

Analiza stanu baterii akumulatorów w niskobudżetowym pojeździe elektrycznym

Streszczenie. Obecnie można obserwować stały wzrost zainteresowania elektromobilnością, w tym pojazdami niskobudżetowymi (np. klasy L2e). W części badawczej artykułu przedstawiono analizę zarejestrowanych napięć poszczególnych akumulatorów w czasie jazdy pojazdu niskobudżetowego. Analizowano wartości chwilowe napięć oraz energię wydawaną przez akumulatory dla dwóch układów zasilania pojazdu. Wyniki poddano analizie statystycznej i dokonano oceny skuteczności działania układu balansowania akumulatorów.

Abstract. Currently, we can observe a steady increase in interest in electromobility, including low-cost vehicles (e.g. L2e class). The research part of the paper presents an analysis of the recorded voltages of individual batteries while driving a low-budget vehicle. The instantaneous values of voltages and the energy spent by the batteries while driving for two power supply systems of the vehicle were analyzed. The results were analyzed statistically and the effectiveness of the battery balancing system was assessed. (**Analysis of the state of batteries in a low-budget electric vehicle**).

Słowa kluczowe: niskobudżetowy pojazd elektryczny, akumulator żelowy, układy zasilania pojazdów, analiza statystyczna.

Keywords: low-budget electric vehicle, gel battery, vehicle power supply systems, statistical analysis.

Wstęp

Publikacje dotyczące akumulatorów w pojazdach elektrycznych są bardzo liczne. W wyszukiwarce popularnego czasopisma naukowego po wprowadzeniu słów kluczowych akumulator i pojazd elektryczny odnajduje się ponad 2 tys. artykułów. Większość z nich dotyczy nowoczesnych akumulatorów i zaawansowanych systemów zarządzania ich pracą oraz ładowania [1, 2]. Spora część artykułów opisuje wpływ pojazdów elektrycznych i akumulatorów na środowisko (np. poprzez ich recykling), możliwości redukcji CO₂ i tematy pokrewne [3], w tym elektromobilność jako zjawiska towarzyszącego transformacji energetycznej [4].

Wszystkie te badania dotyczą problemów ogólnych lub wysoko zaawansowanych technologii. Trudno natomiast odnaleźć analizy dotyczące niskobudżetowych pojazdów elektrycznych, rozumianych jako pojazdy kabinowe jedno- lub wieloosobowe. Cena pojazdu elektrycznego znanej marki przekracza ok. 100 tys. zł, natomiast mały trójkołowy pojazd elektryczny można kupić za ok. 20 tys. zł lub mniej. Pojazdy niskobudżetowe mogą być wykorzystywane jako alternatywa dla pojazdów z silnikiem spalinowym, w tym skuterów, na niewielkich dystansach.

Niskobudżetowe pojazdy elektryczne oferowane są na polskim rynku przez wiele firm. Ich cena waha się od kilkunastu do kilkudziesięciu tys. zł. dla pojazdu dostępnego w Polsce [5]. Natomiast pojazdy dostępne przez sprzedaż wysyłkową, najczęściej z Chin kosztują od 1,5 do 35 tys. zł (bez kosztów transportu i opłat dodatkowych, w tym cła), przy czym cena zależy od liczby zamawianych pojazdów [6]. Pojazdy niskobudżetowe dostępne są w wersjach trój- (rejestrowane jako skutery w klasie L2e) i czterokołowych (rejestrowane jako samochody w klasie L6e lub L7e) [7].

