

**Bartosz Polnik**  
KOMAG, Gliwice

## **JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ NAPĘDÓW GÓRNICZYCH LOKOMOTYW AKUMULATOROWYCH W ASPEKTCIE EMISJI GAZU ELEKTROLITYCZNEGO**

### **POWER QUALITY OF THE MINING BATTERY LOCOMOTIVE DRIVES IN THE TERMS OF ELECTROLYTIC GAS EMISSION**

**Streszczenie:** W referacie opisano problematykę jaką niesie za sobą proces rekuperacji energii podczas hamowania odzyskowego górniczej lokomotywy akumulatorowej. Omówiono zalety i wady jakie wiążą się z odzyskiem energii a także wskazano kierunki rozwoju układów zasilająco-sterujących górniczych lokomotyw akumulatorowych. Dużą uwagę poświęcono badaniom eksploatacyjnym, mającym na celu zarejestrowanie właściwości parametrów składowych energii elektrycznej, zwracanej do baterii akumulatorów podczas pracy w układzie z rekuperacją energii, przy jednoczesnym monitorowaniu poziomu stężenia gazu elektrolitycznego. Przedstawiono metodę badawczą oraz zaprezentowano wyniki uzyskane podczas badań.

**Abstract:** The paper describes the problems that entails the process of recuperation of energy during regenerative braking mining locomotive battery. The advantages and disadvantages that are associated with energy recovery as well as the directions of the development of power supply and control systems of mining battery locomotive are discussed. Great attention was paid to operational tests the goal of which was to register the properties of the component parameters of electricity, which is returned to the battery during operation in the system with recuperation of energy, while simultaneously monitoring the level of electrolytic gas concentration. Paper presents the research method and the results obtained during the study.

**Słowa kluczowe:** *górnictwo, lokomotywa, napęd elektryczny, emisja wodoru, rekuperacja energii*  
**Keywords:** *mining, locomotive, electric drive, hydrogen emission, energy recuperation*

### **1. Wstęp**

Do drażenia przodków chodnikowych w coraz szerszym zakresie wykorzystuje się napędy elektryczne. Również do wydobywania urubku oraz transport materiałów stosuje się maszyny elektryczne [1,3]. Lokomotywy z zasilaniem akumulatorowym nie ustępują mobilnością lokomotywom spalinowym, natomiast przewyższają je sprawnością i brakiem emisji szkodliwych gazów. Wyższa sprawność energetyczna lokomotyw akumulatorowych wpływa dodatkowo na ograniczenie emisji ciepła do atmosfery kopalnianej [1,2]. Przedmiotem rozważań jest górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea, stosowana w polskim górnictwie węgla kamiennego od blisko pięćdziesięciu lat bez zasadniczych zmian w układzie napędowym. Określonym modyfikacjom poddano układ sterujący, co umożliwiło realizację hamowania elektrycznego z rekuperacją energii, dzięki czemu uzyskano poprawę efektywności pracy lokomotyw akumulatorowych [6]. Maszyny te zasilane są z baterii kwasowych, które w procesie ładowania, bądź doładowania w czasie ha-

mowania elektrycznego wydzielają wodór [4,5]. Ilość wydzielanego gazu elektrolitycznego (wodoru) zależy między innymi od:

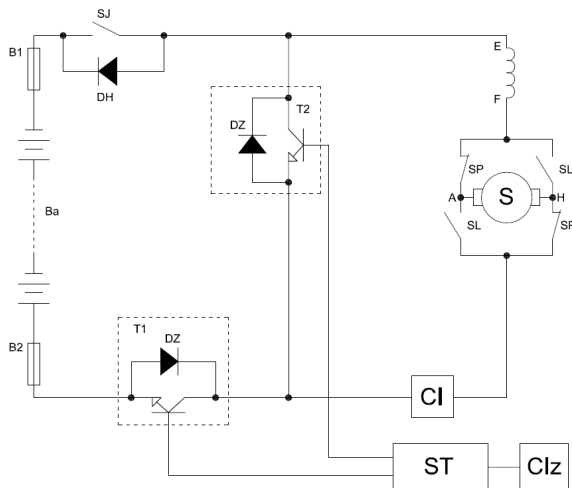
- stopnia naładowania ogniwa (baterii),
- natężenia prądu płynącego do ogniwa (baterii),
- czasu trwania doładowywania ogniwa (baterii),
- temperatury elektrolitu ogniwa.

