

Zachowanie akumulatorów trakcyjnych zamontowanych w pojeździe elektrycznym

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawiono problem eksploatacji pojazdu elektrycznego z zastosowaniem akumulatorów kwasowo-ołowiowych, połączonych w szereg i równolegle, bez systemu zarządzania stanem akumulatorów (BMS). Przedstawiony jest charakterystyczny i powtarzalny - w swoim sposobie - stan rozładowania akumulatorów.

Abstract. This paper presents the problem of using an electric vehicle using lead-acid batteries connected in series and in parallel, without Battery Management System (BMS). There is shown a characteristic and reproducible - in his way - battery state of charge. (**The behavior of electric vehicle traction batteries connected in series and in parallel**).

Słowa kluczowe: akumulator, rozładowywanie, szeregowo, równoległo.

Keywords: battery, discharging, serial, parallel.

doi:10.12915/pe.2014.02.33

Wstęp

Akumulatory kwasowo-ołowiowe są elektrochemicznymi zasobnikami energii, do niedawna najczęściej stosowanymi w pojazdach elektrycznych ze względu na niski koszt produkcji [4] i wciąż są najbardziej rozpowszechnionym rozwiązaniem elektrochemicznego magazynowania energii [2]. Bardzo często rozwiązania projektowe wymuszają połączenia akumulatorów zarówno w szereg (celem osiągnięcia odpowiedniego napięcia), jak i równoległo (celem osiągnięcia większej pojemności elektrycznej, a co za tym idzie – większego zasięgu pojazdu). Pomimo, iż ich zasada działania nie jest nowa, wiele badań jest im wciąż poświęconych; złożone procesy zachodzące wewnątrz akumulatora nadal nie są jeszcze w pełni poznane [2]. Natomiast, ze względu na różnice warunków pracy i istotnych rozbieżności między samymi akumulatorami, pojemność ładowanych czy rozładowywanych akumulatorów mogą się różnić w trakcie ładowania lub rozładowania, pomimo tej samej wartości prądu płynącego przez każdy akumulator [1]. Problem ten jest znany i znaleziono jego rozwiązanie – system zarządzania stanem akumulatorów, z angielskiego zwanego Battery Management System. Warto także zauważyć, że pojazdy, w których taki system nie występuje narażone są na nierównomierne rozładowanie, a co gorsze niektóre z nich mogą być rozładowane poniżej wartości dopuszczalnych, podczas, gdy inne są jeszcze nie w pełni rozładowane. Dzieje się tak za sprawą sumarycznego napięcia gałęzi. Problem ten odciska piętno także w trakcie ładowania, lecz tym razem na akumulatorach mniej rozładowanych, które to doprowadzane są do efektu gazowania [3]. Wykazano, że żywotność akumulatora, w normalnym cyklu pracy, spada z tendencją wykładniczą, wraz ze wzrostem długości gałęzi akumulatorów [3]. Również nieliniowa tendencja została odkryta, lecz w przypadku poziomego stanu rozładowania akumulatorów.

Nierównomierne rozładowanie akumulatorów

Obiektem badań był samochód klasy C, czyli Opel Astra, w którym silnik spalinowy został zastąpiony przez silnik elektryczny prądu stałego, sterowanego poprzez chopper i zasilanego akumulatorami trakcyjnymi, kwasowo-ołowiowymi. Badaniom został poddany pojazd, który udostępnił Przemysław Instytut Motoryzacji. Wszystkie akumulatory zamontowane w pojeździe były nowe, o jednakowym napięciu znamionowym oraz pojemności - model 27TMH firmy Trojan. W pojeździe akumulatory zostały rozmieszczone w następujący sposób: cztery z pośród dwunastu umieszczone w komorze silnika, zaś pozostałe osiem w przestrzeni ładunkowej. Instalacja

elektryczna została zaprojektowana na 72V, przez co akumulatory zostały połączone następująco: sześć akumulatorów w szereg i równoległo do nich pozostałe sześć akumulatorów, również połączonych w szereg.