Analizując dane własne autorów oraz dane zamieszczone w ofertach producentów (w tym zdjęcia) i ofertach dystrybutorów części zamiennych [5, 6] stwierdzono, że jako konstrukcja nośna pojazdów stosowana jest zazwyczaj spawana rama z rur stalowych, natomiast poszycie stanowią elementy z tworzyw sztucznych. Do napędzania pojazdów wykorzystywane są układy składające się ze źródła zasilania, falownika umożliwiającego hamowanie odzyskowe i trójfazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Pojazdy napędzane są na tylną oś z wykorzystaniem mostu z mechanizmem różnicowym. Jako źródło zasilania wykorzystywane są baterie akumulatorów złożone z 5 do 10

połączonych szeregowo akumulatorów kwasowo-ołowiowych (żelowych) o napięciu 6 lub 12 V każdy, dające sumaryczne napięcie od 30 do 72 V. Pojemność pojedynczego akumulatora w zależności od modelu waha się od kilku do kilkudziesięciu Ah. Baterie te niewyposażane są w dodatkowe układy nadzoru BMS (z ang.: Battery Management System) lub balansery służące do wyrównywania napięcia na poszczególnych akumulatorach. Do ich ładowania wykorzystywane są mikroprocesorowe ładowarki sieciowe ładujące akumulatory łącznie, tj. napięciem od 30 do 72 V. Czas ładowania sięga 10 godzin.

Do zalet niskobudżetowych pojazdów elektrycznych (w klasie L2e) należy zaliczyć niską cenę, niskie koszty eksploatacji, prostotę obsługi oraz brak konieczności posiadania uprawnień do ich kierowania takich jak prawo jazdy typu B dla kierowców urodzonych przed 1995 rokiem (dla młodszych kierowców wymagane jest prawo jazdy kategorii AM lub wyższej). Wśród wad takich pojazdów można wymienić między innymi: słabą konstrukcję, brak dostępności części zamiennych i ich cenę (przykładowo szyba przednia to koszt ok. 2 tys. zł, a światło przednie wraz z kierunkowskazami to ok. 1,5 tys. zł. według oferty z 2019 r.)

Jako przykład trójkołowego niskobudżetowego pojazdu elektrycznego w dalszej części artykułu opisano ANAIG 95, w sprzedaży oferowany również pod innymi nazwami: ZT-95, Z-TECH, FROST oraz E-MIL TRIO. Na stronach producentów Chińskich pojazd ten oferowany jest przez kilkunastu sprzedawców [6]. Poszczególne pojazdy różnią się w niewielkim stopniu, a kryterium uznania ich za jeden typ było podobieństwo bryły nadwozia. Pojazdy te wyposażane są w silniki o mocy od 1,5 do 4 kW zasilane z baterii akumulatorów o napięciu od 48 do 72 V i pojemności od 15 do 60 Ah. Producenci nie podają szczegółowych informacji dotyczących układu zasilania pojazdu, w tym czy poszczególne modele wyposażane są w układy BMS lub inne układy elektroniczne wspomagające pracę akumulatorów. Z uwagi na homologację w niskich klasach pojazdy te mają wprowadzone ograniczenie prędkości maksymalnej na poziomie od 25 do 45 lub 50 km/h. Deklarowany zasięg to od 30 do 150 km.

Układ badawczy

Badania przeprowadzono na podstawie rejestracji napięć akumulatorów w czasie jazdy pojazdu po terenie niewielkiego sołectwa na terenie Śląska. Rejestracji

dokonano instalując system pomiarowy w dwuosobowym, trójkołowym pojeździe ANAGI klasy L2e [7].

System pomiarowy złożony był z sześciu izolowanych torów pomiarowych wykorzystujących wzmacniacze separacyjne ISO124 firmy Texas Instruments, pracujące w układzie zalecanym przez producenta w karcie katalogowej [8] służącym do niezależnego pomiaru każdego z napięć. Dane pomiarowe gromadzone były przez mikrokontroler Atmega128 i zapisywane na karcie pamięci z częstotliwością 1 Hz. Z uwagi na stosunkowo długi interwał czasowy pomiędzy zapisem poszczególnych pomiarów, zaniedbano opóźnienie wynikające z multipleksowania sześciu kanałów pomiarowych mikrokontrolera.

