przedstawiono dla przykładu zarejestrowane przykładowe przebiegi, dla jednego z wykonanych cykli badawczych (III).



Rys. 5.4. Przykładowy przebieg podstawowych wielkości fizycznych rejestrowanych podczas badań układu zasilająco-sterującego w cyklu badawczym nr III [54]

Na rysunku 5.4 zarejestrowana prędkość obrotowa odwzorowuje zamodelowany cykl pracy lokomotywy akumulatorowej, zaś zarejestrowany moment silnika PMSM odzwierciedla wartości jej momentu obciążenia. Na podstawie zarejestrowanego przebiegu natężenia prądu można zaobserwować, kiedy silnik pracuje w trybie generatorowym oddając energię do baterii ogniw. W celu kontroli pracy przekształtnika mierzono i rejestrowano również przebieg temperatury radiatora IGBT tego przekształtnika energoelektronicznego. Pomierzone wartości temperatury są stabilne co oznacza, że odprowadzenie ciepła z układu sterowania jest skuteczne i moduł przekształtnika się nie przegrzewa. W tabeli 5.1 zestawiono dane dotyczące bilansu energii oraz średniej wartości sprawności układu zasilająco-sterującego podczas badań w cyklach badawczych I - VI, natomiast w tabeli 5.2 – uśrednioną sprawność układu zasilająco-sterującego podczas badań w cyklach badawczych I - VI wyznaczoną na podstawie energii pobranej z zespołu baterii zasilających.

Bilans energii oraz średnia sprawność układu zasilająco-sterującego podczas badań w cyklach badawczych I - VI [54]

Tabela 5.1.

	Bilans energii z akumulatora			Suma energii	Sprawność średnia
Nr cyklu badawczego	Suma energii pobranej	Suma energii oddanej	Odzysk	"oddanej" na wał silnika	układu zasilająco- sterującego
	[kWh]	[kWh]	[-]	[kWh]	[-]
Ι	4,16	0,63	15,0%	3,01	0,724
п	4,16	0,62	15,0%	3,00	0,720
п	4,27	0,62	14,5%	3,06	0,716
IV	4,20	0,62	14,6%	3,04	0,724
V	4,26	0,62	14,6%	3,07	0,720
VI	4,26	0,62	14,5%	3,07	0,722
sumarycznie I-VI	25,30	3,72	14,7%	18,24	0,721

	Tabela 5.2.
Energia pobrana z akumulatora [kWh]	Sprawność [-]
18	0,841
17	0,835
16	0,832
15	0,827
14	0,811
13	0,783
12	0,779
10	0,733
9	0,755
8	0,720
7	0,687

Uśredniona sprawność układu zasilająco-sterującego podczas badań w cyklach badawczych I - VI wyznaczona na podstawie energii pobranej z zespołu baterii [54]

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w cyklach badawczych I - VI wyznaczono charakterystykę zależności sprawności układu zasilającosterującego od wartości energii pobranej z akumulatora – rysunek 5.5.



Rys. 5.5. Sprawność układu zasilająco-sterującego podczas badań w cyklach badawczych I - VI wyznaczona wg energii pobranej z zespołu baterii zasilających [10]

Jak wynika z porównania danych pomiarowych dotyczących średniej sprawności podczas badań z tabeli 3.2 oraz tabeli 5.1, sprawność opracowanego układu zasilająco-sterującego jest o około 5% wyższa dla silnika napędowego (PMSM) w porównaniu z dotychczas stosowanym rozwiązaniem wykorzystującym silnik szeregowy prądu stałego. Również odzysk energii jest wyższy o około 3%. Należy zaznaczyć, że silniki pracowały z obciążeniem około 15 kW, co było równe obciążeniu nominalnemu silnika prądu stałego (najwyższa sprawność silnika). Biorąc pod uwagę obciążenie nominalne silnika typu PMSM, które wynosi około 18 kW, wówczas uśredniona sprawność układu zasilająco-sterującego jest wyższa o około 18% w porównaniu do układu z silnikiem prądu stałego. Ponadto pomierzone wartości dotyczą układu z zastosowanym jednym silnikiem napędowym. W lokomotywie zaś docelowo, przewiduje się wykorzystanie dwóch tego typu silników napędowych, co zgodnie z przewidywaniami powinno dodatkowo zwiększyć wartość odzyskanej energii.

Zgodnie z ustalonym programem badań, w drugim jego etapie przystąpiono do pomiaru poziomu zawartości wyższych harmonicznych (*THD*_{*l*}) w prądzie doładowującym baterię ogniw podczas procesu hamowania elektrycznego z rekuperacją energii. Pomiary wykonano dla dwóch prędkości obrotowych silnika n = 750 i 1500 obr/min oraz dla różnych wartości momentu silnika wynoszących $M_H = 30, 50, 90$ i 110 Nm odpowiednio dla każdej z powyższych prędkości obrotowych. Przykładowe zarejestrowane przebiegi prądowe z zaznaczonym udziałem wyższych harmonicznych pokazano na rysunkach 5.6-5.9.



Rys. 5.6. Oscylogram prądu doładowującego wraz z analizą FFT, $M_H = 30$ Nm, n = 750 obr/min [54]

Z przeprowadzonych badań wynika, że zawartość jak i rodzaj wyższych harmonicznych zależy od obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej. Dla prędkości obrotowej silnika 750 obr/min i momentu obciążenia 30 Nm (rys. 5.6) występuje, jak widać, pięć nieparzystych wyższych harmonicznych (h1=25 Hz, h3, h5, h9, h11). Poza składowa stałą (h0) o wartości 16 A, maksymalne wartości pozostałych harmonicznych zawierały się w granicach od 1,05 A (h1) do 0,2 A (h11), wykazując tendencję malejącą z każdą kolejną wielokrotnością częstotliwości nośnej. Wartość współczynnika odkształcenia jest niewielka i wynosi w tym przypadku $THD_I = 0.82\%$. Należy zaznaczyć, że częstotliwość harmonicznej podstawowej h1 zależy od częstotliwości przebiegu prądu na wyjściu z przekształtnika zasilającego silnik, czyli związana jest z ustaloną prędkością obrotową tego silnika. Ze zwiększeniem momentu hamującego do wartości $M_H = 50$ Nm i przy równocześnie większej prędkości obrotowej silnika PMSM równej n = 1500 obr/min (rys. 5.7) widoczne są również wyższe harmoniczne prądu (h1=50 Hz, h2, h4, h6) oraz składowa stała (h0). Przy czym wartość składowej stałej wynosi h0 = 50 A, zaś amplitudy zarejestrowanych wyższych harmonicznych wynoszą odpowiednio: h1 = 1,8 A, h2 = 0,6 A, h4 = 1,2 A, h6 = 1,8 A (współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu w tym przypadku nieco wzrósł i wynosił $THD_I = 1,25\%$).



Rys. 5.7. Oscylogram prądu doładowującego wraz z analizą FFT, $M_{\rm H}$ = 50 Nm, n = 1500 obr/min [54]

Ze wzrostem prędkości obrotowej w celu skutecznego hamowania wymagany jest wyższy moment elektromagnetyczny silnika PMSM. Zwiększenie zaś momentu przy wyższych prędkościach obrotowych powoduje generowanie większej wartości prądu "zwracanego" do baterii ogniw podczas pracy układu z odzyskiem energii, a co za tym idzie, wzrost wartości wyższych harmonicznych [72]. Na rysunku 5.7 widać obecność harmonicznych (h1=25 Hz, h2, h4 oraz h6) o wartościach amplitud odpowiednio: h1 = 0,8 A, h2 = 0,5 A, h4 = 0,6 A, h6 = 1,7 A. Na oscylogramie tym można również zaobserwować kilka kolejnych harmonicznych, których udział z uwagi na znaczną zawartość składowej stałej h0 = 32 A jest pomijalny. Wzrasta jednak wartość współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu (w tym przypadku wynosi *THD*₁ = 2,34%). Przebiegi prądu wraz z zawartością wyższych harmonicznych, ale dla większego momentu przy równocześnie mniejszej prędkości obrotowej pokazano dla przykładu na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Oscylogram prądu doładowującego wraz z analizą FFT, $M_H = 90$ Nm, n = 750 obr/min [54]

Bardzo istotnym było zbadanie zachowania się układu w czasie hamowania elektrycznego z odzyskiem energii dla znamionowej prędkości obrotowej silnika badanego, równej n = 1500 obr/min i przy wartości momentu elektromagnetycznego silnika PMSM równej $M_H = 110$ Nm. W tym przypadku natężenie prądu "zwracanego" do baterii ogniw wzrosło do wartości równej I = 105A (rys. 5.9), zaś napięcie na baterii wynosiło 164,5 V DC (znamionowe 144

V DC). Pomierzona wartość składowej stałej wynosiła h0 = 105 A, zaś udział pozostałych harmonicznych był zgodnie z oczekiwaniami wyższy i wynosił odpowiednio: h1 = 1,2 A, h2 = 0,8 A, h4 = 2,1 A, h6 = 4 A. W efekcie wartość współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu była też wyższa (*THD*₁ = 2,98%). W tabeli 5.3 zestawiono wyniki pomiarów współczynnika odkształcenia prądowego *THD*₁ dla wszystkich wykonanych i zarejestrowanych prób.



Rys. 5.9. Oscylogram prądu doładowującego wraz z jego analizą FFT, $M_{\rm H} = 110$ Nm, n = 1500 obr/min [54]

		Tabela 5.3.
Prędkość obrotowa [obr/min]	Moment [Nm]	<i>THDI</i> [%]
750	30	0,85
750	50	1,07
750	90	2,34
750	110	2,55
1500	30	0,97
1500	50	1,25
1500	90	2,63
1500	110	2,98

Analizując wyniki badań przeprowadzonych w etapie drugim można stwierdzić, że w nowo opracowanym układzie zasilająco-sterującym górniczej lokomotywy akumulatorowej podczas hamowania elektrycznego z rekuperacją energii do baterii ogniw, prąd doładowujący jest zniekształcony wyższymi harmonicznymi o różnej amplitudzie. Występujące wyższe harmoniczne uzależnione są od parametrów pracy układu zasilająco-sterującego, jak również od struktury układu energoelektronicznego przekształtnika napięcia.

Osobnym zagadnieniem wpływającym na występowanie wyższych harmonicznych są pojemności i indukcyjności kabli i przewodów zasilających, a także sposób ich prowadzenia. Z punktu widzenia użytkownika możliwa jest jedynie ingerencja w parametry pracy układu np. hamowanie z mniejszym momentem, co wymaga odpowiedniej "kultury pracy" obsługi. Niestety w ten sposób obniża się sprawność całego układu zasilająco-sterującego lokomotywy, dlatego też użytkownicy powinni zadbać o aspekt związany z prowadzeniem kabli i przewodów zasilających zgodnie z dokumentacją, natomiast producent o zastosowanie w układzie energoelektronicznym odpowiednich filtrów ograniczających (bo nie w pełni eliminujących) występowanie zniekształceń prądu zwracanego z układu do baterii ogniw w czasie hamowania elektrycznego. Należy również przypomnieć, że badania prowadzone były z wykorzystaniem jednego silnika napędowego a obiekt rzeczywisty składać się będzie z dwóch silników PMSM. każdy zasilany Z oddzielnego przekształtnika energoelektronicznego. Wówczas zawartość wyższych harmonicznych w prądzie doładowania może być nieco inna. Niezależnie jednak od predkości obrotowej silnika i wartości momentu hamującego należy stwierdzić, że w zarejestrowanych przebiegach pradu doładowującego w procesie rekuperacji energii występują wyższe harmoniczne. Mogą one mieć potencjalny wpływ na proces emisji gazu elektrolitycznego. W związku z powyższym zaszła konieczność zbadania wpływu odkształcenia prądu ładowania (doładowywania) na stopień zagrożenia wybuchowego.
6. Analiza symulacyjna i badania poziomu stężenia wodoru i jego rozpływu w osłonie baterii ogniw kwasowo-ołowiowych w warunkach ładowania

Badania symulacyjne przeprowadzono dla układu baterii ogniw kwasowoołowiowych, stanowiącej źródło zasilania lokomotywy akumulatorowej typu Lda-12K-EMA. Celem badań symulacyjnych, było określenie zarówno wartości stężenia, jak i miejsc gromadzenia się wodoru we wnętrzu tej osłony. Na podstawie uzyskanych wyników, możliwym było określenie miejsc lokalizacji czujników wodoru celem przeprowadzenia badań w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych akumulatorowych źródeł energii.

6.1. Badania symulacyjne w celu określenia miejsc lokalizacji czujników wodoru podczas badań w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych pracy

W pierwszej kolejności, skupiono się na określeniu miejsc lokalizacji rozmieszczenia czujników wodoru we wnętrzu osłony ognioszczelnej baterii ogniw ołowiowych. Parametry techniczne przedmiotowej baterii ogniw zestawiono w tabeli 6.1.

			Tabela 6.1.
Napięcie znamionowe [V]	Pojemność [Ah]	Pobór prądu maksymalny [A]	Typ ogniwa [-]
144	1000	300	8 SPzS 1000

Parametry techniczne baterii ogniw kwasowo-ołowiowych [76]

Osłona baterii ogniw kwasowo-ołowiowych składa się z czterech komór rozdzielonych metalowymi przegrodami. W przegrodach wykonane są odpowiednie otwory, mające umożliwić efektywną jej wentylację. Otwory te używane są również, podczas prowadzenia połączeń elektrycznych pomiędzy ogniwami. W każdej z komór osłony znajduje się 18 sztuk ogniw (sumarycznie 72 ogniwa w baterii). W celu wykonania badań symulacyjnych, opracowano odpowiedni model geometryczny osłony baterii kwasowo-ołowiowych (rys. 6.1) odwzorowujący warunki rzeczywiste.



