

Techniczne aspekty związane z produkcją na wielką skalę samochodów elektrycznych

Zdzisław Budzyński

1. Wprowadzenie

Historia samochodów z napędem elektrycznym rozpoczęła się w latach 1832–1836 próbą budowy pojazdów elektrycznych, zasilanych z ogniwa Volty. Wykonanie w 1859 roku akumulatora kwasowo-ołowiowego było kolejnym etapem rozwoju samochodów elektrycznych. Samochody z napędem elektrycznym posiadały coraz lepsze parametry eksploatacyjne i w roku 1899 po raz pierwszy osiągnęły prędkości 100 km/h. Rozwój stosunkowo drogich samochodów elektrycznych został zahamowany w 1908 roku, gdy uruchomiono na masową skalę produkcję Forda T. Po latach zastoju dopiero w 1947 roku, po skonstruowaniu tranzystora oraz baterii Exide, kontynuowano prace nad samochodami elektrycznymi. W latach 1958–1961 wyprodukowano 100 samochodów elektrycznych na napięcie 36 V i 72 V, poruszających się z prędkością do 96 km/h przez 1 godzinę. W roku 1980 firma General Motor wyprodukowała modele Impact, a następnie EV1 oferowane w leasingu. Od 2000 r. nastąpiło znaczne przyspieszenie rozwoju samochodów elektrycznych, spowodowane dostępnością ogniw nowej generacji. Wszystkie liczące się koncerny motoryzacyjne rozpoczęły prace studialne nad modelami hybrydowymi, a później elektrycznymi. Pierwsze samochody były wyposażone głównie w baterie zestawione z ogniw niklowych, typu NiMH i NiCd. Krokiem milowym było pojawienie się na rynku w 2012 r. samochodu elektrycznego Model S, produkowanego seryjnie przez firmę Tesla Motors w cenie 70 000 \$.

2. Metody uzupełniania energii

Do budowy akumulatorów najczęściej stosowane są ogniwa niklowo-wodorkowe, z grupy litowych głównie: polimerowe, jonowe, żelazowo-fosforanowe oraz przepływowe wanadowe z wymiennym ciekłym elektrolitem. Parametry wybranych ogniw przedstawiono na rys. 1.

Ograniczona zdolność do magazynowania energii przez ogniwa powoduje konieczność jej uzupełniania. Ograniczenia energetyczne, wynikające z konstrukcji samochodów oraz baterii akumulatorów: masa i gabaryty, pozwalają bez ładowania osiągać odległości niewiele większe niż 100 km. Wraz z postępem technologicznym należy spodziewać się konstrukcji ogniw o coraz większym wskaźniku gęstości energii, co w zasadniczy sposób zwiększy zasięg poruszania się samochodem bez konieczności uzupełniania energii. Szacuje się, że obecnie na przejechanie samochodem osobowym 100 kilometrów

Streszczenie: W artykule przedstawiono techniczne i organizacyjne aspekty związane z produkcją na wielką skalę samochodów osobowych, zasilanych z baterii akumulatorów nowej generacji. Przedstawiono techniczne możliwości w zakresie produkcji samochodów zasilanych energią elektryczną, w tym sposoby szybkiego uzupełniania energii akumulatorów i ich zalety oraz wady. Szczególną uwagę zwrócono na aspekt energetyczny, bezpieczeństwo w czasie eksploatacji i procesu ładowania baterii.

Słowa kluczowe: samochód elektryczny, baterie akumulatorów, ogniwa litowe, ogniwa przepływowe, ładowanie akumulatorów

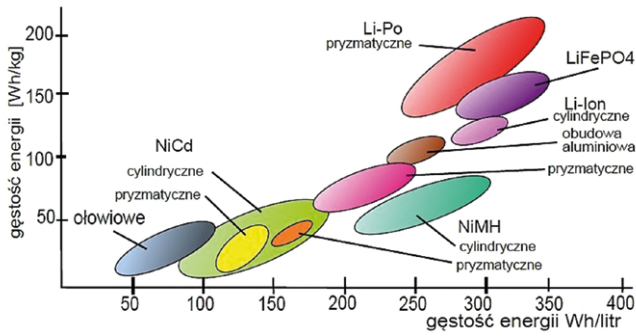
TECHNICAL ASPECTS OF SERIES PRODUCTION OF ELECTRIC CARS

Abstract: Some technical and organizational aspects of series production of electric cars, driven from a set of new generation rechargeable cells, are presented in the paper. Technical capabilities in the scope of a production of cars driven with electric energy, including methods of a quick charging of rechargeable cells as well as their advantages and disadvantages, are described. Special attention is paid to power aspect, operational safety and battery loading process.