Tabela 1. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów z dnia 4.01.2011 r.

nr akumulatora	SEM [V]
1	11,95
2	11,98
3	11,63
4	11,14
5	12,09
6	12,06
7	11,97
8	11,93
9	11,35
10	11,78
11	11,92
12	11,95

Tabela 2. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów z dnia 17.08.2011 r.

nr akumulatora	SEM [V]
1	12,04
2	12,04
3	12,01
4	11,98
5	12,11
6	12,08
7	12,11
8	12,11
9	11,79
10	12,04
11	12,08
12	12,11

Tabela 3. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)

nr akumulatora	SEM [V]
1	12,79
2	12,75
3	12,65
4	12,60
5	12,81
6	12,77
7	12,84
8	12,77
9	12,57
10	12,77
11	12,75
12	12,82

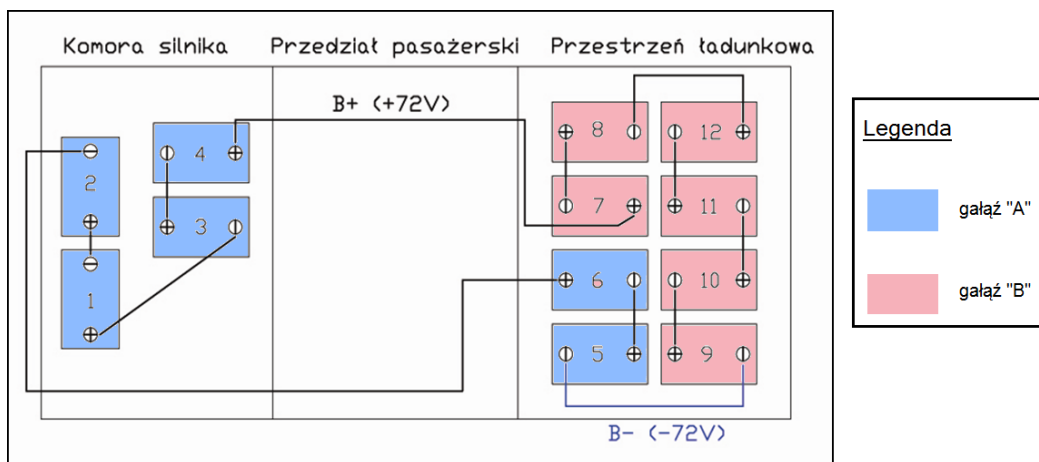
Tabela 4. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów z dnia 25.01.2012 r.

nr akumulatora	SEM [V]
1	12,01
2	11,98
3	11,95
4	11,91
5	12,03
6	12,03
7	12,10
8	12,06
9	11,63
10	12,04
11	12,03
12	12,09

Węzły połączenia równoległego zostały połączone w taki sposób, że nawet w przypadku wyłączenia wyłącznika zapłonu – co było równoznaczne z odłączeniem zasilania silnika elektrycznego – gałęzie równoległe pozostawały ze sobą połączone. Takie rozwiązanie pozwala na samoistne

wyrównanie napięcia oraz jednocześnie umożliwia przepływ prądu pomiędzy gałęziami również w przypadku pozostawienia pojazdu na postoju bez kierowcy czy pasażerów. Podczas rutynowych badań poziomu napięcia odnotowano zróżnicowane poziomy napięć. Przykładowe cztery znajdują się w tabeli 1,2,3 i 4.

Przedstawione wartości są zróżnicowane w sposób przypadkowy, jednak fakt iż sąsiednie akumulatory potrafią mieć raz mniejsze, a raz większe wartości nasunęło pomysł sprawdzenia czy faktycznie różnice są przypadkowe czy też występuje jakaś zależność. W związku z tym, że zarówno pomiary, jak i numery akumulatorów zostały przyporządkowane w kolejności od lewej do prawej i od przodu pojazdu ku tyłowi – jak na rysunku 1 – zdecydowano rozmieścić wyniki pomiarów napięć w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego, które zostały zaprezentowane w tabeli 5,6,7,8, a także zilustrowane w postaci wykresów na rysunkach odpowiednio 2,3,4 i 5.