Zgodnie z normą PN-EN 1889-2+A1(2010) pt. *Maszyny dla górnictwa podziemnego. Podziemne maszyny samobieżne. Bezpieczeństwo. Część 2: Lokomotywy szynowe - stężenie nagromadzonego w skrzyni akumulatorowej wodoru, nie może przekroczyć 2 %*. Oznacza to potrzebę monitorowania stopnia stężenia wodoru w celu zapewnienia bezpieczeństwa oraz zachowania maksymalnej efektywności.

### **2. Rekuperacja energii w górniczych lokomotywach akumulatorowych**

Rekuperacja energii polega na jej odzyskiwaniu w celu dalszego wykorzystania. W maszynach z napędem elektrycznym lub hybrydowym, re-

kuperacja jest realizowana poprzez wykorzystanie silnika elektrycznego jako prądnicy, do konwersji energii ruchu obrotowego na energię elektryczną. Silnik przekształca energię kinetyczną rozprężonej masy pojazdu na energię elektryczną, w trakcie hamowania elektrycznego, umożliwiając w ten sposób odzysk energii, która może być oddawana bezpośrednio do sieci trakcyjnej lub gromadzona w baterii akumulatorów [3]. Możliwość rekuperacji energii w górniczych lokomotywach akumulatorowych zaistniała w latach 90-tych ubiegłego wieku. Istotną rolę w unowocześnieniu, usprawnieniu i poprawieniu własności trakcyjnych tych maszyn odegrał Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, który opracował i wykonał zespoły przekształtnikowe, wyposażone w łączniki okresowe prądu stałego (początkowo tyrystorowe, obecnie tranzystorowe) i układy regulacji przeznaczone do rozruchu, zmian prędkości i hamowania elektrycznego górniczych lokomotyw akumulatorowych, o mocach silników od 12 do 90 kW [6]. Uproszczony schemat tranzystorowego łącznika prądu stałego do sterowania napędu lokomotywy akumulatorowej lub trakcyjnej pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat tranzystorowego łącznika prądu stałego [6]

Oznaczenia na rysunku 1:

- T1 – łącznik okresowy do jazdy lokomotywy,
- T2 – łącznik okresowy do hamowania lokomotywy,
- Clz – 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.

### 3. Badania i analiza pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej

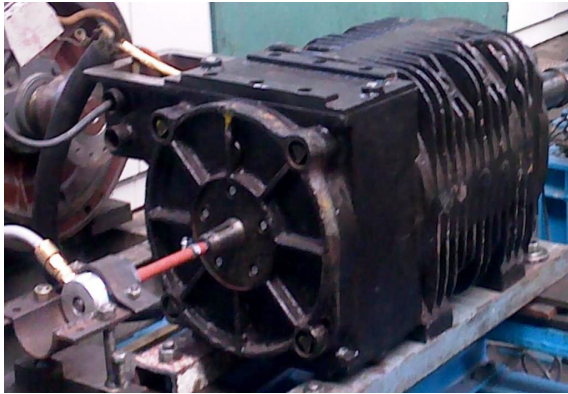
#### 3.1. Przygotowanie badań

Badaniom poddany został układ zasilająco-sterujący górniczych lokomotyw akumulatorowych typu Lea BM. Podczas badań rejestrowano przebieg prądu płynącego do baterii akumulatorów podczas hamowania elektrycznego z rekuperacją energii. Jednocześnie rejestrowano stężenie wydzielającego się wodoru w skrzyni baterii akumulatorów. Pomiary prowadzono na dwóch wybranych odmianach lokomotyw akumulatorowych typu Lea BM-12 (rys. 2) oraz Lea 12P3A (rys. 3). Obydwie maszyny są napędzane za pośrednictwem silników szeregowych prądu stałego typu LDs, o zróżnicowanych parametrach nominalnych. Podstawowe parametry techniczne silników napędowych wybranych lokomotyw górniczych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry techniczne silników napędowych lokomotyw górniczych. [5,6]