Key words: electric car, sets of batteries, lithium cells, flow cells, loading of rechargeable cells

wymagana jest energia 12–28 kWh i to jest wielkość niezależna od typu akumulatora. Porównanie zużycia energii w wybranych samochodach elektrycznych przedstawiono na rys. 2.

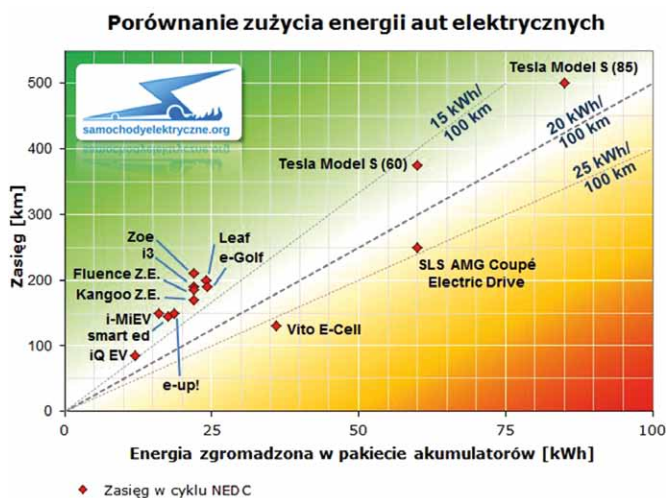
Podstawowymi metodami uzupełniania energii w samochodach osobowych elektrycznych jest obecnie ładowanie baterii lub ich wymiana. W przyszłości, po wprowadzeniu do produkcji seryjnej akumulatorów przepływowych, uzupełnianie energii polegać będzie na wymianie elektrolitu lub ładowaniu prądem elektrycznym.



Rys. 1. Parametry ogniw akumulatorowych [1]



Rys. 3. Złącza zasilające w samochodach osobowych



Rys. 2. Zużycie energii elektrycznej w wybranych samochodach [3]

Ładowanie baterii akumulatorowych

Ładowanie baterii w produkowanych samochodach wymaga dostarczenia energii z sieci energetycznej, 1-fazowej lub 3-fazowej, za pośrednictwem specjalnych ładowarek przetwarzających prąd zmienny na stały, o odpowiednim napięciu, dostosowanym do baterii. Połączenie ładowarki z instalacją samochodu odbywa się za pomocą specjalnych złączy (rys. 3), które z reguły w każdym typie samochodu są inne. Możliwe jest ładowanie baterii z sieci domowych (garaż) lub na stacjach ładowania. Zasilanie z sieci domowych, z uwagi na ograniczenia energetyczne związane z zainstalowaną niską mocą oraz niewielkie przekroje przewodów i wielkość zabezpieczeń, umożliwiając ładowanie stosunkowo małym prądem, co w zasadniczy sposób wydłuża czas ładowania. Przykładowo, z ładowarki 1-fazowej (230 V) ładowanie baterii Nissana Leaf trwa ok. 6 godzin. To rozwiązanie jest praktyczne, ale tylko gdy samochodu używamy na krótkich trasach, bez konieczności uzupełniania energii. Do uzupełnienia energii na dłuższych trasach stosuje się ładowarki szybkiego ładowania umieszczane np. na parkingach lub stacjach benzynowych rys. 4.



Rys. 4. Ładowarka firmy Tesla [9]

System szybkiego ładowania baterii akumulatorów na przystankach autobusowych stosowany w Szwajcarii za pomocą ładowarki o mocy chwilowej 600 kW umożliwia dostarczenie energii o wartości 2,5 kWh w czasie 15 s [2]. To pozwala na przejechanie autobusem 1–2 km. Po zatrzymaniu autobusu na przystanku następuje wysunięcie złącza z pojemnika na dachu do wysięgnika ładowarki i szybkie ładowanie baterii (rys. 5).