Rys. 6.1. Geometryczny model osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych [46] a - rzeczywisty, b - uproszczony

W celu uproszczenia obliczeń, model ten zmodyfikowano przez usunięcie z osłony niektórych mechanicznych elementów zewnętrznych, nie wpływających na sposób przemieszczania się wodoru [46]. Zamodelowano natomiast wszystkie wewnętrzne przegrody oddzielające poszczególne komory osłony. Do budowy modeli numerycznych i przeprowadzenia symulacji wykorzystano oprogramowanie Autodesk Simulation CFD. Model obliczeniowy utworzono poprzez dyskretyzację modelu geometrycznego. Liczba węzłów i elementów modelu obliczeniowego (osłony akumulatorów oraz przestrzeni wyrobiska chodnikowego) wynosiła: 520000 węzłów i 1981103 elementów.

Na rysunku 6.2 przedstawiono dla przykładu siatkę elementów skończonych modelu obliczeniowego osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych wraz z przyjętą przestrzenią wyrobiska chodnikowego.



Rys. 6.2. Siatka elementów skończonych [46] a - osłony akumulatorowej, b - przestrzeni wyrobiska chodnikowego

Bazując na unormowaniach prawnych opisanych w normie PN-EN 60079-7:2016-02. *Atmosfery wybuchowe. Część 7: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej "e"* - ilość wodoru wydzielającą się z ogniw podczas przeładowywania można wyznaczyć z zależności:

$$H_2 = n_{ogniw} \cdot q_{ogniw} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \tag{6.1}$$

gdzie:

 H_2 – intensywność emisji wodoru, m³/h,

nogniw – liczba ogniw,

qogniwa – pojemność ogniwa, Ah.

W tabeli 6.2 oraz na rysunku 6.3 przedstawiono warunki brzegowe przyjęte do obliczeń. Wszystkie warianty obliczeniowe wykonano dla stanu ustalonego, dla różnych wlotowych prędkości powietrza przepływającego przez wyrobisko chodnikowe (od 1 m/s do 5 m/s), w którym zasymulowano usytuowanie osłony baterii ogniw. Zmienność wlotowych prędkości powietrza jest wynikiem sumy bądź różnicy założonej prędkości przemieszczającej się lokomotywy (2 m/s – 4 m/s) i prędkości powietrza (1 m/s) na drodze transportowej. Stężenie wodoru, jak i inne warunki brzegowe pozostały niezmienne. Po sprecyzowaniu warunków brzegowych dla modelu obliczeniowego zasymulowanej osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych, zlokalizowanej w wyrobisku chodnikowym, przystąpiono do przeprowadzenia symulacji komputerowych zarówno koncentracji, jak i dróg rozpływu wodoru we wnętrzu osłony bateryjnej [46].

Wartość Nazwa parametru Jednostka 1 Prędkość powietrza [m/s]2÷4 Prędkość lokomotywy [m/s]Objętość natężenia [m³/h] 0,36 przepływu wodoru $[^{\circ}C]$ 20 Temperatura otoczenia 101 Ciśnienie otoczenia [kPa] 0,63 Współczynnik dyfuzji $[cm^2/s]$ Gęstość wodoru $[kg/m^3]$ 0.09 Gęstość powietrza $[kg/m^3]$ 1,20

Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń [46]



Rys. 6.3. Warunki brzegowe modelu obliczeniowego, symulowanej osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych, zlokalizowanej w wyrobisku chodnikowym [46]

W tym celu, model osłony bateryjnej został podzielony w dziewięciu płaszczyznach, tak jak pokazano na rysunku 6.4. Wizualizacja wyników symulacji, została przedstawiona w postaci map konturowych, w miejscach wyznaczonych przez ww. płaszczyzny ($P_1 \div P_9$).

Tabela 6.2.



Rys. 6.4. Płaszczyzny P1 do P9, względem których przedstawiono wyniki symulacji [46]

Dla każdego wariantu prędkości przepływu powietrza wyznaczono:

- linie przemieszczania się cząstek mieszaniny powietrzno-wodorowej (kolor linii odzwierciedla prędkość, z jaką poruszają się cząstki mieszaniny powietrzno-wodorowej),
- mapy konturowe, dla płaszczyzn P₁ P₉, przedstawiające udział procentowy mieszaniny powietrzno-wodorowej (kolor ciemno-niebieski "0" oznacza, że w danym miejscu jest 100% powietrza, kolor czerwony "1" że jest 100% wodoru).

Wizualizację wyników symulacji komputerowych koncentracji i rozchodzenia się wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw kwasowoołowiowych, dla wlotowych prędkości powietrza o wartości v = 2 m/s pokazano dla przykładu na rysunkach 6.5 - 6.7.



Rys. 6.5. Linie przemieszczania się mieszaniny powietrzno-wodorowej [46]



Rys. 6.6. Udział procentowy mieszaniny powietrzno-wodorowej, widok izometryczny [46]



Rys. 6.7. Udział procentowy mieszaniny powietrzno-wodorowej, widok z góry płaszczyzny P5 [46]

Wyniki symulacji komputerowych koncentracji i rozchodzenia się wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych dla założonej wlotowej prędkość powietrza v = 2 m/s przedstawiono w tabeli 6.3.

Na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych koncentracji i dróg rozchodzenia się wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw kwasowoołowiowych stwierdzono, że w czasie jazdy lokomotywy, powietrze oczywiście dostaje się do wnętrza obudowy przeciwwybuchowej, gdzie miesza się z wydzielonym wodorem. Mieszanina powietrzno-wodorowa wypływa poza osłonę bateryjną. Z uzyskanych danych wynika, że wartość stężenia mieszaniny powietrzno-wodorowej wypływającej poza osłonę baterii ogniw kwasowoołowiowych nie stanowi zagrożenia.

Płaszcz.		Udział procentowy mieszaniny	Prędkość przemieszczania mieszaniny
	Dane	powietrzno-wodorowej [%]	powietrzno-wodorowej [m/s]
P1	mini.	0,46	
11	maks.	0,95	
D.	mini. 0,40		v = -0.1
12	maks.	0,95	v _{mini.} – 0,1
D.	mini.	0,68	
13	maks.	0,91	
D,	mini.	0,78	
P 4	maks.	1	
Р.	mini.	0,46	$\mathbf{v}_{\ell} = 0.4$
15	maks.	0,95	v sr. – 0,+
Pc	mini.	0,75	
10	maks.	1	
P ₇	mini.	0,53	
1/	maks.	1	
Po	mini.	0,55	v = -22
18	maks.	0,94	v maks. $-2,2$
Po	mini.	0,90	
19	maks.	0,96	

Wyniki symulacji komputerowych koncentracji i rozchodzenia się wodoru
we wnętrzu osłony baterii ogniw [46]

Tabela 6.3.

We wnętrzu zaś osłony bateryjnej, otrzymano lokalnie koncentracje wodoru przekraczające wartość dopuszczalną. Najwyższe stężenie wodoru wystąpiło bezpośrednio nad ogniwami (płaszczyzna P₄) oraz pod kołnierzem mocującym pokrywy osłony bateryjnej. Lokalne stężenie wodoru przewyższające dopuszczalną wartość, wynika ze zbyt małej ilości powietrza zewnętrznego penetrującego dany obszar osłony baterii ogniw. Zatem prędkość powietrza ma istotny wpływ na sposób oraz skuteczność rozchodzenia się wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych, tak jak pokazano dla przykładu na

rysunku 6.8 (intensywność mieszania się powietrza z wodorem). Zwiększenie bowiem prędkości powietrza powoduje oczywiście "wywiewanie" większej ilości wodoru z wnętrza osłony na zewnątrz.



Rys. 6.8. Udział procentowy mieszaniny powietrzno-wodorowej – widok z płaszczyzny P1 [46] a) v = 2 m/s, b) v = 3 m/s, c) v = 4 m/s, d) v = 5 m/s

Wyniki z przeprowadzonych obliczeń numerycznych CFD osłony baterii ogniw pozwalają na określenie rozkładu procentowego stężenia wodoru wewnątrz i na zewnątrz tej osłony, wraz z wizualizacją linii prądu powietrza oraz rozchodzenia się cząstek gazu wewnątrz osłony. Przeprowadzone symulacje umożliwiają określenie kierunku i intensywności przepływającego powietrza do i z osłony akumulatorowej, a więc określenie wpływu otworów wentylacyjnych. Małe średnice otworów wentylacyjnych oraz ich niewłaściwe rozmieszczenie sprzyjają gromadzeniu się wodoru wewnątrz osłony. Dla wszystkich wykonanych symulacji, procentowe stężenie wodoru znajdowało się w przedziale od 40% do 100% (lokalnie). Zatem w celu zwiększenia intensywności mieszania się powietrza z wodorem, niezbędnym jest zwiększenie intensywności wymiany gazu poprzez:

- zastosowanie otworów przewietrzających o większych średnicach lub zwiększenie ich ilości,
- zmianę lokalizacji otworów wentylacyjnych na powierzchniach prostopadłych do kierunku przepływu powietrza (w tym wypadku

powinny to być dwie powierzchnie umożliwiające wlot powietrza i wylot mieszaniny powietrzno-wodorowej),

 zastosowanie tzw. "kierownic wlotowo-wylotowych", kierujących odpowiednio strumieniem przepływającego powietrza w kierunku ogniw akumulatorowych i w efekcie efektywnego "odprowadzenia" nadmiaru wodoru na zewnątrz.

6.2. Badania i analiza pracy wybranych akumulatorowych źródeł energii elektrycznej lokomotywy górniczej podczas ładowania w komorze ładowania w kopalni

W celu określenia rzeczywistego zagrożenia emisją gazu elektrolitycznego warunkach kopalnianych przeprowadzono odpowiednie badania W weryfikacyjne dla wybranych akumulatorowych źródeł energii elektrycznej lokomotywy górniczej typu Lea BM-12. Badania prowadzone były dwutorowo, to znaczy zarówno na obiekcie rzeczywistym w kopalni, jak i na laboratoryjnym stanowisku badawczym. Celem badań był pomiar wartości stężenia gazu elektrolitycznego i jego zmiany w trakcie ładowania (doładowywania) baterii ogniw kwasowo-ołowiowych. Każda próba rejestrowania emisji gazu elektrolitycznego (wodoru) ściśle powiązana była z rejestracją wartości i charakteru przebiegu prądu płynącego przez baterię. Na podstawie uzyskanych wyników określono wpływ zarówno natężenia, jak i odkształcenia prądu ładującego na poziom i intensywność wydzielania się wodoru we wnętrzu baterii ogniw kwasowo-ołowiowych.

Lokomotywy typu Lea BM-12, aktualnie pracujące w kopalni, w której prowadzone były badania, zasilane są jak już powiedziano z baterii akumulatorów o pojemności 880 Ah, złożonej z 72 sztuk ogniw typu 11PzB 880. Całość zamknięta jest w ognioszczelnej osłonie akumulatorowej typu SBS-4, zapewniającej bezpieczeństwo podczas pracy maszyny. Ładowanie baterii akumulatorów przed jej eksploatacją odbywa się w specjalnym, wydzielonym do tego celu pomieszczeniu zwanym ładownią akumulatorów. Rozładowana bateria, znajdująca się na lokomotywie, zostaje przemieszczona na wydzielone stanowisko i usytuowana na specjalnym stole (rys. 6.9).



Rys. 6.9. Widok osłony baterii usytuowanej na stole podczas ładowania ogniw [54]

Ładownia akumulatorów, zlokalizowana w kopalni, w której prowadzone były próby, wyposażona była w przekształtniki tyrystorowe typu HMC-PT-02 (produkcji HMC S.A) oraz BMA-180/150 (produkcji Bester) (rys. 6.10). Główną różnicą pomiędzy wymienionymi przekształtnikami jest fakt, że przekształtnik HMC-PT-02 jest w pełni sterowany zaś przekształtnik BMA-180/150 jest nie w pełni sterowany. Należy tutaj powiedzieć, że przekształtniki typu BMA są znacznie częściej stosowane w kopalnianych ładowniach baterii aniżeli jakiekolwiek inne przekształtniki tyrystorowe. Podstawowymi elementami konstrukcji dla przykładu przekształtnika typu BMA-180/150 są: transformator główny, transformator pomocniczy oraz zespół prostowniczy zbudowany na bazie mostka 6-cio pulsowego, w układzie trzech tyrystorów i trzech diod. Parametry techniczne przekształtnika BMA-180/150 są następujące:

_	znamionowe napięcie zasilania	- 3x500 V ±5%
_	znamionowa częstotliwość	- 50 Hz ±2%
_	sprawność przekształtnika	- 0,85
_	współczynnik mocy	- 0,6
_	znamionowe napięcie wyjściowe	- 198 V
_	znamionowy prąd wyjściowy	- 150 A
		27.5.4

- prąd formowania baterii - 37,5 A



Rys. 6.10. Widok stosowanych przekształtników tyrystorowych [54] a - typ HMC-PT-02, b - typ BMA-180/150

Program badań zapewniał prowadzenie pomiarów stężenia gazu elektrolitycznego z jednoczesnym rejestrowaniem przebiegu prądu ładującego. Pomiar gazu był pomiarem ciągłym (urządzenie rejestrujące zapisywało stężenie wodoru w odstępach co 10 sekund), zaś rejestracja przebiegów prądu ładującego odbywała się z częstotliwością co 2 minuty. Ładowanie baterii ogniw, w warunkach rzeczywistych w kopalni, było przeprowadzane zgodnie z procedurą ładowania, składającą się z dwóch następujących faz ładowania:

Faza I – ładowanie baterii prądem o możliwie jak najwyższym natężeniu, nieprzekraczającym wartości maksymalnej prądu wyjściowego przekształtnika BMA. Faza I zostaje uznana za zakończoną w momencie rozpoczęcia, przez ogniwa, gazowania i uzyskania na zaciskach ogniw napięcia o wartości 2,4 V/ogniwo. W zależności od stopnia rozładowania czas ładowania podczas fazy I wynosi około 7-9 godzin.