Dane	Silnik	LDs-245	LDs-327
Rodzaj pracy		S1/S2	S1/S2
Moc $P_N$		15,2/38 kW	19,2/40 kW
Napięcie $U_N$		144 V	144 V
Prąd $I_N$		120/295 A	150/308 A
Moment $T_N$		50/224 Nm	110/341 Nm
Prędkość obrotowa $n_N$		2910/1620 obr/min	1660/1120 obr/min
Sprawność $\eta_N$		88/89 %	89/90,5 %





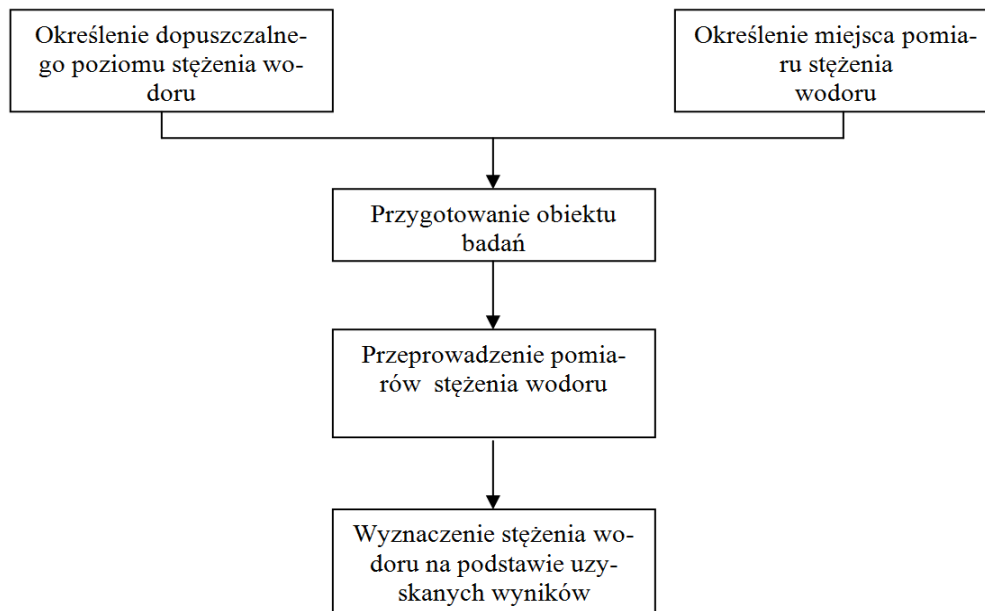
Rys. 2. Górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-12 napędzana silnikiem szeregowym typu LDs-245 [6,7]



Rys. 3. Górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea 12P3A napędzana silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs-327 [6,7]



Lokomotywy górnicze typu Lea BM-12 oraz Lea 12P3A napędzane są jednym silnikiem, który za pośrednictwem wału Cardana napędza obydwie osie napędowe. Przełożenie napędu z jednego silnika na dwie osie poprawia właściwości trakcyjne lokomotywy. Jednakże w przypadku awarii silnika cała maszyna pozostaje unieruchomiona. Z tego też powodu, nowo opracowane rozwiązania lokomotyw górniczych zazwyczaj posiadają dwa silniki elektryczne. Na potrzeby przeprowadzonych badań emisji wodoru, opracowano metodę badawczą – rys. 4.