Rys. 1. Rozmieszczenie akumulatorów trakcyjnych w pojeździe elektrycznym

Tabela 5. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 4.01.2011 r.

węzeł\gałąź:	"A" - SEM [V]	"B" - SEM [V]
-	12,09	11,35
	12,06	11,78
	11,98	11,92
	11,95	11,95
	11,63	11,93
+	11,14	11,97

Tabela 8. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 25.01.2012 r.

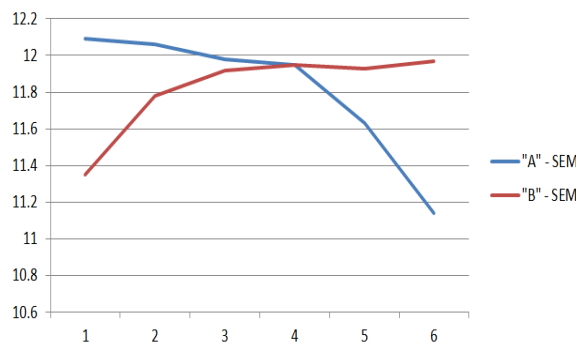
węzeł\gałąź:	"A" - SEM [V]	"B" - SEM [V]
-	12,03	11,63
	12,03	12,04
	11,98	12,03
	12,01	12,09
	11,95	12,06
+	11,91	12,10

Tabela 6. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 17.08.2011 r.

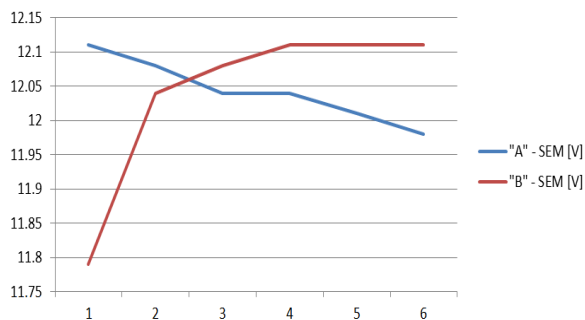
węzeł\gałąź:	"A" - SEM [V]	"B" - SEM [V]
-	12,11	11,79
	12,08	12,04
	12,04	12,08
	12,04	12,11
	12,01	12,11
+	11,98	12,11

Tabela 7. Wykaz napięć poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)

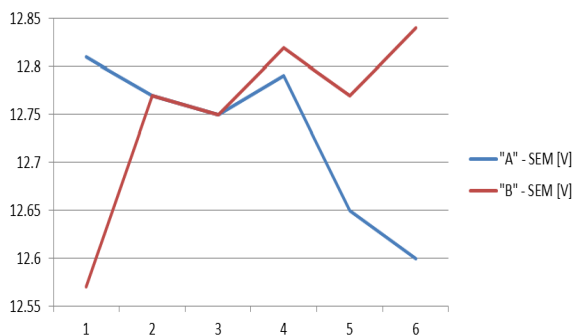
węzeł\gałąź:	"A" - SEM [V]	"B" - SEM [V]
-	12,81	12,57
	12,77	12,77
	12,75	12,75
	12,79	12,82
	12,65	12,77
+	12,60	12,84



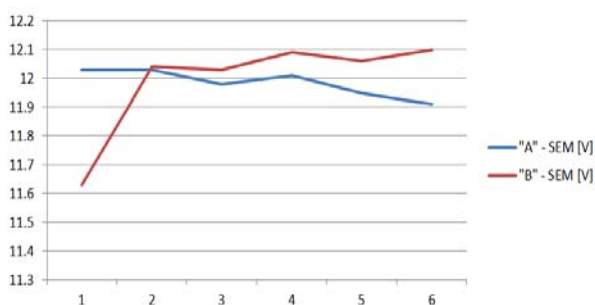
Rys. 2. Wykres napięć akumulatorów uporządkowany w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 4.01.2011 r.



