

Inteligentne zarządzanie procesem rekuperacji energii górniczej lokomotywy akumulatorowej

W artykule opisano problematykę, jaką niesie ze 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 stanowiskowym, mającym na celu zarejestrowanie właściwości parametrów składowych energii elektrycznej zwracanej do baterii akumulatorów podczas pracy w układzie z rekuperacją energii. Przedstawiono budowę stanowiska badawczego, scharakteryzowano metodę badawczą oraz zaprezentowano wstępne wyniki uzyskane podczas badań stanowiskowych.

1. WPROWADZENIE

W kopalniach węgla kamiennego oprócz lokomotyw przewodowych, zasilanych z elektrycznej sieci trakcyjnej, stosowane są również lokomotywy z zasilaniem akumulatorowym. Początkowo miały być one przeznaczone tylko do przewozu pomocniczego w strefie przyprzodkowej wyrobisk korytarzowych. Szybko jednak znalazły zastosowanie również przy przewozie w transporcie głównym [2]. Pierwsze rozwiązania lokomotyw akumulatorowych wyposażone

były w skrzynię z baterią akumulatorową, ograniczającą zakres stosowania wyłącznie do wyrobisk ze stopniem niebezpieczeństwa wybuchu metanu „b”. Opracowany oryginalny system przewietrzania baterii akumulatorów w osłonie siatkowej pozwolił na zastosowanie górniczych lokomotyw akumulatorowych w pomieszczeniach ze stopniem niebezpieczeństwa wybuchu metanu „c” [2]. Krajowe rozwiązania górniczych lokomotyw akumulatorowych opierają się wyłącznie na napędach z silnikiem szeregowym prądu stałego. Są to lokomotywy typu Lea (przeważnie jednonapędowe) oraz Ldag (dwunapędowe) – rys. 1.

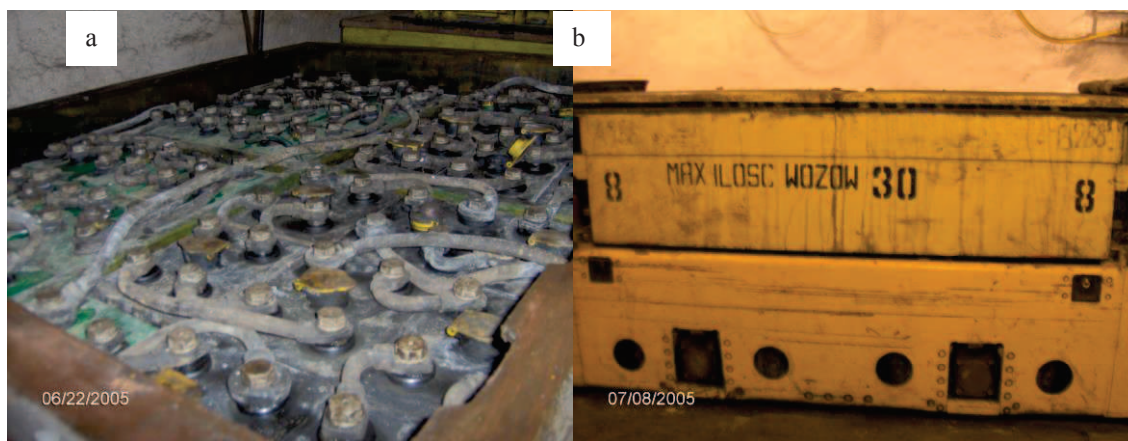


Rys. 1. Górnicze lokomotywy akumulatorowe produkcji polskiej [2]
a) Lea BM-12, b) Ldag 05M

2. BATERIA AKUMULATORÓW

W pomieszczeniach zagrożonych wybuchem metanu lub/i pyłu węglowego, zgodnie z normą PN-EN 60079-7:2010, „baterie wtórne powinny być kwaso-