Faza II – ładowanie baterii akumulatorów prądem o natężeniu około 50 A. Czas trwania fazy II nastawiany jest ręcznie przez pracowników kopalni. Z reguły jest to czas pomiędzy 5-7 godzin. Wyłączenie przekształtnika następuje automatycznie po upływie nastawionego czasu bądź zdalnie w przypadku zaobserwowania oznak pełnego naładowania. Baterię można uznać za w pełni naładowaną, jeżeli w dwóch kolejnych pomiarach dokonanych w odstępach 1 godzinnych zostanie stwierdzone:

- stała wartość napięcia, na zaciskach ogniw, z dokładnością do +/- 0,05 V,
- stała gęstość elektrolitu,
- silne gazowanie ogniw.

Z uwagi na fakt, iż podczas prób nie było możliwości określenia gęstości elektrolitu, to w czasie ładowania kontrolowano wyłącznie wartość napięcia na pojedynczych ogniwach. Termin "silne gazowanie ogniw" jest zbyt mało precyzyjny, aby móc się opierać na tym kryterium. Ponieważ istotą prób w ładowni był pomiar i rejestrowanie intensywności gazowania, dlatego też na jej podstawie nie zdecydowano się na przerwanie prób.

Stanowisko pomiarowe zostało wykonane zgodnie z uproszczonym schematem elektrycznym pokazanym na rysunku 6.11, gdzie CP oznacza czujnik wielogazowy typu MX4 znajdujący się we wnętrzu osłony bateryjnej SBS-4, natomiast DPO stanowi rejestrator prądowy. Rzeczywisty widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 6.12.



Rys. 6.11. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego [54]

Zgodnie z określoną procedurą ładowania [53], pokrywy osłony baterii ogniw muszą być usunięte w celu zapewnienia maksymalnej skuteczności przewietrzania tych ogniw, korki zaś do napełniania powinny zostać otwarte w celu umożliwienia swobodnej emisji gazu elektrolitycznego na zewnątrz ogniwa. Ilość wody demineralizowanej w każdym ogniwie była uzupełniona zgodnie z procedurą ładowania. Przebieg prądu ładowania pokazano na rysunku 6.13. Jego kształt odpowiada zastosowanemu prostownikowi 6-cio pulsowemu. Średnia wartość skuteczna natężenia prądu wynosiła $I_{sr} = 150$ A. Na rysunku 6.14 pokazano dla przykładu rozkład wyższych harmonicznych prądu ładowania, w którym występują kolejne harmoniczne (zarówno parzyste, jak i nieparzyste), przy czym najwyższe amplitudy mają harmoniczne h1 i h2. Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w prądzie wynosi $THD_I = 0,26\%$ (h1=300 Hz).



Rys. 6.12. Widok stanowiska pomiarowego wraz z obiektem badanym [54]



Rys. 6.13. Przebieg prądu ładowania podczas I fazy procesu [54]



Rys. 6.14. Rozkład wyższych harmonicznych prądu ładowania [54]

Stężenie wodoru w trakcie drugiej fazy ładowania baterii ogniw ołowiowych, jak pokazano dla przykładu na rysunku 6.15 jest intensywniejsze. Wynika to z faktu, że bateria akumulatorów w trakcie drugiej fazy ładowania jest już praktycznie w pełni naładowana. Część zatem energii elektrycznej dostarczana do baterii ogniw, reaguje z cząsteczkami ołowiu gromadząc ładunek, natomiast pozostała część energii wchodzi w reakcję z wodą powodując jej elektrolizę (rozbicie wody na tlen i wodór). Przekroczenie dolnej granicy wybuchowości (DGW) następuje w momencie przeładowywania baterii, czyli w momencie, kiedy napięcie na pojedynczym ogniwie osiąga wartość U = 2,7 V. Od tego momentu większość energii dostarczanej do baterii reaguje z wodą, generując w efekcie cząsteczki wodoru.



Rys. 6.15. Przebieg stężenia wodoru w funkcji czasu – faza II ładowania baterii ogniw ołowiowych [54]

Uzyskane i zaprezentowane przebiegi stężenia wodoru odnoszą się do procesu ładowania baterii ogniw prądem o przebiegu wynikającym z budowy prostownika 6-cio pulsowego. W celu sprawdzenia wpływu innego zniekształcenia przebiegu prądu ładowania na emisję gazu elektrolitycznego, przeprowadzono badanie procesu ładowania baterii ogniw za pomocą nie w pełni sterowanego przekształtnika typu BMA 180/150, którym dysponowała kopalnia, w której prowadzono badania. Aby zapewnić powtarzalność pomiarów, badaniom poddano tą samą baterię ogniw (po jej uprzednim rozładowaniu w trakcie eksploatacji). Stanowisko pomiarowe oraz rejestrowane parametry pozostały bez zmian. Na rysunku 6.16 pokazano dla przykładu przebieg prądu ładowania generowanego poprzez nie w pełni sterowany przekształtnik.



Rys. 6.16. Przebieg prądu wraz z analizą FFT po załączeniu niesprawnego przekształtnika BMA-180/150 [54]

Przebieg prądu ładowania (rys. 6.16) znacząco jak widać odbiega od charakteru przebiegu prądu zarejestrowanego podczas próby z w pełni sterowanym przekształtnikiem BMA. Podobnie, jak i podczas pierwszej próby, przebieg prądu zniekształcony jest też wyższymi harmonicznymi, ale w znacznie większym stopniu (rys. 6.17).



Rys. 6.17. Rozkład wyższych harmonicznych prądu ładowania dla przekształtnika nie w pełni sterowanego [54]

Częstotliwość podstawowej harmonicznej (h1) w tym przypadku wynosi 50 Hz. Wartość składowej stałej odpowiada wartości prądu ładującego (w tym przypadku h0 = 55 A). Najwyższą amplitudę w tym przypadku mają pierwsze trzy harmoniczne o wartości kolejno h1 = 28 A, h2 = 24 A oraz h3 = 38 A. Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu wynosi

 $THD_I = 1,62\%$. Poza zakłóceniami przebiegu prądu ładowania wprowadzanymi przez nie w pełni sterowany przekształtnik tyrystorowy, dodatkowe zakłócenia mogą być powodowane przez indukcyjności i pojemności własne przewodów doprowadzających zasilanie do baterii ogniw oraz zakłócenia wprowadzone przez rezystancję wewnętrzną odbiornika, czyli baterii. Z uwagi jednak na fakt, że przewody doprowadzające energię nie zostały wymienione w czasie trwania pomiarów, można przyjąć, że wszelkie zmiany zachodzące w przebiegu prądu ładującego wynikają z charakteru zastosowanego prostownika oraz ze zmian parametrów odbiornika - baterii. Wraz bowiem z coraz wyższym poziomem naładowania baterii zmienia się wartość jej rezystancji wewnętrznej. Na podstawie uzyskanych wyników badań należy zauważyć, że wartość prądu ładującego była ponad dwukrotnie niższa od spodziewanej co oznacza, że bateria nie była w pełni rozładowana. Jeżeli chodzi natomiast o stężenie gazu elektrolitycznego, to po podłączeniu ładowarki i rozpoczęciu procesu ładowania nie zarejestrowano obecności wodoru. Przez pierwszą godzinę ładowania, nie zarejestrowano również wysokiego poziomu stężenia wodoru (sytuacja taka wynika z dobrze przewietrzanej ładowni akumulatorów oraz z niskiego natężenia prądu ładującego w porównaniu do poziomu naładowania baterii). Dopiero w czasie trwania drugiej fazy ładowania baterii zarejestrowano znaczące wartości stężenia wodoru, co dla przykładu pokazano na rysunku 6.18.



Rys. 6.18. Przebieg stężenia wodoru, przekształtnik nie w pełni sterowany – faza II ładowania baterii [54]

Porównując przebiegi stężenia wodoru przy zastosowaniu w pełni sterowanego przekształtnika HMC (rys. 6.15) oraz nie w pełni sterowanego przekształtnika BMA (rys. 6.18) można stwierdzić, że ich kształt jest praktycznie taki sam. W niewielkim tylko stopniu różnią się one wartościami stężenia wodoru w poszczególnych fragmentach procesu ładowania. Z uwagi na fakt, że zarówno kształt przebiegu prądu ładowania, jak i zawartość współczynnika wyższych harmonicznych w obydwu przypadkach była znacząco różna można stwierdzić, że nie miało to praktycznie istotnego wpływu na emisję gazu elektrolitycznego. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można zatem stwierdzić, że odkształcenie przebiegu prądu ładowania w czasie nie ma istotnego wpływu na poziom oraz intensywność emisji wodoru.

Z przeprowadzonej próby ładowania baterii ogniw w ładowni, w kopalni wynika jednak, że końcowemu procesowi ładowania towarzyszy emisja wodoru przekraczająca ponad dwukrotnie dopuszczalne jego stężenie. Taka sytuacja jest niebezpieczna zarówno dla obsługi ładowni, jak i dla samych ogniw.

Jeśli chodzi o odkształcenia prądu doładowującego, to należy podkreślić, że odkształcenia przebiegów prądu, dla każdej z przeprowadzonych prób, były przez cały czas ładowania baterii praktycznie na zbliżonym poziomie. Zmniejszała się bowiem ich amplituda, która pomiędzy pierwszym zarejestrowanym przebiegiem a ostatnim (w trakcie jednej próby ładowania) różniła się jedynie o około 15%. Zmiana amplitudy prądu wynika z ilości ładunku dostarczonego do ogniw w czasie ładowania, a więc jest powiązana ze zmianą wartości rezystancji wewnętrznej ogniwa.

Próby przeprowadzone w komorze ładowania w kopalni, również umożliwiały określenie wpływu odkształcenia przebiegu prądu ładowania na wartość emisji wodoru.

Z uwagi jednak na automatyczny tryb pracy przekształtników BMA 180/150 oraz na wykorzystanie tzw. gotowości baterii ogniw w kopalni nie było możliwym przeprowadzenie podobnych prób wpływu natężenia prądu na emisję gazu elektrolitycznego.

6.3. Badania przebiegu procesu ładowania w symulowanych warunkach laboratoryjnych

Celem badania, było zweryfikowanie wpływu natężenia prądu ładującego na poziom i intensywność wydzielania się wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw kwasowo-ołowiowych dedykowanych do współpracy z górniczą lokomotywą akumulatorową.

Zakres badań obejmował naładowanie baterii do wartości napięcia około 150 V DC, przewietrzenie osłony bateryjnej, zainstalowanie czujników wodoru we wnętrzu osłony a następnie dostarczenie do baterii ładunku elektrycznego o wartości Q = 5,4 Ah. Po zakończeniu procesu ładowania, bateria była przewietrzana celem usunięcia nagromadzonego wodoru, a następnie rozładowywana do początkowego stanu jej pojemności. Ilość dostarczanego do baterii ładunku się nie zmieniała, zmianie natomiast ulegał zarówno czas ładowania, jak i wartość natężenia prądu ładowania (I_L). Badania przeprowadzono dla następujących wartości natężenia prądu elektrycznego:

- $-\quad I_{L}=50\;A,$
- I_L = 100 A,
- I_L = 150 A,
- I_L = 200 A,
- I_L = 250 A.

Obiektem badań była bateria akumulatorów kwasowo-ołowiowych (rys. 6.19), wyposażona w przeciwwybuchowe ogniwa typu PzS produkcji Hawker.



Rys. 6.19. Bateria ogniw kwasowo-ołowiowych, usytuowana na zewnątrz hali badawczej [54]

Badana bateria akumulatorów, miała znamionową pojemność Q = 880 Ah, oraz napięcie nominalne $U_N = 144$ V DC. Podczas ładowania usunięte były jej pokrywy górne. Po przewietrzeniu, we wnętrzu osłony bateryjnej umieszczone zostały czujniki wodorowe (rys. 6.20), a następnie bateria została przykryta powłoką dielektryczną symulującą osłonę (rys. 6.21).



Rys. 6.20. Rozmieszczenie czujników wodorowych we wnętrzu osłony bateryjnej [54]



Rys. 6.21. Zamknięcie baterii osłoną z tworzywa sztucznego [54]

Baterię ogniw, ładowano przy zastosowaniu przekształtnikowego zespołu baterii typu PZB-250/500 (rys. 6.22).