Badania przeprowadzono dla dwóch układów zasilania pojazdu. Po pierwsze rejestrowano napięcia poszczególnych akumulatorów w czasie jazdy w układzie fabrycznym, w którym do zasilania silnika wykorzystano sześć szeregowo połączonych 12. woltowych akumulatorów żelowych ładowanych łącznie. W drugim przypadku układ zasilania uzupełniono o aktywny balanser [9, 10] wyrównujący napięcia na poszczególnych akumulatorach, o prądzie wyrównywania równym 20 A.

Pojazd wykorzystany w badaniach zasilany był baterią akumulatorów (o łącznym napięciu 72 V), w której jeden z akumulatorów wykazywał znaczną degradację skutkującą szybką utratą pojemności i obniżaniem się napięcia na jego zaciskach. Pozostałe pięć akumulatorów nie wykazywały znacznej degradacji. Analizowany pojazd fabrycznie wyposażony jest w układ określający stan naładowania baterii powiązany z przewidywanym zasięgiem, który przy pełnym naładowaniu deklarowany jest przez producenta na poziomie 30 km. Zainstalowany w pojeździe układ kontroli naładowania baterii bazuje na pomiarze łącznego napięcia wszystkich akumulatorów. Należy przy tym podkreślić, że szacowanie poziomu naładowania akumulatora na podstawie napięcia nie jest zalecane, ponieważ stan naładowania akumulatora jest zależny od wielu czynników [11, 12]. W konsekwencji układ sterowania i kontroli nie jest w stanie wykryć uszkodzenia pojedynczego akumulatora. Degradacja jednego akumulatora skutkuje jedynie szybszym spadkiem poziomu naładowania, obserwowanym na wskaźniku zainstalowanym w kabinie pojazdu. Przyjmując, że proces ładowania kończy się przy napięciu 13,2 V (napięcie do jakiego akumulatory ładuje zainstalowana w pojeździe ładowarka). Spadek napięcia na jednym z akumulatorów do wartości 10 V (tj. napięcie mogące skutkować trwałym uszkodzeniem akumulatora) przy obniżeniu napięcia na pozostałych akumulatorach do poziomu 12,5 V, interpretowany jest przez system kontroli, jako rozładowanie całej baterii do połowy pojemności.

W badaniach wykorzystano 161 rejestracji dla układu bez balansera oraz 146 dla układu z zainstalowanym balanserem. Wszystkie rejestracje wykonano w czasie jazdy pojazdu po drogach lokalnych przy obciążeniu kierowcą i w części przypadków pasażerem lub niewielkim ładunkiem. Różnice poziomu terenu, na którym przeprowadzono pomiary nie przekraczały 15 m. Czas pojedynczej rejestracji (tj. czas od chwili uruchomienia pojazdu do jego zatrzymania i wyłączenia zasilania) wynosił od 51 do 667 s, dla pierwszego układu oraz od 110 do 731 s, dla układu drugiego z balanserem. Krótkie rejestracje realizowane były na odcinkach o długości do 500 m, natomiast najdłuższe rejestracje zrealizowane na odcinku o długości około 2500 m.

Analiza napięć chwilowych

W pierwszej kolejności przeanalizowano wartość napięcia początkowego akumulatorów (tj. napięcia zarejestrowanego, jako pierwsze po włączeniu systemu

rejestracji), przy czym napięcie to nie zawsze było napięciem, do jakiego naładowano akumulatory, ponieważ część zarejestrowanych przejazdów odbywało się jeden po drugim bez ładowania. W tych przypadkach napięcie początkowe wynikało z poziomu naładowania do jakiego rozładowały się akumulatory w czasie wcześniejszego przejazdu oraz czasu przerwy pomiędzy poszczególnymi przejazdami, wynoszącego od kilku minut do pojedynczych godzin. Uzyskane dane, dla obu badanych przypadków, poddano analizie statystycznej, a jej wyniki dla poszczególnych akumulatorów przedstawiono w tabelach 1 i 2 zawierających wyznaczone wskaźniki statystyczne: średnią arytmetyczną U_{AV} , medianę U_M , dominantę U_D , wartość maksymalną i minimalną U_{max} i U_{min} , odchylenie standardowe σ oraz rozstęp percentylowy U_{90} definiowany, jako różnica między 5 a 95 percentylem (3), czyli rozstęp po odrzuceniu 10% skrajnych wyników [13].