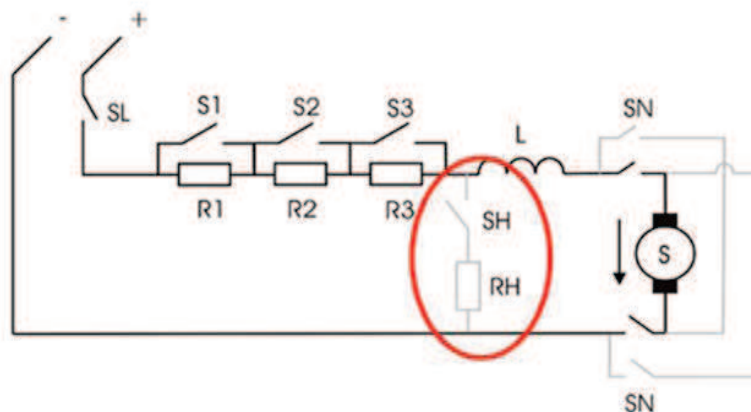
wo-ołowiowe, żelazowo-niklowe, niklowo-kadmowe (...)”. Zapis ten dotyczy ogniwi wtórnych o pojemności powyżej 25 Ah. Ogniwa stosowane w górniczych lokomotywach akumulatorowych posiadają przeważnie pojemność 760 (840) Ah [X] i są to ogniwa kwasowo-ołowiowe (rys. 2).



Rys. 2. Bateria akumulatorów lokomotywy Lea BM-12 [4]
a) Ogniwa typu 8A800, b) Obudowa przeciwybuchowa typu SBS-4

W celu efektywnego wykorzystania górniczych lokomotyw akumulatorowych należy możliwie najwięcej energii odzyskać w procesie hamowania elek-

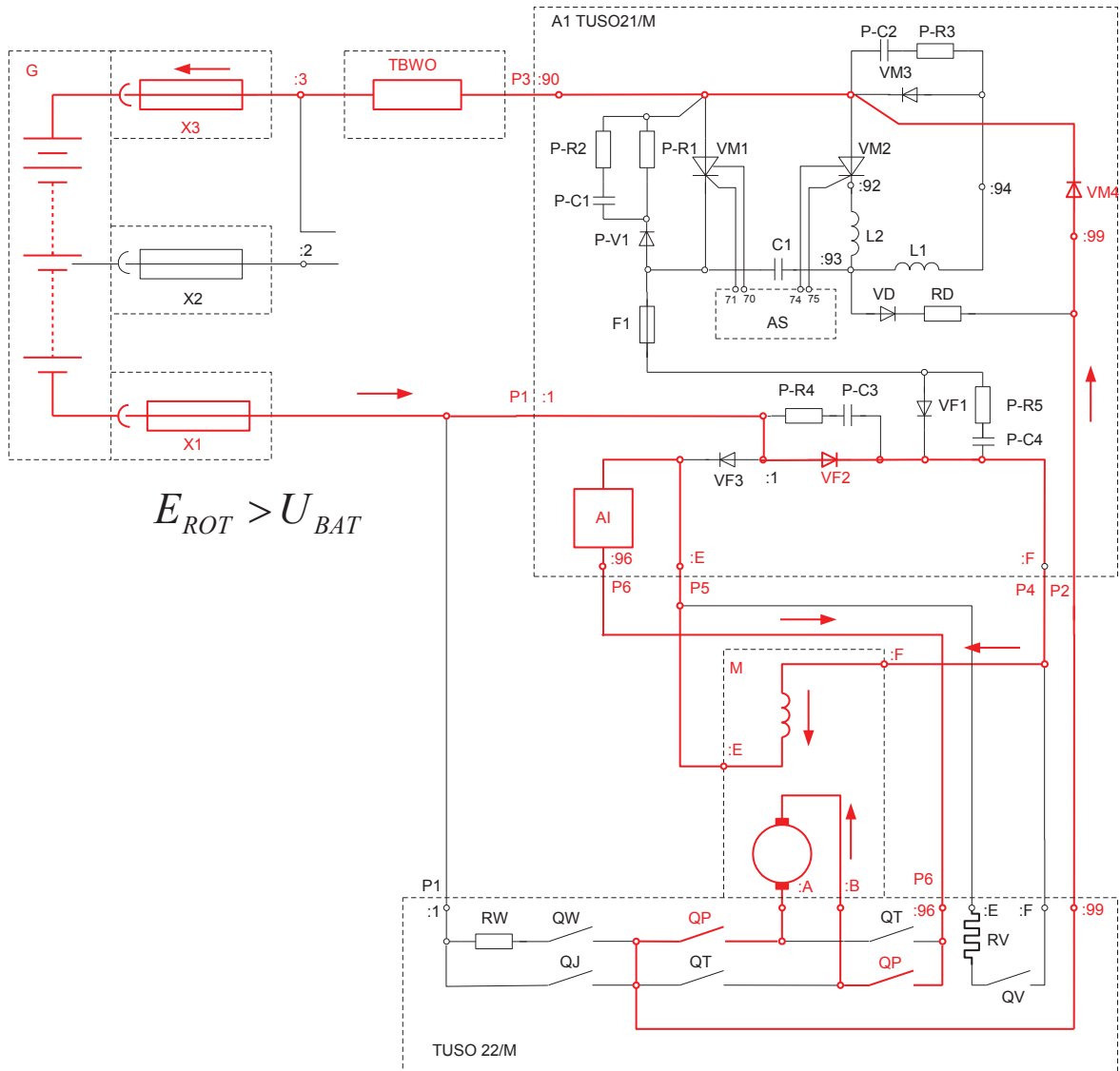
trycznego. Pierwsze układy sterujące lokomotyw akumulatorowych wykorzystywały zdolności do rekuperacji energii (rys. 3).