Rys. 6.22. Przekształtnikowy zespół baterii typu PZB-250/500 [54]

Zespół ten zasilany był napięciem trójfazowym o wartości $U_N = 3x400$ V AC. Wartość prądu ładowania, można było regulować w zakresie od kilku amperów do 250 A. Z uwagi na charakter prowadzonych badań, w ładowarce odłączono człon pomiaru napięcia baterii, zaś pomiar wartości napięcia baterii przeprowadzano za pomocą multimetru cyfrowego (rys. 6.23).



Rys. 6.23. Widok multimetru cyfrowego do pomiaru napięcia badanej baterii [54]

Po każdej próbie ładowania, bateria była rozładowywana do wartości początkowej napięcia, jaką zmierzono przed rozpoczęciem pierwszej próby ładowania. Rozładowywanie realizowane było poprzez układ rezystorów dużej mocy (rys. 6.24).



Rys. 6.24. Widok układu rezystorów dużej mocy do rozładowywania baterii ogniw wraz z przyrządami do pomiaru prądu rozładowania oraz rozładowanego ładunku [54]

W trakcie prowadzenia rozładowywania baterii ogniw, mierzono on-line zarówno wartość natężenia prądu rozładowującego, jak i ilość ładunku elektrycznego, przepływającego przez zespół rezystorów. Rozładowanie prowadzono prądem o natężeniu $I_R \approx 77$ A. Przed każdą zmianą wartości prądu ładującego, weryfikowano poprawność działania zastosowanego przekształtnika ładującego typu PZB-250/500, oceniając jego elektryczne przebiegi wyjściowe za pomocą oscyloskopu (rys. 6.25). Zastosowany przekształtnik stanowił 6-pulsowy w pełni sterowalny układ tyrystorowy.



Rys. 6.25. Widok stanowiska do weryfikacji wartości prądu ładującego [54]

Na rysunku 6.26 zaprezentowano dla przykładu przebieg prądu wyjściowego z przekształtnika wraz z jego analizą FFT.



Rys. 6.26. Przebieg prądu ładowania wraz z jego analizą FFT [54]

Jak wynika z zarejestrowanego przebiegu (rys. 6.26), na wyjściu przekształtnika typu PZB-250/500 uzyskuje się prąd w pełni wyprostowany (6 pulsów na okres), w niewielkim tylko stopniu zniekształcony wyższymi harmonicznymi o częstotliwości nośnej $f_N = 300$ Hz (częstotliwość wynikająca

z liczby pulsów przekształtnika). Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych prądu w tym przypadku jest bardzo mały i wynosi $THD_I = 0.4\%$.

Badania prowadzono dla pięciu różnych wartości natężenia prądu ładującego (I_L) w zakresie od 50 A do 250 A. W pierwszej kolejności przeprowadzone zostały trzy próby ładowania (i rozładowania) baterii prądem o natężeniu 50 A, dostarczając każdorazowo taką samą ilość ładunku do baterii równą 5,4 Ah (P1-P3). Następnie następowało rozładowywanie baterii i kolejne ładowanie prądem o natężeniu wyższym o 50 A w stosunku do wartości poprzedniej (P4-P13). W ten sposób próby były przeprowadzone aż do wartości prądu ładowania równego 250 A. W tabeli 6.4 zestawiono dla przykładu pomierzone wartości wybranych wielkości fizycznych dla wszystkich przeprowadzonych prób, natomiast na rysunkach 6.27 - 6.31 pokazano dla przykładu przebiegi stężenia wodoru z prób nr P3, P6, P9, P12 i P13.

Dane Próba	Tryb	Napięcie baterii przed próbą [V]	Prąd [A]	Ładunek [Ah]
P1	ładowanie	158,4	50	5,4
P2	rozładowanie	165,5	77	3
	ładowanie	150,5	50	5,4
Р3	rozładowanie	158,3	77	3
	ładowanie	150,8	50	5,4
P4	ładowanie	152	100	5,4
Р5	rozładowanie	158	77	3
	ładowanie	151	100	5,4
P6	rozładowanie	158	77	3
	ładowanie	151	100	5,4

Zmierzone wielkości podczas pró	by przeładowania	baterii ołowiowych	[54]
		Tabela	6.4.

P7	ładowanie	150,5	150	5,4
P8	rozładowanie	159	77	3
	ładowanie	150,5	150	5,4
Р9	rozładowanie	159,7	77	3
	ładowanie	151	150	5,4
P10	ładowanie	150,5	200	5,4
P11	rozładowanie	159	77	3
	ładowanie	150,5	200	5,4
P12	rozładowanie	159,7	77	3
	ładowanie	151	200	5,4
P13	rozładowanie	159	77	3
	ładowanie	150	250	5,4

cd. tabeli 6.4.



Rys. 6.27. Przebieg stężenia wodoru w trakcie trwania próby P3 [54]



Rys. 6.28. Przebieg stężenia wodoru w trakcie trwania próby P6 [54]



Rys. 6.29. Przebieg stężenia wodoru w trakcie trwania próby P9 [54]



Rys. 6.30. Przebieg stężenia wodoru w trakcie trwania próby P12 [54]



Rys. 6.31. Przebieg stężenia wodoru w trakcie trwania próby P13 [54]

Powyższe przebiegi przedstawiają zmianę stężenia wodoru zarejestrowanego przez czujniki pomiarowe w ciągu całego czasu trwania próby (od chwili załączenia czujnika i jego umieszczenia we wnętrzu skrzyni, aż do otwarcia skrzyni i wyłączenia czujnika po zakończonej próbie). Dlatego też przedstawione przebiegi zawierają poza właściwym fragmentem próby (ładowaniem) również fragment dotyczący jej przewietrzania przed kolejną próbą. Dla ułatwienia porównania tych przebiegów podczas prób tylko ładowania pokazano je na jednym wykresie (rys. 6.32).



Rys. 6.32. Przebieg stężenia wodoru w trakcie ładowania dla prób P3, P6, P9, P12 [54]

Zgodnie z przewidywaniami, wzrost wartości prądu ładowania w sposób znaczący skraca czas przekroczenia 100% wartości DGW, przy dostarczeniu do baterii ładunku za każdym razem o tej samej wartości Q = 5,4 Ah (narastające fragmenty uśrednionych przebiegów dla wszystkich przeprowadzonych prób ładowania pokazano na rysunku 6.33).



Rys. 6.33. Uśrednione przebiegi stężenia wodoru - stroma część przebiegu [54]

Widać, że 5-krotne zwiększenie wartości prądu ładującego skraca w sposób zdecydowany czas osiągnięcia poziomu wodoru przekraczającego wartość 100% DGW. Należy również podkreślić, że stężenie wydzielonego wodoru w każdej z przeprowadzonych prób za każdym razem przekraczało 100% DGW. Oznacza to, że dla w pełni naładowanej baterii ogniw ołowiowych, wytworzenie w procesie hamowania elektrycznego, z odzyskiem energii, ładunku już o niewielkiej wartości (np. 5,4 Ah) stanowi niebezpieczeństwo przekroczenia stężenia 100% DGW wodoru.

Dla wykazania jakie znaczenie ma stopień naładowania baterii na poziom emisji wodoru, przeprowadzono próby doładowywania baterii ogniw, ale po jej uprzednim rozładowaniu o wartość ładunku Q = 35 Ah. Pozostałe wartości prądu ładowania oraz ilości dostarczonego ładunku pozostają bez zmian. Stwierdzono, że pomimo rozładowania baterii, napięcie na jej zaciskach, przed rozpoczęciem próby, utrzymywało się na podobnym poziomie, jak to miało miejsce w przypadku próby przeładowywania baterii (około 151 V). W tabeli 6.5 zestawiono pomierzone wartości wielkości fizycznych podczas próby doładowywania baterii.

				Tabela 6.5.
Dane Próba	Tryb	Napięcie baterii przed próbą [V]	Prąd [A]	Ładunek [Ah]
P1	rozładowanie	151,8	140	34,8
	ładowanie	151,0	200	5,4
P2	rozładowanie	154,4	140	4
	ładowanie	150,5	150	5,4
Р3	rozładowanie	154,8	140	4
	ładowanie	150,8	100	5,4
P4	rozładowanie	154,8	140	4
	ładowanie	150,8	50	5,4
Р5	rozładowanie	154,9	140	4
	ładowanie	150,8	100	24,2

Zmierzone wielkości podczas próby doładowywania baterii ogniw [54]

Jak widać wartość ładunku dostarczonego oraz rozładowanego za każdym razem była taka sama. Podczas ostatniej jedynie próby (P5) przeprowadzono doładowanie baterii, aż do momentu przekroczenia wartości 50% DGW stężenia wodoru (dopuszczalna wartość stężenia wodoru dla baterii pracujących w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem). Na rysunku 6.34 zestawiono dla przykładu uzyskane przebiegi z prób P1-P4 (wyłącznie fragment doładowywania).



Rys. 6.34. Przebiegi doładowania baterii ogniw podczas prób P1-P4 (bateria rozładowana) [54]

Z uzyskanych wyników pomiarów widać, że w przypadku baterii rozładowanej, dostarczenie ładunku o wartości Q = 5,4 Ah nie spowodowało przekroczenia stężenia 100% DGW wodoru, gdyż dla każdej wartości prądu doładowywania stężenie wodoru stabilizowało się na znacznie niższym poziomie równym $H_2 = 9\%$ DGW. Podobnie, jak to miało miejsce w przypadku baterii naładowanej i tym razem w zależności od wartości natężenia prądu doładowującego zmieniał się czas niezbędny do uzyskania wartości $H_2 = 9\%$ DGW. I tak np. dla natężenia prądu czterokrotnie wyższego, czas uzyskania pomierzonego stężenia wodoru był praktycznie czterokrotnie krótszy.

Dla porównania na rysunku 6.35 pokazano pełną próbę rozładowywania i doładowywania baterii, aż do przekroczenia bezpiecznej wartości poziomu stężenia wodoru (50% DGW). Ponieważ czujniki wodoru zlokalizowane były w zamkniętej osłonie baterii ogniw ołowiowych, to sygnalizowały one o przekroczeniu dopuszczalnej wartości stężenia wodoru w momencie uzyskania $(H_2 = 50\% \text{ DGW})$. Cała próba P5 trwała około 21 minut, z czego pierwsze 8 minut stanowił czas niezbędny do przewietrzenia i rozładowania baterii. Właściwa próba doładowania trwała więc niecałe 14 minut. W tym czasie do baterii został dostarczony ładunek o wartości Q = 24,2 Ah. Przekroczenie dopuszczalnej wartości stężenia wodoru nastąpiło po upływie około 11 minut od chwili rozpoczęcia procesu ładowania. W przeciągu kolejnych niespełna 2 minut wartość stężenia wodoru wzrosła do poziomu $H_2 = 95\%$ DGW. W tym momencie próbę zakończono a czujnik wyjęto z wnętrza osłony. Analizując wyniki poziomu i przebiegu narastania stężenia wodoru, można stwierdzić, że gdyby próba doładowywania trwała chociażby o 0,5 minuty dłużej, to z pewnością stężenie wodoru we wnętrzu osłony przekroczyłoby 100% DGW.

Można więc stwierdzić, że przekroczenie dopuszczalnego poziomu stężenia wodoru, jest możliwe również w przypadku baterii nienaładowanej. Zależy to jednak od ilości energii dostarczonej do tej baterii. Intensywność natomiast emisji gazu elektrolitycznego, zależy od wartości natężenia prądu doładowującego.



Rys. 6.35. Pełny przebieg przeładowywania baterii ogniw podczas prób P5 (bateria rozładowana) [54]

Zgodnie z zaleceniami producentów, podczas pracy baterii ogniw ołowiowych, powinny być kontrolowane dwa parametry:

- stężenie wodoru,
- temperatura elektrolitu.

Producenci ogniw ołowiowych zalecają, żeby temperatura pracy ołowiowej baterii trakcyjnej nie przekraczała 40°C. Wyższa temperatura bowiem może spowodować nieodwracalne uszkodzenia akumulatora, co bezpośrednio przekłada się na jego żywotność. Z temperaturą ogniw ołowiowych związana jest również gęstość ich elektrolitu. Im wyższa jest bowiem temperatura ogniwa, tym niższa jest gęstość jego elektrolitu, a co za tym idzie większa zdolność ogniwa do emisji wodoru (elektroliza zachodzi szybciej i gwałtowniej).

Ostatnie zatem badania dotyczyły zależności temperatury ogniwa oraz gęstości jego elektrolitu od wartości prądu doładowującego. Badaniom zatem poddano tę samą baterię ogniw ołowiowych po uprzednim jej naładowaniu oraz przewietrzeniu. Na czterech wybranych losowo ogniwach zainstalowano czujniki temperatury, zaś za pomocą specjalistycznego przyrządu, zmierzono gęstość ich elektrolitu. Próbę rozpoczęto od przeładowania baterii prądem o natężeniu 150 A (do naładowanej baterii dostarczono ładunek o wartości Q = 5,4 Ah podobnie jak to miało miejsce w poprzednich próbach). Po zakończeniu przeładowywania, pomierzono i zarejestrowano wartości temperatury ogniw z zastosowanymi czujnikami temperaturowymi oraz ponownie dokonano pomiaru gęstości ich elektrolitu. Wyniki z przeprowadzonej próby zestawiono w tabeli 6.6.