Na przystankach końcowych ładowanie trwa ok. 4–5 minut, dostarczając energię o wartości 50 kWh, co wystarcza na powrót autobusu do bazy. Zastosowanie powyższego systemu



Rys. 5. System szybkiego ładowania baterii autobusu [2]

na szerszą skalę w dużych aglomeracjach miejskich, gdzie na przystankach zatrzymują się autobusy różnych linii w krótkich odstępach czasowych, będzie wymagać zastosowania ładowarki i systemu zasilania o mocy ciągłej 600 kW. W Warszawie podobny system o mocy 200 kW, planuje się zainstalować na Trakcie Królewskim.

Wszystkie ładowarki, niezależnie od mocy zainstalowanej, powinny być dodatkowo wyposażone w specjalne układy do monitorowania procesu ładowania oraz posiadać system zabezpieczeń przed przeładowaniem ogniw; w szczególności dotyczy to ogniw z grupy litowych [5], bardzo wrażliwych na ten stan, który może spowodować pożar baterii, a w konsekwencji samochodu. Na rynku krajowym w kopalniach węgla kamiennego stosowane są maszyny zasilane z baterii akumulatorów litowych o pojemnościach do 600 Ah i energii 150 kWh [8], które są ładowane z sieci energetycznej za pośrednictwem specjalnych ładowarek. Połączenie ładowarki z baterią maszyny odbywa się za pomocą specjalnych złącz wtykowych [7].

Bezprzewodowe dostarczanie energii

Oprócz rozwiązań z przewodowym systemem dostarczania energii elektrycznej do akumulatorów znane są i testowane systemy wykorzystujące pole magnetyczne. Zasilanie cewki prądem powoduje powstanie pola magnetycznego. Gdy w bezpośrednim sąsiedztwie znajdzie się druga cewka, to pole magnetyczne wygeneruje prąd elektryczny. W Stanach Zjednoczonych prowadzone są prace nad procesem ładowania w ww. sposób samochodów będących w ruchu, polegający na wbudowaniu w jezdnię zestawu cewek. Samochody wyposażone w odpowiednie cewki dostarczą wystarczająco dużo energii, umożliwiając dojechanie do kolejnego zestawu cewek wbudowanego w pasie ruchu [6].

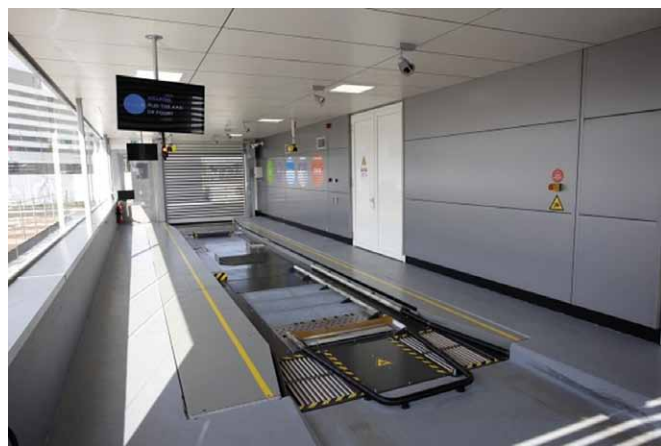
Wymiana baterii akumulatorów

Systemem alternatywnym do ładowania baterii akumulatorów jest ich szybka wymiana na specjalnych stacjach. System ten stosowany jest w akumulatorowych wozach odstawczych, pracujących głównie w kopalniach rud metali

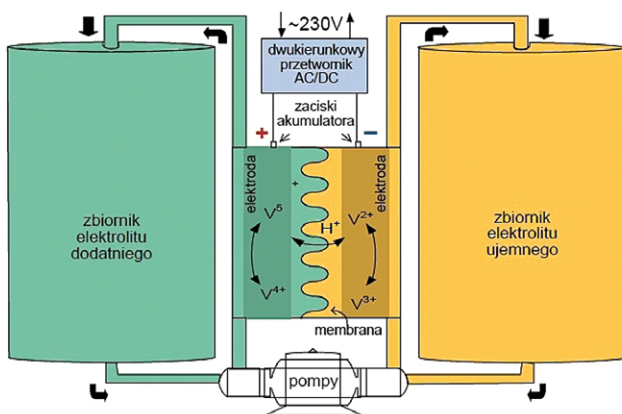
oraz w lokomotywach akumulatorowych pracujących w kopalniach węgla kamiennego [11]. System szybkiej wymiany akumulatorów w samochodach osobowych stosowany jest obecnie w Izraelu (rys. 6).