Rys. 3. Pierwotny układ sterowania górniczych lokomotyw akumulatorowych [4]

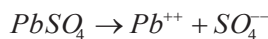
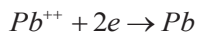
Sterowanie prędkością lokomotywy odbywało się przez szeregowe dołączanie i odłączanie kolejnych rezystancji (R1-R3) w obwód twornika silnika napędowego. Energia generowana w procesie hamowania elektrycznego była zamieniana na ciepło poprzez rezystancję hamującą (RH). Rozwój energoelektronicznych układów sterowania pozwolił w późniejszych latach zastosować do sterowania górniczą lokomotywą akumulatorową przekształtniki prądu stałego (rys. 4).

Na rys. 4. pokazano aktualny układ sterowania górniczej lokomotywy akumulatorowej. Układ ten wykorzystuje możliwość rekuperacji energii podczas hamowania elektrycznego, zaś kolorem czerwonym zaznaczono drogę przepływu prądu elektrycznego w czasie odzysku energii. Niestety z procesem ładowania (doładowywania) wiąże się pewne zagrożenia.



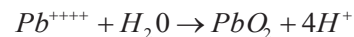
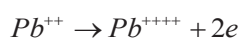
Rys. 4. Układ sterowania górniczej lokomotywy akumulatorowej Lea BM-12 [3]

Na płycie ujemnej (katodzie) w czasie ładowania w wyniku przyłożonego zewnętrznego napięcia w ogniwie następuje proces uwalniania z płyt siarczanu ołowiu $PbSO_4$:

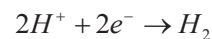


Podczas ładowania następuje redukcja skryształowanego siarczanu ołowiu $PbSO_4$, zalegającego na katodzie, w gąbczasty ołów. Reszta kwasowa SO_4^{--} ewoluje z wodorem, czego wynikiem jest stężony kwas siarkowy H_2SO_4 .

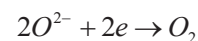
Na płycie dodatniej (anodzie) podczas ładowania na elektrodzie dodatniej zachodzą następujące procesy:



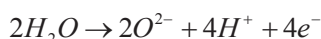
Elektrochemiczny rozkład siarczanu ołowiu $PbSO_4$ otwiera pory masy czynnej elektrod, umożliwiając tym samym dyfuzję stężonego kwasu siarkowego H_2SO_4 w pory. Dyfuzja elektrolitu w porach powoduje zwiększenie stężenia kwasu siarkowego, spadek rezystancji wewnętrznej ogniwa i wzrost *sem* ogniwa [4]. Są to procesy klasyczne, które przy normalnym użytkowaniu ogniw nie powinny stanowić zagrożenia dla użytkowników. Nie są to jednak jedyne procesy związane z ładowaniem ogniw, jednocześnie występują tzw. reakcje poboczne, zwane też pasożytniczymi. Na katodzie występuje emisja wodoru $2H^+$:



Na anodzie występuje emisja tlenu O_2 :



Ewolucja tlenu i wodoru, w następstwie elektrolitycznego rozkładu wody, przebiega następująco:



Opisane reakcje zachodzą w kwasowych ogniwach ze swobodną emisją gazów do atmosfery [5], czyli w klasycznych ogniwach stosowanych w górniczych lokomotywach akumulatorowych.

3. ZARZĄDZANIE PROCESEM REKUPERACJI ENERGII

Ponieważ procesów związanych z ładowaniem (doładowaniem) akumulatorów kwasowo-ołowiowych podczas hamowania elektrycznego nie można wyeliminować, stosuje się obudowy z otworami do przewietrzania zgodnie z zapisem z normy PN-EN 1889-2+A1 (2010) [6]: „W skrzyni, przedziale i/lub pokrywie akumulatora należy zastosować odpowiednie otwory wentylacyjne, aby nie występowało niebezpieczne stężenie oparów (...). Przy szacowaniu wymaganej wentylacji stężenie gazów elektrolitycznych powinno być mniejsze niż 2% w celu uniknięcia niebezpieczeństwa zapłonu”. Czy to szacowanie jest poprawne, a przede wszystkim czy jest skuteczne?