Rys. 3. Wykres napięć akumulatorów uporządkowany w kolejności od wężła ujemnego do wężła dodatniego z dnia 17.08.2011 r.



Rys. 4. Wykres napięć akumulatorów uporządkowany w kolejności od wężła ujemnego do wężła dodatniego z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)



Rys. 5. Wykres napięć akumulatorów uporządkowany w kolejności od wężła ujemnego do wężła dodatniego z dnia 25.01.2012 r.

Na podstawie wyników można zaobserwować, że na jednej z gałęzi występuje charakterystyczna tendencja spadkowa, zaś na drugiej wzrostowa – kształtem zbliżona do wykładniczej. Badania wykonywane były w różnych porach roku. W okresie zimowym pojazd był garażowany (postój w temperaturze pokojowej), lecz próby rozładowania wykonywane były na zewnątrz w temperaturach bliskich zera stopni Celsjusza lub poniżej. Dodatkowo sprawdzona była gęstość elektrolitu dla każdej z cel akumulatorów, w kolejności od bieguna ujemnego do bieguna dodatniego. Wyniki zostały zaprezentowane w tabelach 9,10 oraz zobrazowane w postaci wykresów na rysunkach 6,7. Z przyczyn technicznych gęstość elektrolitu nie została zmierzona w akumulatorach numer 3 i 4.

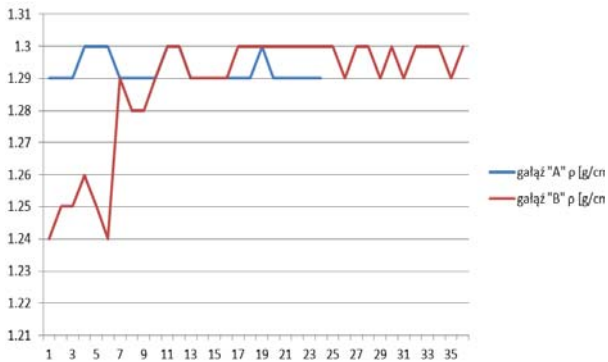
Tabela 9. Wykaz gęstości elektrolitu w poszczególnych celach akumulatorów, w kolejności od bieguna ujemnego do dodatniego oraz w kolejności akumulatorów od wężła ujemnego do wężła dodatniego z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)

nr akumulatora	nr celi	gałąź "A" ρ [g/cm ³]	gałąź "B" ρ [g/cm ³]	nr celi	nr akumulatora
5	1	1,29	1,24	1	9
	2	1,29	1,25	2	
	3	1,29	1,25	3	
	4	1,30	1,26	4	

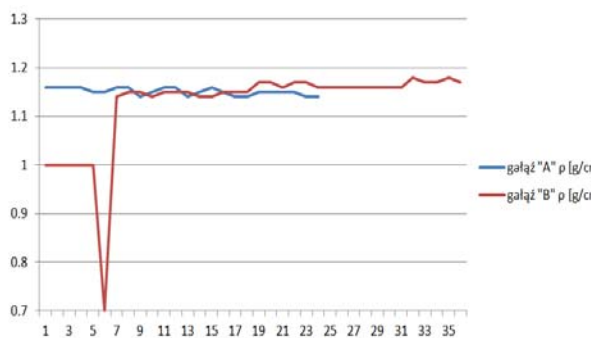
6	5	1,30	1,25	5	10
	6	1,30	1,24	6	
	1	1,29	1,29	1	
	2	1,29	1,28	2	
	3	1,29	1,28	3	
	4	1,29	1,29	4	
2	5	1,30	1,30	5	11
	6	1,30	1,30	6	
	1	1,29	1,29	1	
	2	1,29	1,29	2	
	3	1,29	1,29	3	
	4	1,29	1,29	4	
1	5	1,29	1,30	5	12
	6	1,29	1,30	6	
	1	1,30	1,30	1	
	2	1,29	1,30	2	
	3	1,29	1,30	3	
	4	1,29	1,30	4	
3	5	1,29	1,30	5	8
	6	1,29	1,30	6	
	1	b.d.	1,30	1	
	2	b.d.	1,29	2	
	3	b.d.	1,30	3	
	4	b.d.	1,30	4	
4	5	b.d.	1,29	5	7
	6	b.d.	1,30	6	
	1	b.d.	1,29	1	
	2	b.d.	1,30	2	
	3	b.d.	1,30	3	
	4	b.d.	1,30	4	