Ogniwa przepływowe

Rozwiązaniem przyszłościowym mogą stać się akumulatory przepływowe (rys. 7), które można ładować energią elektryczną lub wymienić w nim płynny elektrolit. W 2000 roku pojawiły się na rynku akumulatory przepływowe wanadowe, często oznaczane skrótem RFB (*Redox Flow Battery*). Składają się one z dwóch komór, oddzielonych od siebie półprzewodzącą przegrodą (membraną), nie pozwalającą na mieszanie cieczy, ale przepuszczającą elektrony. Komory są wyłożone grafitem, a wewnątrz komór wypełnione jest watą grafitową, zaś elektrody zazwyczaj są grafitowe. Do komór tłoczony jest wodny roztwór jonów wanadu w kwasie siarkowym, zawierający wanad o różnym stopniu utlenienia. W wyniku procesów elektrochemicznych zachodzących w roztworach na elektrodzie dodatniej pojawia się niedobór, a na ujemnej nadmiar elektronów, powodujący powstanie napięcie na zaciskach ogniwa. Wadą ogniwa jest niska gęstość energii rzędu 20–25 Wh/kg oraz niewielki zakres temperatury pracy.



Rys. 6. Stacja szybkiej wymiany baterii akumulatorów [10]



Rys. 7. Schemat ogniwa przepływowego wanadowego [1]



Rys. 8. Akumulator przepływowy [1]

Najnowsze rozwiązania akumulatorów przepływowych to żelazowo-chromowe oraz cynkowo-bromowe (rys. 8), zastosowane w samochodzie Quant F o mocy 100 kW, z napędem na cztery koła, zaprezentowanym podczas Salonu Samochodowego w Genewie w 2016 r. Prowadzone są również prace nad akumulatorem przepływowym wykorzystującym wodór i chloran litu, który może osiągać gęstość energii 1400 Wh/kg, nieosiągalną dotychczas przez żadne ze znanych rozwiązań.

3. Wady i zalety systemów

Zaletą systemu ładowania z domowych źródeł zasilania 1-fazowego 230 V oraz 3-fazowego 400 V jest ich dostępność bez nakładów na wykonywanie sieci zasilającej. Wadą jest niska moc zainstalowana. System ten może być wykorzystany do uzupełniania energii np. w nocy przez posiadaczy garaży i domów lub na osiedlowych strzeżonych parkingach.

Zaletą systemu szybkiego uzupełniania energii jest możliwość przemieszczania się na duże odległości. Rozmieszczenie

ich na parkingach, stacjach benzynowych itp. będzie wymagać doprowadzenia energii elektrycznej o dużej mocy oraz zastosowanie ładowarek z systemem rozliczeń energii pobranej przez akumulator. Koszt przejechania 100 km szacuje się na poziomie 6–8 zł/100 km. Obecnie, ze względów marketingowych, dostarczana energia elektryczna oferowana jest nieodpłatnie. Należy również brać pod uwagę, że energia elektryczna pobrana przez akumulatory samochodowe w przyszłości może być obłożona akcyzą, jak obecnie paliwa płynne. Wadą systemu jest brak ujednoliconego systemu złąc do połączeń ładowarki z samochodem oraz konieczność doprowadzenia energii elektrycznej o dużej mocy. Niezależnie od typu akumulatora czas szybkiego ładowania, tylko ze względów energetycznych (wielkość prądu ładowania), będzie kilkukrotnie dłuższy od obecnego czasu tankowania paliwa.

System oparty na wymianie baterii może okazać się rozwiązaniem bardzo praktycznym i szybkim. Warunkiem będzie stosowanie przez wszystkie marki samochodów jednolitego

systemu szybkiej wymiany akumulatorów oraz baterii o tych samych gabarytach i napięciu zasilania. Zaletą tego systemu będzie możliwość ładowania baterii w godzinach nocnych, gdy energia jest tańsza. Wadą jest konieczność posiadania zapasu baterii akumulatorów i miejsca na ich składowanie. Rozliczenie zużytej energii wymagać będzie odczytu energii zmagazynowanej w obu bateriach.