Wyniki badania	wpływu prądu	ładowania na	temperaturę	ogniwa
	oraz gęstość je	go elektrolitu	[54]	

Parametr	TemperaturaGęstość eogniwa [°C][g/c		lektrolitu m³]	Napięcie baterii [V]		
Ogniwo	Przed próbą	Po próbie	Przed próbą	Po próbie	Przed próbą	Po próbie
ogniwo 1	31,1	31,1	1,22	1,22	151,4	153,6
ogniwo 2	30,8	30,9	1,24	1,24	151,4	153,6
ogniwo 3	30,6	30,8	1,23	1,23	151,4	153,6
ogniwo 4	30,9	31	1,22	1,22	151,4	153,6

Jak wynika z uzyskanych wyników pomiarów, temperatura monitorowanych ogniw, podczas doładowania baterii, wzrosła bardzo niewiele $(0,1^{\circ}C)$, natomiast gęstość elektrolitu pozostała bez zmian. Bardzo możliwe, że czas trwania doładowywania był zbyt krótki (t = 129 s), żeby gęstość elektrolitu uległa zmianie.

Tabela 6.6.

7. Propozycja rozwiązania systemu sterowania bezpieczną pracą zarówno innowacyjnego układu, jak i pracą istniejących w praktyce układów sterowania górniczych lokomotyw akumulatorowych

Przeprowadzone badania wykazały, że wraz z odzyskiem energii elektrycznej w procesie hamowania elektrycznego, ilość wodoru wydzielająca się z baterii ogniw może niestety przekraczać dopuszczalne wartości zdefiniowane w odpowiednich przepisach i normach zharmonizowanych. Z uwagi na stwierdzony fakt, iż nowoopracowany układ zasilająco-sterujący lokomotywy akumulatorowej umożliwia odzysk energii na znacznie wyższym poziomie (około 30%) w porównaniu z dotychczasowymi układami (około 15%) to niezbędnym jest jego zmodyfikowanie pod kątem konieczności zastosowania również układu monitorowania parametrów pracy stosowanych ogniw ołowiowych. W tym też celu opracowany został innowacyjny system monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych, zintegrowany z układem zasilająco-sterującym lokomotywy akumulatorowej. Założeniem opracowanego systemu, jest umożliwienie maksymalizacji odzysku energii z zapewnieniem utrzymania bezpiecznego poziomu emisji gazu elektrolitycznego, wydzielanego w procesie hamowania elektrycznego. Opracowany system powinien być prosty w budowie, niezawodny w działaniu oraz bezpieczny w użytkowaniu. Konstrukcja systemu powinna być zwarta o niewielkich gabarytach umożliwiających łatwy montaż w istniejących osłonach baterii akumulatorów. Proponowane rozwiązanie, zgodnie z założeniami, ma realizować funkcję kontrolną i informacyjną. Użytkownik (maszynista) obsługujący lokomotywe akumulatorowa zasilana z ogniw ołowiowych, bedzie otrzymywać informację na temat wartości stężenia wodoru we wnętrzu baterii wraz z wartością temperatury w otoczeniu ogniw. Na tej podstawie będzie on decydował o podejmowaniu odpowiednich działań, jeżeli wartość któregoś z monitorowanych parametrów zostanie przekroczona. System ma za zadanie wspomagać pracę operatora lokomotywy akumulatorowej.

7.1. Sposób rozwiązania systemu i dobór jego elementów podstawowych

Działanie opracowanego systemu monitorującego polega na ciągłym pomiarze wartości temperatury ogniw oraz stężenia gazu elektrolitycznego (wodoru) wydostającego się z tych ogniw ołowiowych podczas procesu ich ładowania/doładowywania. Pomiar temperatury realizowany jest za pomocą dwóch czujników temperatury typu AD22100. Za pomiar stężenia wodoru odpowiadają zaś dwie zastosowane komory eksplozymetryczne typu EKP-1/NW. Przy czym ważnym aspektem jest w tym przypadku możliwość pomiaru w dwóch zakresach – niskim do 100% DGW (dolna granica wybuchowości) oraz wysokim powyżej 100% DGW. Taki sposób pomiaru jest wymagany z uwagi na konieczność uzyskania dopuszczenia do pracy w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu lub/i pyłu weglowego. Wszystkie czujniki podłączone są do przetwornika analogowo-cyfrowego, w który wyposażony jest mikrokontroler AVR. Zmierzone napięcie przez przetwornik a/c mikrokontrolera, jest przetwarzane na odpowiednia wartość liczbową. W zależności od funkcji czujnika (pomiar temperatury lub stężenia gazu) uzyskane wartości liczbowe są porównywane z odpowiednia liczbą wzorcową zapisaną w programie mikrokontrolera napisanym w języku C. W efekcie uzyskuje się informację, która jest wysyłana poprzez magistralę CAN do jednostki sterującej urządzeniem i do modułu wyświetlacza. Dodatkowo jako opcję, przewidziano możliwość podłączenia, poprzez magistralę CAN (Controller Area Network), przekaźnika wykonawczego, który będzie włączał sygnalizację dźwiękowa lub świetlną jako ostrzeżenie obsługi.

Alternatywnie przewidziano do opracowania dwa sposoby rozwiązania (warianty pracy) systemu monitoringu parametrów bezpiecznej pracy baterii akumulatorów ołowiowych lokomotywy górniczej.

- WARIANT 1 zastosowano mikrokontroler firmy ATMEL typu ATMEGA644P, do którego dołączono układ konwertera RS/CAN MCP2515 oraz układ nadajnika CAN MCP2551 (rys. 7.1).
- WARIANT2 przewidziano wykorzystanie mikrokontrolera firmy ATMEL typu AT90CAN128 wyposażonego w interfejs magistrali CAN do którego przyłączono układ nadajnika CAN MCP2551 oraz wyświetlacz LCD. Rolę wyświetlacza LCD będzie spełniał wyświetlacz 2x20 znaków np. typu WC2002A-STBLWHC06 lub wyświetlacz 2x40 znaków np. typu WC4002A0SFGLYNC06 z kontrolerem zgodnym ze standardem sterownika LCD HD44780 (rys. 7.2).



Rys. 7.1. Schemat blokowy systemu monitorowania baterii ogniw ołowiowych – Wariant I [54]



Rys. 7.2. Schemat blokowy systemu monitorowania baterii ogniw ołowiowych – Wariant II [54]
Autonomiczny system monitoringu parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych lokomotywy górniczej z założenia musi być wykonany jako urządzenie budowy przeciwwybuchowej (tylko takie urządzenie może być bezpiecznie zainstalowane we wnętrzu skrzyni baterii akumulatorów kwasowoołowiowych). System ten składa się z dwóch niezależnych, współpracujących ze sobą modułów elektrycznych:

- modułu nadajnika,
- modułu odbiornika.

Moduł nadajnika systemu, przewidziany jest do umieszczenia we wnętrzu skrzyni baterii akumulatorów zaś miejsce lokalizacji modułu nadajnika nie zostało jeszcze definitywnie ustalone (np. w kabinie maszynisty). Wiadomo natomiast, że z uwagi na konstrukcję skrzyń baterii akumulatorów stosowanych w górnictwie węgla kamiennego, należy zastosować dwa takie moduły nadajnika.

W skład modułu opracowanego nadajnika wchodzą następujące podstawowe elementy i podzespoły:

– Moduł Bluetooth typu WT41-E-A.

Komunikacja Bluetooth jest przewidziana jako podstawowy interfejs komunikacyjny zastosowany w opracowanym systemie. Umożliwia ona transmisje danych pomiędzy modułem nadajnika a modułem odbiornika.

- Układ scalony typu AT90CAN128-16AU, mikrokontroler AVR, SMD.
 Zbudowany przy wykorzystaniu mikrokontrolera AVR, stanowi podstawowy element modułu nadajnika i odpowiada za nadzorowanie jego pracy. Gromadzi informacje przesyłane z czujników oraz odpowiada za ich prawidłową pracę.
- Układ scalony typu PCA82C250T.
 Pełni funkcję interfejsu komunikacyjnego CAN, włączony jest w linię Rx oraz Tx na głównej magistrali CAN pomiędzy modułem nadajnika a modułem odbiornika (opcja), jak również pomiędzy modułem odbiornika a sterownikiem maszyny górniczej.
- Układ scalony typu HCPL-0931-000E.
 Stanowi barierę ochronną magistrali CAN z uwagi na potrzeby zapewnienia iskrobezpieczeństwa modułu nadajnika oraz modułu odbiornika.

- Układ scalony typu LM7805.
 Odpowiada za stabilizację napięcia modułu nadajnika i modułu odbiornika.
- Układ scalony typu LM317.
 Jest wykonany w postaci regulowanego stabilizatora napięcia na potrzeby zapewnienia iskrobezpieczeństwa modułów nadajnika i odbiornika.
- Czujnik temperatury typu AD22100KTZ.
 Cyfrowy czujnik temperatury będący jednym z dwóch podstawowych czujników monitorujących parametry bezpiecznej pracy ogniw kwasowo-ołowiowych.
- Eksplozymetryczna komora pomiarowa typu EKP-1/NW.
 Komora eksplozymetryczna odpowiada za pomiar stężenia wodoru. (Ważnym atutem aplikacji jest tutaj możliwość zapewnienia pomiaru w dwóch zakresach – niskim do 100% DGW oraz wysokim powyżej 100% DGW. Taki zakres pomiarowy jest wymagany, jak już powiedziano, z uwagi na konieczność uzyskania dopuszczenia do pracy w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu lub/i pyłu węglowego).
- Przetwornik DC/DC typu DC1S-0505S.
 Przetwornik DC/DC odpowiada za zasilanie obwodów mikrokontrolera oraz interfejsu komunikacyjnego CAN i jednocześnie zapewnia separację elektryczną między obwodami komunikacyjnym a nadzorującymi (AVR).
- Przetwornik DC/DC typu 0503S.
 Ten przetwornik DC/DC odpowiada za zasilanie obwodów interfejsu komunikacyjnego Bluetooth, zapewniając równocześnie separację pomiędzy obwodami komunikacyjnym a nadzorującymi (AVR).

Moduł odbiornika opracowanego systemu zbudowany jest w podobnej strukturze jak moduł nadajnika. Szczegółowe różnice konstrukcyjne wynikają jedynie z pełnionej funkcji. Moduł odbiornika nie posiada na przykład czujników pomiarowych ani nie dysponuje możliwością zapisywania danych na karcie SD. Posiada natomiast wyświetlacz, którego pozbawiony jest moduł nadajnika. Wyświetlacz LCD typu DEM40271SYH-LY.
 Rolą zastosowanego wyświetlacza LCD, jest wyświetlanie parametrów rejestrowanych przez moduł nadajnika, celem informowania obsługi lokomotywy górniczej o parametrach bezpiecznej pracy baterii akumulatorów kwasowo-ołowiowych.

7.2. Sposób współpracy systemu z nowoopracowanym innowacyjnym układem zasilająco-sterującym

Współpraca opracowanego systemu monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych (któremu nadano akronim LASS-1 lead acid safety system), polega na zintegrowaniu go z opracowanym układem zasilająco-sterującym górniczej lokomotywy akumulatorowej. Na rysunku 7.3 pokazano schemat blokowy układu zasilająco-sterującego po zintegrowaniu go z systemem monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych typu LASS-1.



Rys. 7.3. Schemat blokowy zmodyfikowanego układu zasilająco-sterującego [54]

W czasie pracy lokomotywy system LASS-1 monitoruje wartości stężenia wodoru we wnętrzu skrzyni (osłony) baterii akumulatorów oraz temperaturę ogniw. Układ sterowania lokomotywy przesyła do systemu LASS-1 informację odnośnie do wartości natężenia prądu płynącego przez baterię ogniw ołowiowych. Te trzy informacje są następnie odpowiednio przetwarzane oraz analizowane w mikroprocesorze systemu LASS-1. Jeżeli wartość stężenia wodoru lub temperatury baterii ogniw ołowiowych przekroczy wartość ustaloną uznaną za bezpieczną, wówczas system LASS-1 wyśle informację do układu sterowania, który poprzez przekształtnik energoelektroniczny ograniczy wartość natężenia prądu doładowującego baterię ogniw ołowiowych. Nadmiar zaś energii uzyskanej w procesie rekuperacji powinien być odpowiednio rozproszony np. na

ciepło (w celu ogrzewania kabiny maszynisty). Natomiast w przypadku, gdy wartość stężenia wodoru we wnętrzu skrzyni baterii ogniw przekroczy 100% DGW (dolnej granicy wybuchowości), wówczas zadaniem systemu monitorowania parametrów bezpiecznej pracy ogniw ołowiowych LASS-1 jest wysłanie informacji do sterownika maszyny celem poinformowania operatora o możliwym zagrożeniu oraz konieczności podjęcia przez niego działań mających na celu zatrzymanie lokomotywy. Ponieważ system LASS-1 jest systemem automatycznym wyposażonym we własne źródło zasilające, to po odłączeniu maszyny spod napięcia system ten cały czas monitoruje parametry bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych (powyżej wartości 100% DGW). Jeżeli wartość stężenia gazu elektrolitycznego zmaleje poniżej wartości bezpiecznej, wówczas system LASS-1 wysyła odpowiednią informację do układu sterowania. Z uwagi na fakt, że przewietrzanie skrzyni baterii ogniw ołowiowych jest pasywne i zależy wyłącznie od prędkości powietrza znajdującego się w wyrobisku korytarzowym kopalni, to w wariancie II rozwiązania przewidziano odpowiedni aktywny układ przewietrzania również skrzvni baterii akumulatorów. Polega on na doposażeniu kabin operatora górniczej lokomotywy akumulatorowej w butlę ze sprężonym powietrzem, które za pośrednictwem odpowiednich przewodów doprowadzone zostanie do wnętrza skrzyni baterii ogniw ołowiowych. W sytuacji więc, kiedy wartość stężenia gazu elektrolitycznego (wodoru) zbliży się do wartości 100% DGW, wówczas system LASS-1 automatycznie uruchomi aktywne przewietrzanie wnętrza skrzyni. Doprowadzone sprężone powietrze, wymiesza się wówczas z wydzielonym gazem, powodując tym samym jego rozrzedzenie i zmniejszenie wartości stężenia. Na rysunku 7.4 pokazano schemat ideowy układu zasilającosterującego lokomotywy akumulatorowej, zintegrowanego z systemem monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych. Integracja opracowanego systemu monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych z opracowanym układem zasilajaco-sterujacym górniczej lokomotywy akumulatorowej polepszy jego funkcjonalność oraz umożliwi bezpieczne stosowanie tego typu ogniw zapewnieniem efektywnej rekuperacji energii.