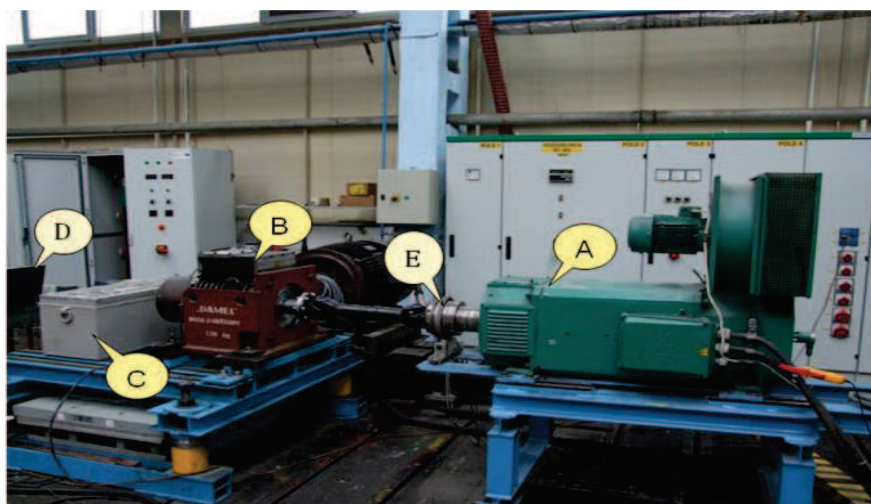
Powinno być, ale czy można wspomagać proces ładowania (doładowywania) baterii akumulatorów górniczej lokomotywy akumulatorowej tak, aby wydzielało się jak najmniej mieszaniny gazów elektrolitycznych, a ich przewietrzanie było w 100% skuteczne? Właśnie w związku z tego rodzaju wątpliwościami powstał pomysł inteligentnego zarządzania procesem rekuperacji energii górniczej lokomotywy akumula-

torowej. Jako inteligentne zarządzanie procesem rekuperacji energii autor rozumie proces maksymalnego zwrotu energii do akumulatora przy jednoczesnej minimalizacji gazu elektrolitycznego wydzielanego z ogniów. Ponieważ o ilości emitowanego gazu podczas ładowania (doładowywania) ogniów decyduje nie tylko natężenie prądu generowanego przez układ napędowy w czasie hamowania elektrycznego, ale także jakość tego prądu, w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG podjęto prace, mające na celu zarejestrowanie i analizę przebiegu odkształconego prądu podczas rekuperacji energii.

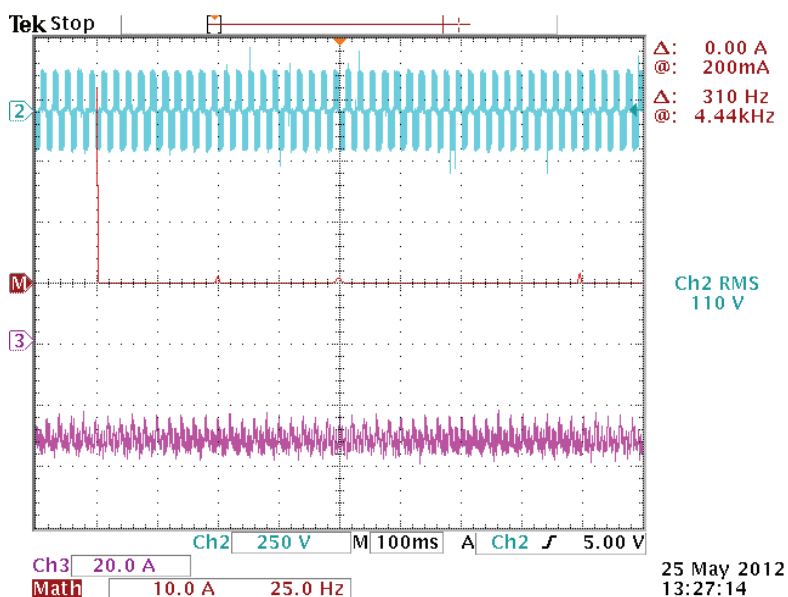
4. BADANIA STANOWISKOWE

Do badań stanowiskowych wykorzystane zostało stanowisko hamowni znajdujące się w laboratorium KOMAG-u. Stanowisko to było już wykorzystywane do badań wybranych napędów górniczej lokomotywy akumulatorowej, które były realizowane w ramach projektu badawczego rozwojowego nr N R01 0009 06 pt. „Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Teraz zostało doposażone w nowoczesne przyrządy posiadające zdolność rejestrowania przebiegów odkształconych i możliwość przeprowadzenia analizy FFT (Fast Furier Transform). Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.