System oparty na akumulatorach przepływowych wydaje się być najlepszym rozwiązaniem, gdyż umożliwia uzupełnianie energii przez ładowanie prądem elektrycznym oraz poprzez wymianę elektrolitu.

System ten ma tę zaletę, że jest uniwersalny. Podczas przemieszczania się na duże odległości na stacjach będzie można wymieniać elektrolit. Jeżeli nie ma ograniczeń czasowych, można ładować prądem elektrycznym. System ma dodatkowe zalety, że będzie mniejsze zapotrzebowanie na energię elektryczną, a do wymiany elektrolitu będzie można wykorzystać infrastrukturę sieci stacji benzynowych. Wadą jest konieczność zabudowy w samochodach dwóch stosunkowo dużych zbiorników na elektrolity. Przykładowo w samochodzie Quant F stosowane są zbiorniki o pojemności 200 litrów.

4. Aspekt energetyczny związany z eksploatacją samochodów elektrycznych

Obecnie, ze względu na niewielką liczbę elektrycznych samochodów osobowych, nie występuje problem energetyczny. Będzie on narastać wraz ze zwiększającą się liczbą samochodów na rynku. Przykładowo, instalacja 10 stanowisk do szybkiego ładowania samochodów Nissan, z baterią o pojemności 30 kWh w czasie 30 minut, wymaga zabudowy ładowarek o sumarycznej mocy 500 kW.

Dostarczenie energii do stacji szybkiego ładowania wymagać będzie stosowania napięć zasilania min 6 kV i doprowadzenie z najbliższej rozdzielni kablem do miejsca zabudowy stacji. Problemy z dostarczeniem energii do stacji ładowania wystąpią zarówno na poziomie lokalnym, jak i krajowym. Zużycie energii w samochodach osobowych mieści się w przedziale 12–28 kWh/100 km, w zależności od marki samochodu. Do oceny zapotrzebowania na energię przyjęto średnią wartość na poziomie 20 kWh/100 km (0,2 kWh/km) oraz średni przebieg pojazdu 25 km/dobę (8800 km/rok). W Polsce w 2015 roku liczba zarejestrowanych samochodów osobowych wynosiła ~19,3 mln. Według prognoz za 20 lat połowę samochodów poruszających się na polskich drogach będą stanowiły samochody elektryczne. Dobowe zapotrzebowanie na energię wynosić więc będzie:

$$E_d = e_{sr} \cdot i \cdot l_d$$

gdzie:

e_{sr} – średnie dobowe zużycie energii elektrycznej w samochodzie elektrycznym na 1 km;

i – prognozowana liczba samochodów elektrycznych;

l_d – średni dzienny przebieg samochodu w kilometrach.

$$E_d = 0,2 \times 9,65 \times 10^6 \times 25 = 48,25 \times 10^6 \text{ kWh}$$



Rys. 9. Stacja szybkiego ładowania o mocy 500 kW na 28 stanowisk w Norwegii [3]

Moc zainstalowana na potrzeby samochodów elektrycznych, przy założeniu równomiernego poboru energii w czasie doby, będzie wynosić:

$$P = \frac{E_d}{24} = 2010 \text{ MW}$$

W związku z powyższym istnieje potrzeba zainstalowania do systemu energetycznego mocy najmniej 2010 MW. W rzeczywistości, ze względu na nierównomierność poboru mocy przez użytkowników samochodów w ciągu doby, moc szczytowa będzie wyższa od obliczonej. Dla porównania cała moc zainstalowana w RP wynosiła, wg stanu na 31.12.2015 r., 40445 MW [4]. Na potrzeby motoryzacyjne istnieje konieczność budowy elektrowni oraz modernizacji krajowej sieci energetycznej. Stosowanie przekształtników energoelektronicznych w ładowarkach będzie miało wpływ na jakość energii, która wyraża się takimi parametrami, jak: zmiana wartości skutecznej napięcia zasilania (PN-EN 61000 3-3), harmoniczne napięcia zasilania (PN-EN 50160) oraz emisja harmonicznych prądu (PN-EN 61000 3-2). Wprowadzenie na rynek prognozowanej liczby samochodów elektrycznych spowoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, a jednocześnie zmniejszy się zużycie paliw płynnych o ok. 3810 000 m³/rok.