Rys. 7.4. Schemat ideowy zmodyfikowanego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej [54]

Dzięki wykorzystaniu technologii komunikacji bezprzewodowej opracowany system LASS-1 może być usytuowany we wnętrzu skrzyni baterii ogniw ołowiowych. Uniwersalność tego systemu umożliwia jego zastosowanie zarówno w nowych rozwiązaniach (dzięki pośrednictwu protokołu komunikacyjnego (CAN), jak również w dotychczas stosowanych lokomotywach górniczych.

Należy zaznaczyć, że w górniczych lokomotywach akumulatorowych, skrzynie baterii ogniw posiadają budowę przeciwwybuchową o stopniu ochrony "d" - osłona ognioszczelna. Nadajnik opracowanego systemu monitorowania typu LASS-1 posiada również budowę przeciwwybuchową o stopniu ochrony "m" co oznacza, że może być on zastosowany we wnętrzu takiej obudowy. Dzięki protokołowi komunikacji bezprzewodowej, zastosowanemu w opracowanym systemie, komunikacja pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem jest, w tym przypadku, możliwa bez konieczności wprowadzania dodatkowych przewodów. Pokrywy dotychczas stosowanych skrzyni baterii ogniw ołowiowych, z uwagi na konieczność zapewnienia odpowiedniego poziomu wentylacji, wyposażone są w siatki z otworami. Jednakże, z uwagi na konstrukcję skrzyni baterii ogniw ołowiowych w postaci ognioszczelnej, możliwość aktywnego przewietrzania jest w takich przypadkach nierealna. Do wykorzystania jest wówczas opracowany system wyłącznie w wariancie I, z ograniczaniem prądu doładowującego. W nowych jednak lokomotywach górniczych, skrzynia baterii ogniw ołowiowych musi również posiadać budowę przeciwwybuchową, ale o stopniu ochrony "e" - budowa wzmocniona. Budowa wzmocniona wymaga jednak wykonania odpowiednich otworów wentylacyjnych w jej konstrukcji, co umożliwia wprowadzenie aktywnego systemu przewietrzania, którv zaproponowano w ramach wariantu II. Uzupełnienie wówczas opracowanego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej o system aktywnego przewietrzania nie będzie wymuszało zatrzymania maszyny (celem naturalnego przewietrzenia wnętrza skrzyni). Podniesie to efektywność wykorzystania lokomotywy oraz zmaksymalizuje zdolność odzysku energii w procesie hamowania elektrycznego.

Należy również podkreślić, że opracowany układ zasilająco-sterujący bazuje na zastosowaniu dwóch niezależnych układów przekształtników energoelektronicznych, co zwiększa poziom niezawodności pracy maszyny oraz pozwala ponadto na sprawne uniknięcie poślizgów przy ruszaniu lokomotywy, a także ich szybkie zdiagnozowanie w czasie jej pracy. Zastosowanie wektorowego sterowania momentem silników zwiększa zakres regulacji zarówno pracy, jak i hamowania maszyny co w istotny sposób wpływa na podniesienie sprawności całego układu elektrycznego lokomotywy. Dzięki wykorzystaniu do napędów bezszczotkowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, dodatkowo zwiększono niezawodność napędu poprzez wyeliminowanie komutatora (najbardziej awaryjny element silnika prądu stałego). Bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi cechują się ponadto sprawnością około 8-10% wyższą od dotychczas stosowanych silników szeregowych prądu stałego.

W tym miejscu należy stwierdzić, że wszystkie omówione w pracy i wprowadzone (lub zaproponowane do wprowadzenia) w praktyce (po ich dokładnym przeanalizowaniu i zbadaniu) szczegółowe sposoby rozwiązania układu zasilająco–sterującego z monitorowaniem parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw, w wydatny sposób przyczyniają się do istotnego zwiększenia efektywności pracy lokomotyw akumulatorowych z ogniwami ołowiowymi z rekuperacją energii elektrycznej, przy równoczesnym zapewnieniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa pracy.

7.3. Badania laboratoryjne opracowanego systemu monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych

Badania zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym znajdującym się w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, dla baterii ogniw o pojemność Q = 1000 Ah – rysunek 7.5.



Rys. 7.5. Widok stanowiska badawczego – bateria akumulatorów typu MBA-1[54]

Badania wykonano w dwóch etapach:

Etap 1 – badanie skuteczności pomiaru stężenia wodoru,

Etap 2 – badanie skuteczności komunikacji Bluetooth.

W celu poprawnego przeprowadzenia badań skuteczności pomiaru stężenia wodoru, system LASS-1 został zainstalowany we wnętrzu przeciwwybuchowej skrzyni akumulatorowej. Dla możliwości weryfikacji zarejestrowanych przez system LASS-1 wartości stężenia wodoru, w jego otoczeniu umieszczono skalibrowany czujnik wodoru typu MX4. Widok urządzeń umieszczonych we wnętrzu skrzyni akumulatorowej pokazano na rysunku 7.6.



Rys. 7.6. Widok nadajnika systemu LASS-1 oraz czujnika wodoru typu MX-4 umieszczonych we wnętrzu osłony bateryjnej typu MBA-1 [54]

Podczas badania ładowano baterie ogniw przez określony czas, rejestrując wartość stężenia wodoru oraz wartość temperatury dla pięciu prób pomiarowych. Dla przykładu na rysunku 7.7 pokazano przebiegi wodoru zarejestrowane przez system LASS-1 oraz przez czujnik MX4 podczas jednej z przeprowadzonych prób pomiarowych.



Rys. 7.7. Przebiegi stężenia wydzielanego wodoru w funkcji czasu zmierzone przez system LASS-1 [54] (a) oraz przez czujnik MX-4 (b)

Przeprowadzone pomiary wykazały, iż dokładność pomiaru przez obydwa urządzenia jest praktycznie taka sama.

Badania zasięgu działania systemu LASS-1 przeprowadzono w pomieszczeniach Instytutu Techniki Górniczej KOMAG. Na jednym z końców korytarza (rys. 7.8) umieszczono odbiornik, do wyjść którego podłączono odpowiedni sygnalizator dźwiękowy. Pomiary rozpoczęto od ustawienia nadajnika w odległości wyjściowej 1 m od odbiornika, oddalając następnie odbiornik aż do przerwania łączności. Chwila przerwania łączności sygnalizowana była zanikiem sygnału dźwiękowego. Badania przeprowadzono



wielokrotnie dla dwóch odmian zastosowanych anten (antena wewnętrzna, antena zewnętrzna).

Rys. 7.8. Badania zasięgu działania komunikacji Bluetooth [54]

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że maksymalne odległości poprawnego działania zmieniały się w zależności od zastosowanej odmiany anteny i wynosiły: dla anteny wewnętrznej 10 m, dla zewnętrznej zaś odpowiednio 15 m.

Z uwagi na fakt bateryjnego zasilania systemu LASS-1, zaistniała również konieczność sprawdzenia bezprzerwowego czasu pracy systemu przy jednokrotnym naładowaniu baterii.

Mierzono czas od momentu zadziałania przekaźnika do jego wyłączenia spowodowanego brakiem sygnału sterującego (wskutek rozładowania baterii). Stwierdzono, że czas bezprzerwowego, niezawodnego działania wynosił około 30 godz. Należy w tym miejscu podkreślić, że czas działania układu, zależy od sposobu jego użytkowania. Pomierzono więc dodatkowo wartość prądu pobieranego z baterii przez nadajnik, który wynosił odpowiednio:

- 30 mA, w przypadku uzyskania trwałej komunikacji pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem, a także podczas wysyłania sygnałów sterujących,
- 60 mA, w momencie nawiązywania komunikacji nadajnika z odbiornikiem.

Badania wykazały zarówno zadowalający (z praktycznego punktu widzenia) zasięg bezprzewodowej transmisji sygnału, jak i czas pracy systemu LASS-1.

8. Wnioski szczegółowe

Zakres tematyczny monografii, jak i sposób podejścia do wszystkich stawianych, wymaganych do rozwiązania i wyjaśnienia problemów naukowych i naukowotechnicznych, jak również metodyka ich rozwiązywania zostały tak zaplanowane i przeprowadzone, aby w pełni uzyskać realizację założonego celu naukowego przy dodatkowym, równoczesnym, potwierdzeniu praktycznej przydatności uzyskanych efektów. Prezentowane i rozwiązywane zagadnienia zostały zatem, w kolejności ich realizacji, przedstawione i omówiono szczegółowo w odpowiednich rozdziałach/podrozdziałach monografii.

- We wprowadzeniu zostały omówione najważniejsze problemy dotyczące bezpiecznej eksploatacji maszyn transportowych pracujących w podziemnych wyrobiskach górniczych potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu lub/i pyłu węglowego. Wskazany został kierunek rozwoju górniczych maszyn transportowych, jak również zasygnalizowano, która maszyna górnicza będzie analizowana w ramach pracy oraz w jakim aspekcie. Zdefiniowano ponadto pojęcie "układu zasilająco-sterującego".
- W rozdziale drugim przedstawiono analizę stanu wiedzy i techniki dotyczącego górniczych lokomotyw akumulatorowych produkcji zarówno krajowej, jak i zagranicznej. Potwierdzono brak praktycznej możliwości stosowania nowych rozwiązań maszyn w polskich kopalniach węgla kamiennego, a więc uwypuklono uzasadnienie potrzeby realizacji podjętych przez Autorów zamierzeń.
- W rozdziale trzecim zamieszczono i przedyskutowano wyniki, przeprowadzonych przez Autorów, rozpoznawczych badań układu zasilająco-sterującego wybranych aktualnie pracujących lokomotyw akumulatorowych w warunkach ich rzeczywistej eksploatacji w kopalniach. Badania te miały na celu wyznaczenie sprawności pracy dotychczasowych układów zasilająco-sterujących, określenie potencjalnej możliwości odzysku energii połączonego z uwzględnieniem emisji wodoru, jak również określenie charakteru (trybu) pracy silników napędowych górniczej lokomotywy akumulatorowej w celu przyjęcia danych wyjściowych do dalszych badań laboratoryjnych i symulacyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych można było jednoznacznie stwierdzić, że sprawność elektryczna dotychczasowych układów zasilająco-sterujących jest stosunkowo niska, co przekłada się

bezpośrednio na niewielką efektywność pracy maszyny akumulatorowej a tym samym na aspekt ekonomiczny jej wykorzystania. Wykazano jednak, że istniejące układy sterowania stosowane dotychczas pracujacych lokomotywach akumulatorowych umożliwiaja. w pewnym zakresie, realizację odzysku energii w wyniku hamowania elektrycznego. Stwierdzono bowiem, że przez około 25% czasu pracy lokomotywy akumulatorowej jej silnik/silniki znajduje się w trybie pracy generatorowej, a więc może oddawać energię do źródła (baterii). Z uwagi jednak na zastosowane ogniwa kwasowo-ołowiowe, występuje (podczas odzysku energii w procesie hamowania elektrycznego), wydzielanie się wodoru o zróżnicowanym poziomie stężenia, przekraczając w wielu przypadkach wartość dopuszczalną. Problem ten do tej pory był całkowicie ignorowany.