Tabela 10. Wykaz gęstości elektrolitu w poszczególnych celach akumulatorów, w kolejności od bieguna ujemnego do dodatniego oraz w kolejności akumulatorów od wężła ujemnego do wężła dodatniego z dnia 25.01.2012 r.

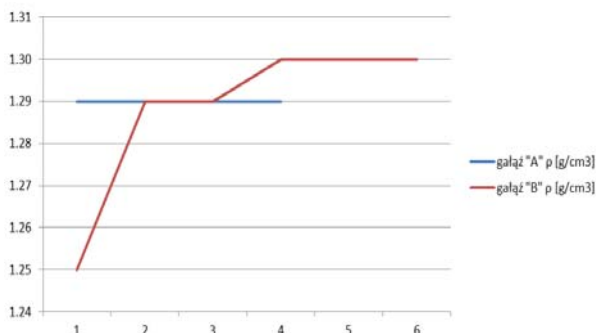
nr akumulatora	nr celi	gałąź "A" ρ [g/cm ³]	gałąź "B" ρ [g/cm ³]	nr celi	nr akumulatora
5	1	1,16	1,00	1	9
	2	1,16	1,00	2	
	3	1,16	1,00	3	
	4	1,16	1,00	4	
	5	1,15	1,00	5	
	6	1,15	0,70	6	
6	1	1,16	1,14	1	10
	2	1,16	1,15	2	
	3	1,14	1,15	3	
	4	1,15	1,14	4	
	5	1,16	1,15	5	
	6	1,16	1,15	6	
2	1	1,14	1,15	1	11
	2	1,15	1,14	2	
	3	1,16	1,14	3	
	4	1,15	1,15	4	
	5	1,14	1,15	5	
	6	1,14	1,15	6	
1	1	1,15	1,17	1	12
	2	1,15	1,17	2	
	3	1,15	1,16	3	
	4	1,15	1,17	4	
	5	1,14	1,17	5	
	6	1,14	1,16	6	
3	1	b.d.	1,16	1	8
	2	b.d.	1,16	2	
	3	b.d.	1,16	3	
	4	b.d.	1,16	4	
	5	b.d.	1,16	5	
	6	b.d.	1,16	6	
4	1	b.d.	1,16	1	7
	2	b.d.	1,180	2	
	3	b.d.	1,170	3	
	4	b.d.	1,170	4	
	5	b.d.	1,180	5	
	6	b.d.	1,170	6	



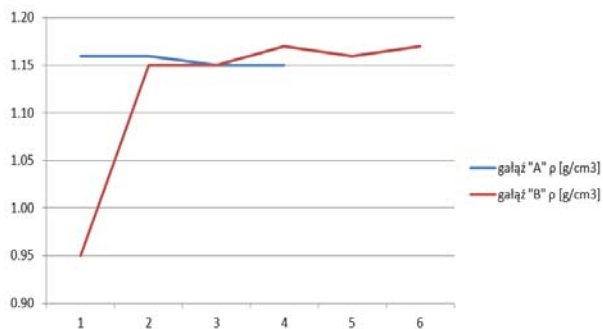
Rys. 6. Wykres gęstości elektrolitu w poszczególnych celach akumulatorów, w kolejności od bieguna ujemnego do dodatniego oraz w kolejności akumulatorów od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)



Rys. 7. Wykres gęstości elektrolitu w poszczególnych celach akumulatorów, w kolejności od bieguna ujemnego do dodatniego oraz w kolejności akumulatorów od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 25.01.2012 r.