Nastąpi również duże zapotrzebowanie na lit, będący podstawowym składnikiem akumulatorów nowej generacji. Przy produkcji 10 mln samochodów elektrycznych o zasięgu przynajmniej 500 km (z pakietami 100 kWh, a taki pakiet będzie miała najdroższa wersja samochodu elektrycznego Tesla Model S) zapotrzebowanie na lit sięgnie 110–150 tys. ton.

Zużywając 150–200 tys. ton litu rocznie i zakładając jego zasoby na 15 mln ton (nieco więcej niż podają źródła [12]) wystarczy go na 75–100 lat. Jeśli założymy wielkość zasobów litu na 30 lub 40 mln ton (wg źródeł [13]), to z pewnością nie zdolamy go zużyć przez 100 albo i 200 lat, produkując samochody elektryczne z pakietami akumulatorów litowych 100 kWh.

5. Podsumowanie

1. Wszystkie systemy uzupełniania energii polegające na ładowaniu energią elektryczną muszą posiadać baterię o zbliżonych napięciach zasilania oraz systemy komunikowania się

komputerów samochodu z zewnętrznymi ładowarkami. To umożliwi przekształtnikowi energoelektronicznemu ładowarki dostarczenie energii o odpowiednim napięciu i prądzie, a zainstalowany licznik dokona pomiaru dostarczonej energii.

2. Dobrym rozwiązaniem wydają się być ogniwa przepływowe, które można ładować elektrycznie lub bardzo szybko poprzez wymianę elektrolitu, wykorzystując do tego celu infrastrukturę istniejących obecnie stacji benzynowych.
3. Wprowadzenie na masową skalę samochodów z napędem elektrycznym wymaga ogromnych nakładów inwestycyjnych w zakresie produkcji energii elektrycznej oraz dystrybucji do miejsc ładowania. Na obecnym etapie rozwoju branży brak jest informacji na temat wpływu zakłóceń emitowanych przez przekształtniki energoelektroniczne ładowarek na jakość energii sieci energetycznej.
4. W zakresie bezpieczeństwa brak jest rozwiązań systemowych, związanych z obsługą ładowarek oraz ich zabezpieczeniami przed zwarciami, pożarem i przeładowaniem baterii, co jest bardzo niebezpieczne w przypadku ogniw litowych.

Literatura

- [1] http://ep.com.pl/artykuly/10300-Akumulatory_i_nietylko.html
- [2] ABB wins 1st commercial order for breakthrough 15-second flash charging technology to enable +CO2-free public transport in Geneva, abb.com, 15.07.2016 r.
- [3] SamochodyElektryczne.org.htm
- [4] Lista elektrowni w Polsce www.pse.pl
- [5] BUDZYŃSKI Z., POLNIK B.: *Badania laboratoryjne ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych w aspekcie możliwości ich stosowania w przestrzeniach potencjalnie zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego*. „Maszyny Górnicze” 4/2016.
- [6] <http://kopalniawiedzy.pl/Witricity-energia-elektryczna-bezprzewodowe-przesylanie-energii...>
- [7] BUDZYŃSKI Z., KACZMARCZYK K., PIECZORA E.: *Akumulatory nowej generacji w górniczych systemach transportowych na przykładzie ciągnika PCA-1*. „Napędy i Sterowanie” 2/2012.
- [8] BUDZYŃSKI Z., DRWIĘGA A., KACZMARCZYK K., PIECZORA E.: *Innowacyjne rozwiązania górniczych urządzeń transportowych z napędem akumulatorowym*. „Maszyny Górnicze” 1/2012.
- [9] ORLEN otwiera się na e-tankowanie, orlen.pl, 07.07.2015 r.
- [10] Better Place, flickr.com, 29.03.2011 r.
- [11] BUDZYŃSKI Z.: *Innowacyjne rozwiązania układów sterowania i napędów lokomotyw elektrycznych kopalnianych kolei szynowych*. „Maszyny Górnicze” 3–4/2010.
- [12] U.S. Geological Survey, 2009, Mineral commodity summaries 2009, minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf, 30.12.2009 r.
- [13] The Trouble with Lithium 2: Under the Microscope, www.worldlithium.com/An_Abundance_of_Lithium_1_files/An%20Abundance%20of%20Lithium.pdf, 30.12.2009 r.



mgr inż. Zdzisław Budzyński -

Instytut Techniki Górniczej KOMAG Gliwice

artykuł recenzowany