- Kolejny rozdział poświęcony jest realizacji przyjętej koncepcji nowego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej, cechującego się wyższą sprawnością oraz większym bezpieczeństwem pracy w aspekcie emisji wodoru (opracowana przez Autorów koncepcja spełnia również inne dodatkowe wymagania praktyczne użytkowników, jakie zostały określone w trakcie prowadzonych rozmów). Zgodnie z przyjętą koncepcją możliwym było określenie parametrów i dobór urządzeń wszystkich podzespołów: zasilającego, sterującego oraz napędowego, i w efekcie wykonanie fizycznego modelu nowego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej.
- Wyniki badań laboratoryjnych opracowanego modelu fizycznego nowego układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej zaprezentowano w rozdziale piątym. Badania te miały na celu przede wszystkim, określenie sprawności oraz możliwości rekuperacji energii opracowanego układu. Stwierdzono, że sprawność nowego układu napędowego (w warunkach pracy znamionowej) jest prawie o 20% wyższa od sprawności dotychczasowych lokomotyw akumulatorowych pracujących w kopalniach. Zwrot energii w układzie badanym, z jednym silnikiem napędowym, jest również wyższy o co najmniej 5%.
- Biorąc pod uwagę niebezpieczeństwo nadmiernego wydzielania się wodoru podczas procesu rekuperacji przeprowadzono odpowiednie badania symulacyjne stężenia i rozpływu wodoru w osłonie baterii ogniw

kwasowo-ołowiowych podczas procesu ich ładowania, korzystając z profesjonalnego oprogramowania Autodesk Simulation CDF, których wyniki przedstawiono w rozdziale szóstym. Celem tych badań było określenie zarówno wartości stężenia, jak i miejsc gromadzenia się wodoru we wnętrzu tej osłony. Przeprowadzone symulacje wykazały, że wentylacji osłony baterii ogniw ołowiowych system jest niewystarczający i umożliwia gromadzenie się wodoru o stężeniu przekraczającym dopuszczalne wartości. W celu zatem obniżenia poziomu stężenia wodoru pożądanym jest albo zastosowanie otworów przewietrzających o większych średnicach i/lub zwiększenie ich ilości zmiana usytuowania tych otworów wentylacyjnych albo na powierzchniach prostopadłych do kierunku przepływu powietrza (w tym przypadku powinny to być zastosowane dwie powierzchnie umożliwiające wlot powietrza i wylot mieszaniny powietrznowodorowej). Możliwym jest również wykorzystanie tzw. "kierownic wlotowo-wylotowych", kierujących odpowiednio strumieniem przepływającego powietrza w kierunku ogniw akumulatorowych i w efekcie podwyższenie efektywnego "odprowadzenia" nadmiaru wodoru na zewnątrz. Badania wykazały ponadto, że największe stężenie wodoru występuje pod kołnierzami osłony w pobliżu pokryw górnych. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych umożliwiły również określenie pomiarowych mieisc lokalizacii czujników wodoru celem przeprowadzenia dalszych badań laboratoryjnych i w tzw. komorze ładowania w kopalni.

Mając zlokalizowane miejsca nadmiernego gromadzenia się wodoru dla wybranych źródeł akumulatorowych, przeprowadzono odpowiednie badania laboratoryjne oraz badania w warunkach rzeczywistych ich ładowania w kopalni. Wyniki tych badań zamieszczono i przedyskutowano w rozdziale szóstym. Celem tych badań było określenie stopnia narastania wartości stężenia gazu elektrolitycznego oraz jego zmiany w procesie ładowania (doładowywania) baterii ogniw kwasowoołowiowych. Każda próba rejestrowania emisji gazu elektrolitycznego (wodoru) była ściśle powiązana z pomiarem i rejestracją wartości oraz charakteru przebiegu prądu płynącego przez baterię. Na podstawie uzyskanych wyników możliwym było określenie wpływu zarówno natężenia, jak i odkształcenia prądu ładującego na poziom i intensywność wydzielania się wodoru we wnętrzu baterii ogniw kwasowoołowiowych. Stwierdzono, że końcowemu procesowi ładowania

emisja wodoru przekraczająca ponad dwukrotnie towarzyszy dopuszczalne jego stężenie. Taka sytuacja jest niebezpieczna zarówno dla obsługi ładowni, jak i dla samych ogniw. Odkształcenie natomiast przebiegu prądu ładowania w czasie nie ma istotnego wpływu na poziom oraz intensywność emisji wodoru. Wpływ ma natomiast wartość prądu ładowania i tak na przykład 5-krotne zwiększenie wartości natężenia pradu ładującego skraca praktycznie o połowę czas potrzebny do wydzielenia się wodoru przekraczając wartość 100% DGW. Efekt ten zależy jednak od stopnia naładowania baterii, gdyż na przykład niebezpieczeństwo przekroczenia stężenia 100% DGW (w przypadku w pełni naładowanej baterii ogniw ołowiowych), występuje już przy wygenerowaniu, w procesie hamowania elektrycznego z odzyskiem energii, ładunku o stosunkowo niewielkiej wartości (np. 5,4 Ah). Oczywiście dopuszczalny poziom stężenia wodoru może być przekroczony, w określonych warunkach pracy, w przypadku baterii nienaładowanej.

Na podstawie uzyskanych wyników, z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych, zrealizowanych w ramach niniejszej pracy, możliwym było opracowanie, odpowiedniego systemu monitoringu parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych, którego budowę i zasadę działania zamieszczono w rozdziale siódmym. Umożliwiło to w efekcie dokonanie odpowiedniej modyfikacji opracowanego wcześniej nowego układu zasilającosterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej poprzez jego zintegrowanie zaproponowanym systemem z monitoringu. Przeprowadzone badania, ograniczające się z konieczności do warunków laboratoryjnych (z uwagi na brak odpowiedniej lokomotywy) wykazały, że integracja obu systemów zmniejszyła w sposób znaczący zagrożenie związane z emisją wodoru. Opracowany ponadto system monitorowania parametrów bezpiecznej pracy baterii ogniw ołowiowych, z uwagi na swoją prostotę budowy i zasadę działania, może być z powodzeniem zastosowany również w aktualnie pracujących lokomotywach akumulatorowych, zwiększając tym samym bezpieczeństwo ich eksploatacji.

Literatura

- Ahmed M.S., Manap N.A.A., Faeq M., Ishak D.: Improved torque in PM brushless motors with minimum difference in slot number and pole number. Journal of Power and Energy Conversion, nr 3/2012 r., str. 206-219.
- Antoniak J.: Urządzenia i systemy transportu podziemnego w kopalniach. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1976, str. 451 - 454.
- Bayoumi E.: Deadbeat Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motors Using Particle Swarm Optimization. International Journal of Power Electronics, nr 5/2013r., str. 301-315.
- 4. Biskup T.: Initial rotor position estimation of permanent magnet synchronous machine. Przegląd Elektrotechniczny, 2012 nr 4, str. 157-162.
- 5. Boast R.A.: Rail transport by locomotives. World Mining Equipment, 1988, nr 11 str. 18 24.
- 6. Budzyński Z., Deja P.: Nowa generacja napędów trakcyjnych lokomotyw kopalnianych. Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe 2008 nr 79.
- Budzyński Z., Deja P., Kaczmarczyk K., Suffner H., Pawlicki D.: Kopalniana lokomotywa trakcyjna napędzana nowoczesnymi silnikami z magnesami trwałymi. W: Innowacyjne i bezpieczne maszyny i urządzenia dla górnictwa węgla kamiennego. KOMTECH 2007. CMG KOMAG 2007
- Budzyński Z., Polnik B.: Jakość energii elektrycznej odzyskiwanej w procesie hamowania elektrycznego górniczej lokomotywy akumulatorowej jako jedno z kryteriów poprawy sprawności układu napędowego maszyny górniczej. W: XIV Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej – Zakopane 2012, materiały konferencyjne str. 89 - 97.
- Budzyński Z., Gąsior S., Niedworok A., Polnik B.: Badania wybranych rozwiązań napędu górniczej lokomotywy akumulatorowej. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, 2011 nr 3.
- Budzyński Z., Polnik B., Gąsior T.: Analiza porównawcza zastosowania napędu synchronicznego i asynchronicznego w górniczych lokomotywach akumulatorowych. Maszyny Górnicze 2011 nr 4, str. 249 – 256.
- Budzyński Z., Miedziński B., Polnik B.: Effective control of a battery supplied mine locomotive unit Elektronika Ir Elektrotechnika Vol. 20, No. 3, 2014 r. str. 39-43.

- Cifci A., Uyaroglu Y., Birbas S.: Direct Field Oriented Controller Applied to Observe Its Advantages over Scalar Control, Electronics and Electrical Engineering, 2012 nr 3., str. 15-18.
- Czajka B., Jankowska E., Baraniak M.: Influence of lead alloy composition on grid corrosion in lead-acid batteries. Corrosion Protection, 2013 nr 4, str. 162-164.
- Daniłow J., Hefczyc M.: Lokomotywy kopalniane ognioszczelne akumulatorów. Nowe rozwiązania układów sterowania napędem. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 1994 nr 10, str. 11 – 13.
- Daniłow J., Dziurowicz G., Miłoś S.: Poradnik obsługi i konserwacji oraz instrukcja użytkowania zmodernizowanego wyposażenia energoelektronicznego dla lokomotyw Lea BM-12T/M. Poradniki Instrukcje EMAG, Katowice 1996.
- Daniłow J., Hefczyc M.: Tranzystorowy układ sterowania napędu lokomotywy akumulatorowej ognioszczelnej typu Ldag 05 i Ldag 05M. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 1998 nr 10.
- Daniłow J., Nowak R.: Transport kołowy z zastosowaniem nowoczesnych układów zasilania i sterowania w lokomotywach dołowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2000, nr 9-10, str. 62 – 72.
- Daniłow J., Gąsior T.: Mikroprocesorowy układ sterowania napędem lokomotywy akumulatorowej z zespołem rejestracji parametrów ruchowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2001 nr 9, str. 87 – 95.
- Daniłow J., Dziurowicz G.: Modernizowane wyposażenie energoelektroniczne akumulatorowych ognioszczelnych lokomotyw kopalnianych Lea BM-12. Ocena doświadczeń eksploatacyjnych. W: IV Międzynarodowa Konferencja – Bezpieczeństwo pracy urządzeń transportowych w górnictwie – CBiDGP, 5 – 7 listopada 2008 r., str. 197 – 142.
- Daniłow J., Dziurowicz G., Molitor J.: Modernizacja wyposażenia elektrycznego lokomotyw kopalnianych jako przykład efektywnego wykorzystania maszyn górniczych wyprodukowanych w ubiegłym wieku. Zasilanie, informatyka techniczna i automatyka w przemyśle wydobywczym – EMTECH 2009., Ossa k. Rawy Mazowieckiej 10-13 maja 2009 r., str. 69 – 81.

- Deja P., Polnik B.: Analiza efektywności pracy elektrycznych lokomotyw górniczych z zastosowaniem układów napędowych opartych na silnikach z magnesami trwałymi. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2014 nr 101, str. 123-127.
- 22. Dillmann N.: Entwicklung eines einheitlichen Konzeptes fuer Batterielokomotiven der Ruhrkohle AG. Bergbau 1991, nr 5, str. 197 - 203.
- Dolecek R., Cerny O., Novak J., Bartłomiejczyk M.: Interference in power system for traction drive with PMSM. Przegląd Elektrotechniczny, 2012 nr 9, str. 204-207.
- Dudek W., Grzbiela C., Machowski A., Machowski J.: Maszyny, urządzenia elektryczne i automatyka w górnictwie. Śląskie Wydawnictwo Techniczne 1994, str. 428 – 431.
- 25. Dzikowski A.: Parametry układów napędowych z silnikami prądu stałego i zmiennego akumulatorowej lokomotywy kopalnianej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2011 nr 3, str. 13-20.
- Dzikowski A., Hefczyc M., Kozłowski A.: Energooszczędne napędy maszyn górniczych z silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi zasilanymi z przemienników częstotliwości. Maszyny Elektryczne -Zeszyty Problemowe, 2013 nr 1, str. 23 - 31.
- Dzikowski A., Hefczyc M., Kozłowski A.: Badania symulacyjne wybranych napędów maszyn górniczych wyposażonych w silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 2014, nr 515, str. 52 – 53.
- Dzikowski A.: Badanie wpływu stopnia wzbudzenia silnika trakcyjnego na parametry użytkowe lokomotywy i składu pociągu. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne 2014 nr 1, str. 13 - 18.
- Ejlali A., Khaburi D.A., Soleimani J.: Sensorless Field Oriented Control Strategy for Single Phase Line-Start PMSM Drive. Przegląd Elektrotechniczny 2012 nr 10 str. 229-232.
- Gierlotka S.: Mechaniczne i elektryczne napędy kopalniane, lokomotywy i rozwój ich napędu. Energetyka 2009 nr 9, str. 694 – 698.
- 31. Gierlotka S.: Rozwój lokomotyw w górnictwie podziemnym. W: VII Konferencja Dziedzictwo i historia górnictwa oraz wykorzystanie

pozostałości dawnych robót górniczych, 3-5.11.2011 r. Centrum Kongresowe Politechniki Wrocławskiej.

- Gluziński W.: Elektryfikacja podziemi kopalń węgla Część 2. Urządzenia i sieci niskiego napięcia, Wydawnictwo "Śląsk" Katowice 1985.
- Guo S., He J.: Sensorless control of PMSM based on adaptive sliding mode observer. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2009 nr 4., str. 321-324.
- Haecker D.: Betriebserfahrungen mit dem Batteriekatzensystem auf dem Ibbenbüren. Glückauf 1985, nr 12 str. 945 - 949.
- 35. Hefczyc M., Nowak R.: Nowoczesny układ sterowania napędem w ognioszczelnej lokomotywie akumulatorowej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 1995 nr 9-10, str. 77 – 84.
- Heine K., Exner P.: Schnell- und Wendezug zur Verbesserung der Personenbefoerderung unter Tage. Glückauf 1992, nr 7 str. 515 – 520.
- Heuser A.: Bergwerkslokomotiven von Schalke. RAG Anthrazit Ibbenburen erhalt kostenoptimale Transportlosung Mining Geo 2012 r., nr 4, str. 566 - 567.
- Hulanicki A.: Współczesna chemia analityczna. Wybrane zagadnienia. PWN Warszawa 2001.
- Jaracz K.: Hamowanie elektryczne kopalnianych lokomotyw akumulatorowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 1988 nr 5, str. 46 – 48.
- 40. Kennedy K.: Solution evolution. World Coal 2008. nr 10 str. 41 44.
- Kozłowski A., Hefczyc M.: Ognioszczelny nastawnik typu ONT-1 jako nowe wyposażenie lokomotyw akumulatorowych typu Ldag-05/Ldag-05/M. W: V Szkoła Mechanizacji i Automatyzacji Górnictwa, Ustroń 24-26 Marzec 2010, str. 164 – 172.
- Krivik P.: Pulse charging of lead acid batteries. W: 14th Advanced Batteries, Accumulators and Fuel Cells International Conference, Brno 2013.