Rys. 8. Wykres uśrednionej wartości gęstości elektrolitu dla poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)



Rys. 9. Wykres uśrednionej wartości gęstości elektrolitu dla poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 25.01.2012 r.

Zaprezentowane powyżej wyniki nie są w pełni czytelne, dlatego poniżej prezentowane są wyniki obliczeń wartości średnich gęstości elektrolitu (zaokrąglonych do trzeciego miejsca po przecinku) dla 6 cel każdego z akumulatorów, porządkując je w tym samym porządku, co ostatnie, czyli od węzła ujemnego do węzła dodatniego i przedstawiają je tabela 11, 12 oraz wykres 8, 9.

Tabela 10. Wykaz uśrednionej wartości gęstości elektrolitu dla poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 17.01.2012 r. (po naładowaniu)

gałąź "A" p [g/cm ³]	gałąź "B" p [g/cm ³]
1,29	1,25
1,29	1,29
1,29	1,29
1,29	1,30
b.d.	1,3
b.d.	1,3

Tabela 11. Wykaz uśrednionej wartości gęstości elektrolitu dla poszczególnych akumulatorów, w kolejności od węzła ujemnego do węzła dodatniego z dnia 25.01.2012 r.

gałąź "A" p [g/cm ³]	gałąź "B" p [g/cm ³]
1,16	0,95
1,16	1,15
1,15	1,15
1,15	1,17
b.d.	1,16
b.d.	1,17

Prezentowane powyżej wyniki ujawniają tendencję spadkową gęstości elektrolitu akumulatorów gałęzi „A” oraz wzrostową gałęzi „B” (zarówno w przypadku akumulatorów naładowanych, jak i po ich rozładowaniu), co potwierdza się z tendencjami napięć zaobserwowanych na podstawie poprzednich pomiarów. Należy zauważyć, że zaprezentowano zaledwie kilka wyników pomiarów napięć spośród wykonanych ponad trzydziestu na przestrzeni blisko półtora roku, z których wszystkie wykazywały zbliżone wyniki z powtarzającymi się tendencjami, co zdaje się potwierdzać autentyczność obserwacji dla badanego przykładu pojazdu elektrycznego.

Wnioski

Przedstawione wyniki pomiarów pojazdu elektrycznego z zastosowaniem akumulatorów trakcyjnych, kwasowo-olowiowych bez systemu zarządzania stanem akumulatorów potwierdzają problem nierównomiernego rozładowywania się akumulatorów. Ponadto różnice pomiędzy akumulatorami nie są przypadkowe, lecz wykazują tendencję spadkową wartości pomierzonych napięć i gęstości elektrolitu dla jednej z gałęzi oraz wzrostową dla drugiej. Przedstawione tendencje mogą posłużyć za przykład dla później projektowanych systemów BMS. Ponadto wykazane tendencje wymuszają konieczność okresowego sprawdzenia stanu akumulatorów oraz ewentualną zmianę kolejności akumulatorów celem ich równomiernego rozładowywania i zużycia.

LITERATURA

- [1] Hsieh Yao C., Chou Su P., Moo Chin S., *Balance Discharging for Series-connected Batteries*, 2004 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference, 2697
- [2] Caumont O., Moigne P. Le, Rombaut C., Muneret X., Lenain P., *Energy Gauge for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles*, IEEE TRANS. ENERGY CONVERSION, VOL. 15, NO. 3, SEPTEMBER 2000, 354
- [3] Kutkut N., Wiegman H., Divan D., Novotny D., *Design Considerations for Charge Equalization of an Electric Vehicle Battery System*, IEEE TRANS. INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 35, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 1999, 28
- [4] Wójtowicz S., *Pojazdy elektryczne i sieci Smart Grid*, Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, 41

Autor: Borys Bakun, e-mail: bakunb@gmail.com