Rys. 4. Algorytm metody badawczej [7]

Dopuszczalny poziom stężenia wodoru, który nie może przekroczyć 2%, określa się w oparciu o zapisy normy nr PN-EN 1889-2+A1(2010) pt. "Maszyny dla górnictwa podziemnego. Podziemne maszyny samobieżne. Bezpieczeństwo. Część 2: Lokomotywy szynowe". Norma ta też informuje, że w skrzyniach akumulatorowych wymagana jest odpowiednia wentylacja zapobiegająca nagromadzenia się stężenia niebezpiecznych oparów. Miejsce pomiaru stężenia wodoru wyznaczono bazując na informacji z normy PN-EN 60079-7:2010 pt. "Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej e" - która wskazuje, że pomiar stężenia należy wykonywać w pobliżu połowy odległości między górną powierzchnią ogniw i pokrywą skrzyni oraz w pobliżu korków do napełniania i wentylacji. Przygotowanie obiektu badań polegało na naładowaniu baterii akumulatorów, przewietrzeniu skrzyni akumulatorowej i zainstalowaniu niezbędnej aparatury pomiarowej.

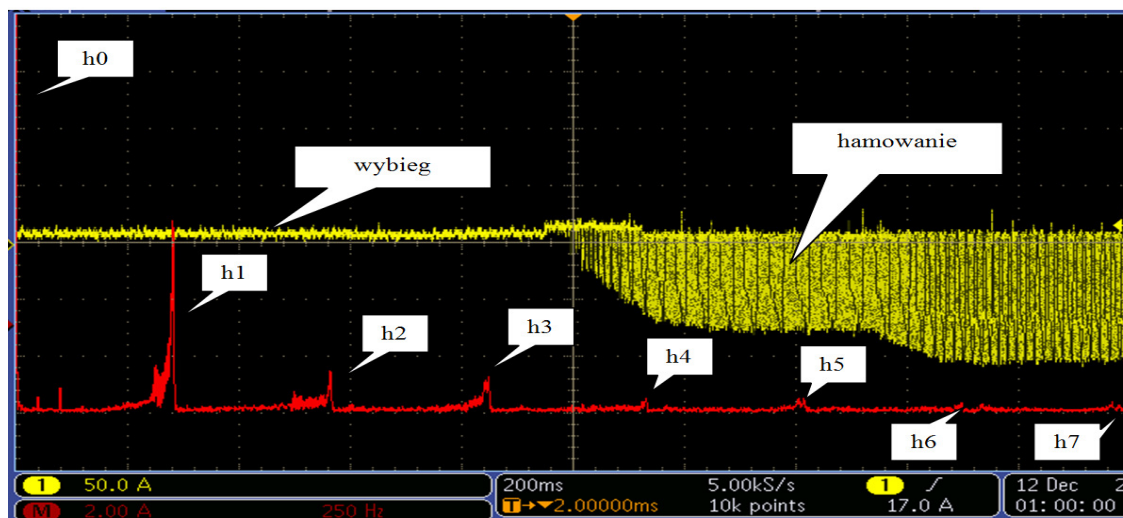
### 3.2. Przebieg badań

Pomiary przeprowadzono zgodnie z opracowanym programem badań, który zakładał zamknięcie czujników wodoru we wnętrzu naładowanej baterii akumulatorów i rejestrowanie stężenia wodoru podczas pracy lokomotywy górniczej, aż do momentu rozładowania baterii akumulatorów. Jednocześnie za pośrednictwem oscyloskopu, rejestrowane były przebiegi prądu doładowującego baterię akumulatorów w procesie hamowania elektrycznego z rekuperacją energii. Pomiar stężenia wodoru trwał 4 zmiany robocze (ok. 24h).