- Król E.: Porównanie efektywności energetycznej silników z magnesami trwałymi i silników indukcyjnych. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne 2007 nr 78, str. 75 - 78.
- Król E.: Silniki z magnesami trwałymi oraz silniki indukcyjne czynniki obniżające sprawność. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne 2008 nr 80, str. 223 - 226.
- Michalik J., Kucera S., Boroska J.: Hybride Untertagebergbaulokomotive und ihr Einfluss an die Arbeitsumgebung. W: Materiały na XIII Konferencję Naukową Pojazdy szynowe '98, Katowice-Ustroń, 8-10.10.1998 r. Zeszyty naukowe Pol. Śl. Transport 1998 r. nr 31, str. 215 – 221.
- 46. Miedziński B., Polnik B.: Hydrogen explosive risk in mining locomotive unit. ECS Transaction. 2014 nr 63(1)., str. 159-166.
- 47. Morton G.S.: Underground transport developments Within British Coal.
 W: MINING 94 Technology for Profit Conference, Birmingham, UK. 23-25 May 1994 r., str. 5.2.1 5.2.9.
- 48. Ozimek P., Świątek J.: Składowa zmienna w prądzie ładowania baterii akumulatorów. Automatyka Elektroenergetyczna 2003, nr 3.
- Pawlaczyk L.: Przekształtniki energoelektroniczne w zastosowaniach przemysłowych. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. 2005 nr 58, str. 1-24.
- Pieczora E.: Prognoza rozwoju szynowych systemów transportowych stosowanych w podziemiach kopalń węgla kamiennego. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 24, 2008 Zeszyt 1/2, str. 221 - 232.
- 51. Pieczora E., Suffner H.: Rozwój lokomotyw do kopalnianych kolei podziemnych, Maszyny Górnicze, 2013 nr 2, str. 45 54.
- 52. Plamitzer A. M.: Maszyny Elektryczne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1986.
- 53. Polak M.: Jak ocenić wpływ wentylacji na zagrożenie wybuchem w akumulatorowni. Elektro info 2010, nr 3.
- 54. Polnik B.: Badania i analiza układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej Rozprawa doktorska, Wrocław 2017 r.

- 55. Polnik B.: Inteligentne zarządzanie procesem rekuperacji energii górniczej lokomotywy akumulatorowej. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2012 nr 12, str. 36-40.
- Polnik B.: Jakość energii elektrycznej napędów górniczych lokomotyw akumulatorowych w aspekcie emisji gazu elektrolitycznego. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2015 nr 106, str. 73-79.
- Polnik B.: Wpływ rekuperacji energii na poprawę sprawności układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej. Maszyny Górnicze, 2014 nr 2, str. 56 – 60.
- 58. Poradnik górnika tom 3, Wydawnictwo "Śląsk" Katowice 1974.
- Potts A.: On the rails rail haulage, World Mining Equipment, 1999, nr 3 str. 28 – 30.
- Qin L., Zhou X., Cao P.: New Control Strategy for PMSM Driven Bucket Wheel Reclaimers using GA-RBF Neural Network and Sliding Mode Control. Electronics and Electrical Engineering. 2012 nr 6. str. 113-116.
- 61. Raffeinner T.: Tailored transport, World Coal 2005, nr 9 str. 99 100.
- 62. Schött K.P., Wisnewski J.: Batteriekatze DS 40 mit Drehstromantrieben und Bussteuerung. Bergbau 1999, nr 6 str. 290 291.
- Szczucki F.: Rozwój energooszczędnych urządzeń i napędów maszyn górniczych oraz systemów transportowych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, 2000 nr 9-10. str. 48 – 56. 117 – 121.
- 64. Szczucki F.: Rozwój energooszczędnych urządzeń i napędów maszyn górniczych oraz systemów transportowych. Wiadomości Elektrotechniczne 2006 nr 1, str. 3-9.
- 65. Świątek J.: Współczesne akumulatory kwasowo-ołowiowe. Wiadomości Elektrotechniczne, 1999 nr 10, str. 503-506.
- 66. Świątek J.: Ewolucja technologii akumulatorów kwasowo-ołowiowych. Energetyka 2000, nr 4.
- 67. Świątek J.: Przegląd technologii akumulatorów kwasowo-ołowiowych. Automatyka Elektroenergetyczna 2000, nr 1.
- 68. Świątek J.: Akumulatory kwasowo-ołowiowe. Zasada działania i omówienie podstawowych zjawisk. Elektronizacja: Podzespoły i Zastosowania Elektroniki, 2001 nr 11, str. 38-40.

- 69. Świątek M.: Problemy z akumulatorami kwasowymi. Wiadomości Elektrotechniczne 2002 nr 7-8, str. 290-296.
- 70. Underground rail transport. World Mining Equipment, 1990, nr 7/8, str. 41 45.
- 71. Vas P.: Vector Control of AC Machines, Oxford: Clarendon Press, 1990.
- 72. Zawilak T., Antal L., Zawilak J.: Wpływ obciążenia na odkształcenie prądu w silniku prądu przemiennego z magnesami trwałymi, Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe, 2006, nr 75, str. 1-6.
- Zawilak T., Antal L.: Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim – badania eksperymentalne. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, 2007, nr 77, str. 277-283.
- 74. Zawilak T., Antal L.: Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2005, nr 58.
- 75. Encyklopedia Techniki Chemia, WNT Warszawa 1993.
- 76. Projekt badawczo-rozwojowy nr N R01 0009 06 pt.: "Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej", realizowany przez ITG KOMAG w latach 2009 2012 materiały niepublikowane.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2006/42/WE z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE.
- 78. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej.
- PN-EN 1710+A1:2010 Urządzenia i podzespoły przeznaczone do stosowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych – zastąpiona przez PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02.

- 80. PN-EN 1889-2+A1:2010 Maszyny dla górnictwa podziemnego Podziemne maszyny samobieżne – Bezpieczeństwo – Część 2: Lokomotywy szynowe.
- 81. PN-EN IEC 60079-0:2018-09 Atmosfery wybuchowe Część 0: Urządzenia Podstawowe wymagania.
- 82. PN-EN 60079-1:2014-12 Atmosfery wybuchowe Część 1: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą osłon ognioszczelnych "d".
- PN-EN 60079-2:2015-02 Atmosfery wybuchowe Część 2: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą osłon gazowych z nadciśnieniem "p"
- 84. PN-EN 60079-7:2016-07 Atmosfery wybuchowe Część 7: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej "e".
- 85. PN-EN 60079-11:2012 Atmosfery wybuchowe Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i".
- 86. PN-EN 60079-18:2015-06 Atmosfery wybuchowe Część 18: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą hermetyzacji "m".
- 87. www.brookvillecorp.com maj 2019 r.
- 88. www.claytonequipment.co.uk maj 2019 r.
- 89. www.cantonigroup.com maj 2019 r.
- 90. www.ferrit.cz maj 2019 r.
- 91. www.phs-strojarne.sk maj 2019 r.

Innowacyjny układ zasilająco-sterujący górniczej lokomotywy akumulatorowej

Streszczenie

Praca poświęcona jest ogólnej problematyce zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa pracy górniczych lokomotyw akumulatorowych pracujących w podziemnych wyrobiskach górniczych. Z uwagi bowiem na problemy związane z przewietrzaniem wyrobisk podziemnych, aktualne tendencje wskazuja na konjeczność ograniczenia stosowania maszyn spalinowych na rzecz napedów elektrycznych. Stosowane obecnie lokomotywy akumulatorowe dorównuja mobilnościa lokomotywom spalinowym, przewyższając je przy tym sprawnością z jednoczesnym zmniejszeniem emisji hałasu i ciepła oddawanego do atmosfery kopalnianej. Celem zatem efektywniejszego wykorzystania tych maszyn, należy przede wszystkim odpowiednio poprawić bilans energetyczny tego typu lokomotyw z napędem elektrycznym. Zaproponowano osiagnięcie powyższego celu poprzez zwiększenie sprawności całego tzw. układu zasilającosterującego, stosując bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o wysokiej sprawności, zasilane z przekształtnika energoelektronicznego 4-kwadrantowego z równoczesnym zastosowaniem odzysku energii w procesie hamowania.

W monografii, skupiono się zatem na analizie i badaniach efektywności pracy układu zasilajaco-sterujacego górniczych lokomotyw akumulatorowych, ze zwróceniem szczególnej uwagi na niebezpieczeństwo emisji wodoru w procesie rekuperacji energii. Określono bilans energetyczny wybranych, aktualnie pracujacych w kopalniach lokomotyw akumulatorowych oraz zbadano możliwość rekuperacji energii podczas hamowania elektrycznego, ustalając czas pracy silnika napędowego w poszczególnych trybach (silnik – pradnica) oraz mierząc poziom stężenia wodoru we wnętrzu osłony baterii ogniw. Na podstawie uzyskanych wyników została opracowana koncepcja nowego układu zasilajacosterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej z bezszczotkowymi silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi. Zbudowany został fizyczny model nowego układu zasilająco-sterującego, który poddano badaniom w warunkach laboratoryjnych. Badania wykazały znaczący istotny wzrost sprawności układu zasilająco-sterującego, ale co się z tym wiąże, niestety również realne zagrożenie niebezpiecznego stężenia wodoru w czasie hamowania elektrycznego z rekuperacją energii. W związku z powyższym przeprowadzone

zostały odpowiednie analizy symulacyjne i badania eksperymentalne poziomu stężenia i rozpływu wodoru w osłonie baterii ogniw. Umożliwiły one określenie miejsc gromadzenia się wodoru, a więc miejsc praktycznej lokalizacji pomiarowych czujników gazu elektrolitycznego. Badania dla wybranych akumulatorowych źródeł energii wykonano zarówno w warunkach rzeczywistej eksploatacji, jak i na stanowisku laboratoryjnym określając również wpływ przebiegu i natężenia prądu doładowującego. Stwierdzono, że przebieg prądu doładowującego baterie nie ma znaczącego wpływu na wartość stężenia wodoru, która zależy, przede wszystkim, od poziomu naładowania baterii oraz natężenia prądu doładowującego. W efekcie realizacji pracy został opracowany oraz przebadany w warunkach laboratoryjnych (ale odzwierciedlających warunki rzeczywiste) przykładowy sposób rozwiązania układu sterowania parametrami bezpiecznej eksploatacji baterii ogniw kwasowo-ołowiowych. Stwierdzono poprawność funkcjonowania opracowanego układu, który został przystosowany zarówno do integracji z nowymi, jak i z dotychczas eksploatowanymi układami zasilająco-sterującymi górniczych lokomotyw akumulatorowych. W końcowej części monografii sformułowano odpowiednie wnioski i wytyczne dotyczące praktycznej możliwości wykorzystania opracowanego układu zasilającosterującego w celu zapewnienia efektywnej i bezpiecznej pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej z rekuperacją energii w procesie hamowania elektrycznego.

Innovative power supply and control system for a mining battery locomotive

This work is focused of the problems of increasing the effectiveness and operational safety of mine battery locomotives in mine underground workings. Due to the problems with roadways ventilation, there is a tendency to replace diesel drives by electric drives. Present battery locomotives have similar mobility as diesel locomotives, but they are more effective and do not produce off gasses and emit less amount of heat. Thus, for more effective operation of electric locomotive first of all increase of electric drives efficiency is required. To achieve this goal authors suggested increasing the efficiency of supply-and-control system by using the brushless permanent magnet synchronous motors of high efficiency, supplied from 4-quadrant energy transducer with recovery of energy during braking.

The paper focuses on analyses and tests of operational efficiency of supplyand-control system in battery mine locomotives with a special attention paid to emission of hydrogen during the energy recuperation process. Efficiency of the selected battery locomotives operating in mines was determined and a possibility of recovery of energy during braking was tested determining the time of motor operation in each mode (motor-generator) as well as with measurement of hydrogen concentration inside batteries enclosures. On the basis of results, the concept of new supply-and-control system for mine battery locomotive with brushless synchronous motors with permanent magnets was developed. Physical model of new supply-and-control system was built and tested in the laboratory. The tests proved significant increase of motor electric effectiveness unfortunately it is associated with emission of hydrogen of dangerous concentration during braking with recuperation of energy. Due to that, simulation analyses and tests were carried out to determine concentration of hydrogen and its diffusion in the batteries enclosure. These tests enabled determining the places of hydrogen accumulation that is the places of installation of electrolytic gases sensors. Tests for the selected batteries were made both in the laboratory and in the real conditions determining also the impact of recharging current and its waveform on hydrogen emission. It was found that recharging current waveform had no a significant impact on hydrogen concentration as first of all it depends on battery level and recharging current. Solution of the system for controlling the parameters to secure safe operation of acid-lead batteries was developed and tested in the laboratory (in conditions recreating the real operation). Proper operation of the system, which was adapted for integration both with new and the currently used supply-and-control systems for mine battery locomotives, was reported. In the final part, the conclusions on practical use of the developed supply-and-control system with recuperation of energy during braking to secure effective and safe operation of mine locomotive are drawn.

ISBN 978-83-65593-17-7