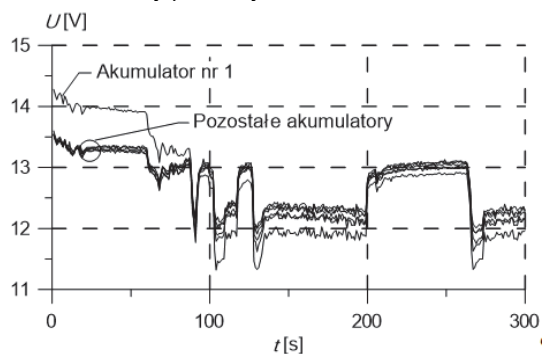
Tabela 1. Miary tendencji centralnej napięcia początkowego akumulatorów od 1 do 6, (a) układ bez balansera, (b) układ z balanserem

		1	2	3	4	5	6
U_{AV}	a	12,55	12,76	12,82	12,76	12,86	12,83
	b	12,51	12,66	12,73	12,71	12,79	12,76
U_M	a	12,61	12,83	12,88	12,82	12,90	12,90
	b	12,60	12,73	12,79	12,77	12,83	12,82
U_D	a	12,68	12,89	12,88	12,91	13,05	12,96
	b	12,68	12,74	12,80	12,73	12,90	12,80

Tabela 2. Miary rozproszenia napięcia początkowego akumulatorów od 1 do 6, (a) układ bez balansera, (b) układ z balanserem

		1	2	3	4	5	6
U_{max}	a	14,28	13,54	13,55	13,53	13,60	13,53
	b	13,14	13,11	13,17	13,11	13,21	13,19
U_{min}	a	10,24	11,34	11,50	11,32	11,62	11,47
	b	10,62	11,13	11,42	11,50	11,58	11,44
σ	a	1,177	0,917	0,917	0,913	0,894	0,911
	b	1,068	0,878	0,790	0,752	0,710	0,730
U_{90}	a	0,513	0,336	0,308	0,321	0,300	0,310
	b	0,405	0,333	0,287	0,270	0,264	0,265

Drugim etapem badań była analiza napięć poszczególnych akumulatorów zarejestrowanych w czasie jazdy. Przykładowe przebiegi napięć poszczególnych akumulatorów przedstawiono na rysunku 1, przy czym na rysunku wyróżniono przebieg napięcia tylko akumulatora wykazującego największe jego zmiany (akumulatora zdegradowanego), ponieważ napięcia pozostałych pięciu akumulatorów miały porównywalne wartości.



Rys. 1. Przykładowy przebieg napięć akumulatorów w czasie jazdy

Z uwagi na stany nieustalone związane z przyspieszaniem i hamowaniem bezpośrednie porównanie przebiegów napięć dla różnych przejazdów nie jest możliwe. W związku z tym wszystkie zarejestrowane wartości napięcia dla danego przejazdu posortowano od wartości największej do najmniejszej. Uzyskane w ten sposób przebiegi napięć sześciu akumulatorów poddano

analizie statystycznej wyznaczając wartości skrajne U_{\max} i U_{\min} , średnie U_{AV} i percentylowe $U_{5\%}$ i $U_{95\%}$ (wyznaczone przez rozstęp percentykowy po odrzuceniu 10% skrajnych wartości, po 5% z każdej strony) dla każdej i -tej chwili czasu [13], zgodnie z zależnościami:

$$(1) \quad \begin{aligned} U_{\max_i} &= \max[U_{1_i} \dots U_{n_i}] \\ U_{\min_i} &= \min[U_{1_i} \dots U_{n_i}] \end{aligned}$$