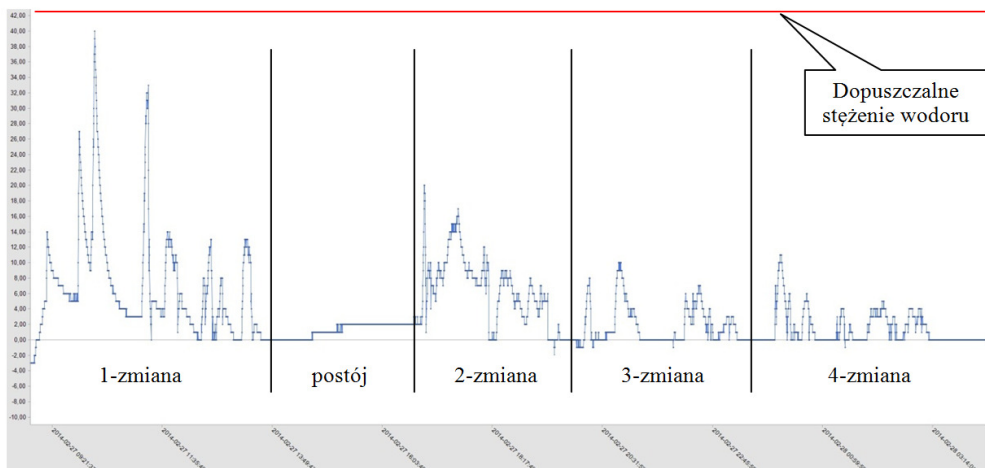
Zastosowane czujniki rejestrowały stężenie wodoru w postaci %DGW (Dolna Granica Wybuchowości). Przeliczenie %DGW na %obj. wynika zaś z określenia wybuchowego stężenia wodoru. Ponieważ wodór w powietrzu jest gazem wybuchowym w stężeniu od 4 do 75% obj., to jako 100%DGW przyjmuje się najniższą wartość %obj. czyli 4%obj. Odniesienie %DGW do zapisu z normy nr PN-EN 1889-2+A1(2010) odnośnie do obowiązku przewietrzania skrzyni akumulatorowej (tak aby stężenie wodoru nie przekraczało 2%obj), skutkowało tym, że pomiar stężenia wodoru zarejestrowany przez czujniki poniżej 50%DGW będzie oznaczał spełnienie wymagań bezpieczeństwa zapisanych w normie. Należy jednak podkreślić, że przekroczenie poziomu stężenia wodoru powyżej 50%DGW nie stanowi jeszcze zagrożenia, a jedynie sygnalizuje niespełnienie wymogów odnośnie do wentylacji skrzyni. Realne zagrożenie pojawia się natomiast podczas przekroczenia poziomu stężenia wodoru powyżej 90%DGW. Badania lokomotyw napędzanych silnikami prądu stałego przeprowadzono w warunkach rzeczywistych w podziemiach dwóch wybranych kopalń. Lokomotywy te wyposażone były w baterię akumulatorów o pojemności 840Ah i stosowane były do transportu materiałów na głównych drogach transportowych.

Trasy transportowe posiadały zróżnicowane ukształtowanie z nachyleniami nie przekraczającymi  $\pm 4^\circ$ .

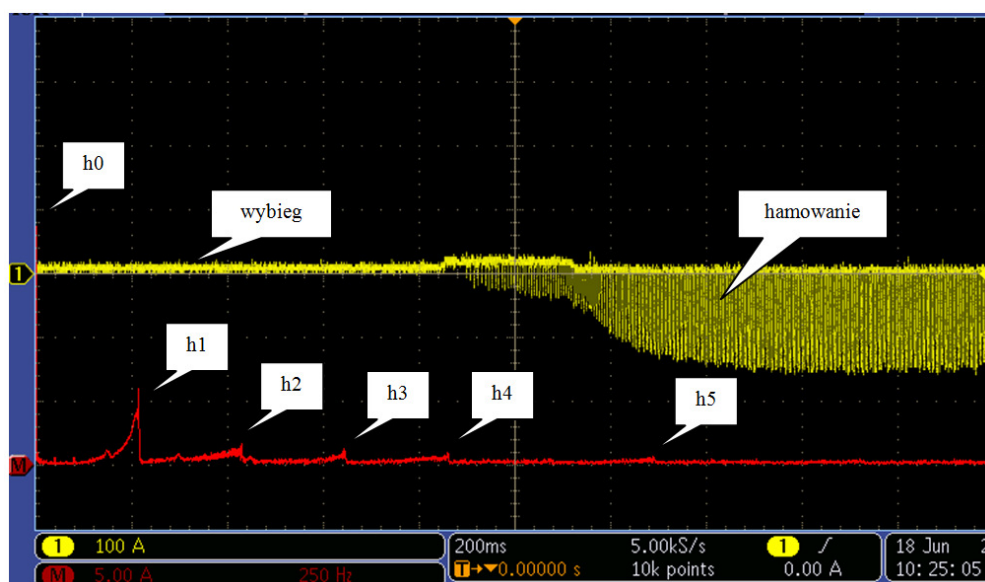
Przykładowe wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunkach poniżej.