Badania stanowiskowe miały na celu zarejestrowanie przebiegu odkształconego prądu zwracanego do baterii akumulatorów w procesie hamowania z rekuperacją energii. Dzięki zastosowaniu oscyloskopu



Rys. 5. Widok stanowiska badawczego [1]



Rys. 6. Przykładowe przebiegi z badań [4]

TDS3014B produkcji Tektronix możliwym było zaobserwowanie poziomu odkształcenia zarejestrowanego przebiegu prądu. Na rys. 6. pokazano oscylogram przebiegu prądu zwracanego do baterii podczas hamowania elektrycznego z rekuperacją energii. Zarejestrowano przebiegi napięcia na silniku (kolor niebieski), prądu zwracanego do baterii (kolor fioletowy) oraz wyższych harmonicznych prądu zwracanego do akumulatora (kolor czerwony).

Jak można wywnioskować z rys. 6., zarejestrowano osiem kolejnych harmonicznych prądu. Przebiegi zostały zarejestrowane podczas hamowania elektrycznego przy znamionowej prędkości obrotowej silnika napędowego o wartości 1500 obr/min i przy prądzie o wartości ok. 140 A. Natężenie prądu zwracanego do baterii wynosiło ok. 35 A. Składowa zerowa prądu była na poziomie 100% wartości prądu zwracanego do baterii, co powoduje bardzo wysokie odkształcenie przebiegu. Kolejne harmoniczne utrzymywały się w granicach 10% wartości prądu zwracanego do baterii. Ponieważ na zarejestrowanym oscylogramie widać maksymalnie osiem kolejnych harmonicznych, nie można powiedzieć, przy której harmonicznej następuje ich wytlumienie i czy w ogóle sytuacja taka ma miejsce. Temu będą służyły kolejne badania, o dużo bardziej szczegółowym zakresie, związane z przeprowadzeniem dokładniejszej analizy uzyskanych wyników.

5. PODSUMOWANIE

Badania wstępne, jakie zostały przeprowadzone w ramach pracy statutowej nr E/BDE-14247, wyka-

zały konieczność prowadzenia dalszych prac związanych ze zjawiskiem rekuperacji energii. Uzyskane wyniki dość jednoznacznie pokazały, iż odkształcenia związane z prądem zwracanym do baterii podczas hamowania elektrycznego są stosunkowo duże i mogą mieć niekorzystny wpływ na ilość emitowanego z ogniw do otoczenia gazu elektrolitycznego. Istotnym staje się znalezienie równania wiążącego ilość emitowanego gazu elektrolitycznego w funkcji poziomu odkształcenia przebiegu prądu zwracanego do baterii akumulatorów. Tego rodzaju prace będą realizowane w kolejnych etapach w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, a o ich konieczności niech świadczy fakt coraz to szerszego zainteresowania kopalń górnictwami lokomotywami akumulatorowymi.

Literatura

1. Polnik B.: *Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, 2012 nr 94.
2. Budzyński Z., Gąsior T., Polnik B.: *Analiza porównawcza zastosowania napędu synchronicznego i asynchronicznego w górniczych lokomotywach akumulatorowych*. Maszyny Górnicze, 2011 nr 4.
3. Hefczyc M., Daniłow J.: *Lokomotywy kopalniane ognioszczelne akumulatorowe. Nowe rozwiązania układów sterowania napędem*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa, 1994 nr 10 (292).
4. Sprawozdanie z pracy nr E/BDE-14247 pt.: *Badania układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej* (materiały niepublikowane).
5. Norma PN-EN 60079-7:2010 Atmosfery wybuchowe – Cz. 7: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą budowy wzmocnionej „e”.
6. Norma PN-EN 1889-2+A1 (2010) Maszyny dla górnictwa podziemnego – Podziemne maszyny samobieżne – Bezpieczeństwo – Cz. 2: Lokomotywy szynowe.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.