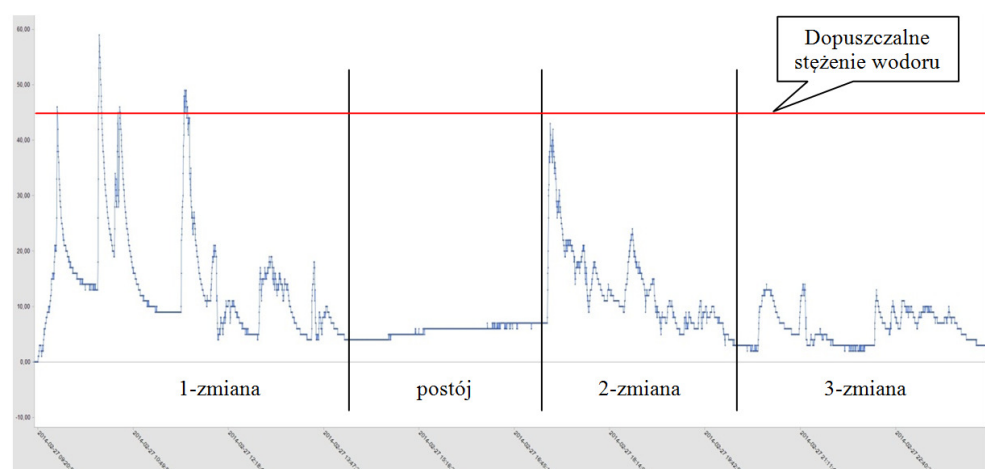
Rys. 5. Przebieg prądu doładowującego lokomotywy Lea BM-12 wraz z jego analizą FFT [7]



Rys. 6. Przebieg stężenia wodoru lokomotywy Lea BM-12 [7]



Rys. 7. Przebieg prądu doładowującego lokomotywy Lea 12P3A wraz z jego analizą FFT [7]



Rys. 8. Przebieg stężenia wodoru lokomotywy Lea 12P3A [7]

Z przeprowadzonych badań w warunkach rzeczywistych w kopalni wynika, że istniejące układy zasilająco-sterujące dedykowane do pracy w lokomotywie typu Lea 12P3A oraz lokomotywie typu Lea BM-12 generują prąd w procesie hamowania elektrycznego z odzyskiem energii. Układ z silnikiem elektrycznym LDs-327 generował prąd o wartości maksymalnej  $I_M = 600$  A, co przekładało się na średnią wartość skuteczną o wartości  $I_{\Sigma r} = 425$  A. Lokomotywę typu Lea BM-12 wyposażono w układ z silnikiem elektrycznym LDs-245, który umożliwił wygenerowanie prądu doładowującego o wartości maksymalnej  $I_M = 320$  A, co przekładało się na średnią wartość skuteczną o wartości  $I_{\Sigma r} = 227$  A. Zarówno dla lokomotywy typu Lea 12P3A, jak i dla lokomotywy Lea BM-12 prąd doładowujący jest zniekształcony. Maksymalna wartość zniekształceń dla układu z silnikiem LDs-327 wyniosła  $h_M = 25$  A, zaś dla układu z silnikiem LDs-245 maksymalna wartość zniekształceń wyniosła  $h_M = 17$  A. Dla lokomotywy typu Lea 12P3A odkształcenia były ściśle powiązane z natężeniem prądu doładowującego. Im wyższa wartość natężenia prądu doładowującego, tym większe zniekształcenia. W przypadku lokomotywy typu Lea BM-12 nie zaobserwowano takiej zależności. Z analizy technicznej urządzenia wynikało, że układ sterowania tej maszyny mógł być wyposażony w ogranicznik prądu, który uniemożliwił wygenerowanie prądu o natężeniu powyżej 320 A. Jednocześnie mógł on również wprowadzać zakłócenia, bądź też filtrować przebieg prądu doładowującego.

#### 4. Podsumowanie

Rejestracja stężenia emisji gazu elektrolitycznego (wodoru) pokazała, że zarówno w baterii współpracującej z lokomotywą typu Lea 12P3A jak i w baterii o tej samej pojemności współpracującej z lokomotywą typu Lea BM-12 podczas hamowania z odzyskiem energii wydzielał się wodór. Odnotowano przypadki przekroczenia dopuszczalnej wartości stężenia wodoru. Należy zaznaczyć, że podczas pomiarów nie zarejestrowano stężenia przekraczającego wartość realnego zagrożenia wybuchu wodoru (powyżej 100% DGW – powyżej 4% obj.). Na podstawie zarejestrowanych przebiegów, można stwierdzić, że najwyższe stężenie emisji wodoru następuje w pierwszej fazie pracy lokomotywy górniczej i jest ściśle związane z wartością natężenia prądu doładowującego. Ponadto można

powiedzieć, że kształt przebiegu stężenia wodoru jest zbliżony do kształtu prądu doładowującego. Na podstawie przeprowadzonych badań nie można powiedzieć, czy poziom odkształcenia prądu doładowującego ma wpływ na emisję gazu elektrolitycznego. Wynika to z braku odniesienia uzyskanych wyników do przypadku bez odkształceń. Wszystkie przebadane układy zasilająco-sterujące generowały zakłócenia, powodujące zniekształcenie prądu doładowującego. W celu wyeliminowania zakłóceń, należy odfiltrować poszczególne wyższe harmoniczne, co z uwagi na panujące w kopalni warunki jest niemożliwe. Przeprowadzona analiza FFT przedstawiona na przebiegach, praktycznie za każdym razem informowała o poziomie odkształcenia, jednakże z uwagi na jego wysoką częstotliwość nie zawsze było możliwym podzielenie go na konkretne wyższe harmoniczne. W celu wydobycia informacji na temat wyższych harmonicznych, prowadzone są dalsze prace analityczne.

#### 5. Literatura

- [1]. Budzyński Z., Miedziński B., Polnik B.: „*Effective control of a battery supplied mine locomotive unit*” Elektronika Ir Elektrotechnika Vol. 20, No. 3, 2014r. str. 39-43.
- [2]. Gluźniński W.: „Elektryfikacja podziemi kopalń węgla – Część 2 urządzenia i sieci niskiego napięcia”. Wydaw. „Śląsk” 1985.
- [3]. Poradnik górnika – tom 3. Wydaw. „Śląsk” 1974r.
- [4]. Świątek J.: „*Ewolucja technologii akumulatorów kwasowo-olowiowych*” Energetyka nr 4/2000r.
- [5]. Dzikowski A.: „Badanie wpływu stopnia wzbudzenia silnika trakcyjnego na parametry użytkowe lokomotywy i składu pociągu”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 1/2014, str. 13-18.
- [6]. Polnik B.: „Wpływ rekuperacji energii na poprawę sprawności układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej”, Maszyny Górnicze nr 2/2014, str. 56-60.
- [7]. Polnik B.: „*Badania i analiza pracy układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej*” ITG KOMAG Gliwice 2014r. (materiały niepublikowane).

#### Autor

mgr inż. Bartosz Polnik  
tel.: 32-2374-407  
e-mail: bpolnik@komag.eu  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG  
ul. Pszczyńska 37  
41-101 Gliwice