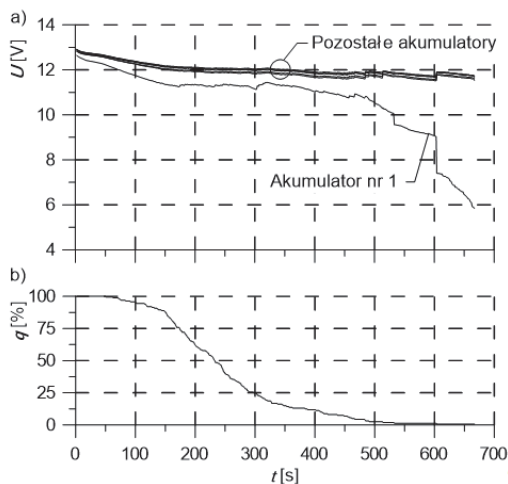
$$(2) \quad U_{AV_i} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k U_{j_i}$$

$$(3) \quad U_{\alpha_i} = \text{percentile}_{\alpha}[U_{1_i} \dots U_{n_i}]$$

Dla porównania na rysunkach 2a i 3a przedstawiono wartości średnie napięć poszczególnych akumulatorów zarejestrowane w czasie jazdy badanego pojazdu. Ponieważ każdy przejazd pojazdu miał inny czas trwania, dla każdej analizowanej chwili czasu może występować różna liczba zarejestrowanych wartości napięć, tzn. po posortowaniu wartości zarejestrowanych napięć, dla chwili czasu $t = 0$ liczba analizowanych wartości napięć równa jest liczbie przejazdów (161 dla rysunku 2 oraz 146 dla rysunku 3) natomiast dla ostatniej chwili czasu (dla rysunku 2 $t = 667$ s i dla rysunku 3 $t = 731$ s) zarejestrowano tylko jedną wartość napięcia dla każdego akumulatora (tzn. sześć wartości napięć). W związku z tym wiarygodność uzyskanych wyników analizy statystycznej maleje wraz ze wzrostem czasu analizy, ponieważ maleje liczebność próby. Jako miarę tej wiarygodności przyjęto współczynnik odpowiadający względnej liczebności próby dla danej chwili czasu, wyrażony wzorem:

$$(4) \quad q_i = \frac{n_i}{N} 100\%$$

gdzie: q_i – współczynnik wiarygodności, n_i – liczba zarejestrowanych wartości napięcia dla i -tej chwili czasu, N – liczba przejazdów równa maksymalnej liczbie zarejestrowanych wartości napięć.

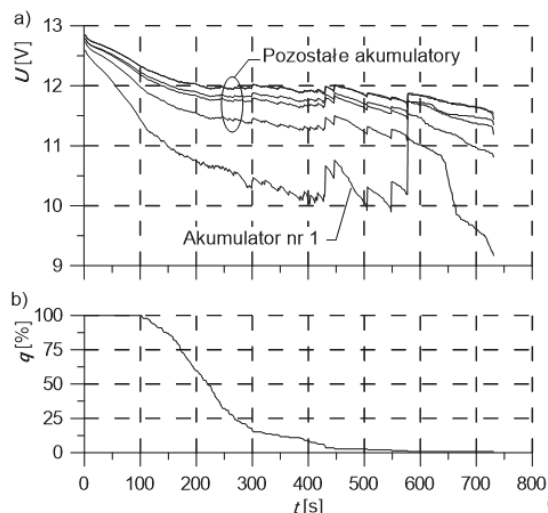


Rys.2. Wartości średnie napięć poszczególnych akumulatorów zarejestrowane w czasie jazdy analizowanego pojazdu (a) oraz odpowiadający im przebieg współczynnika wiarygodności (b) dla układu bez balansera

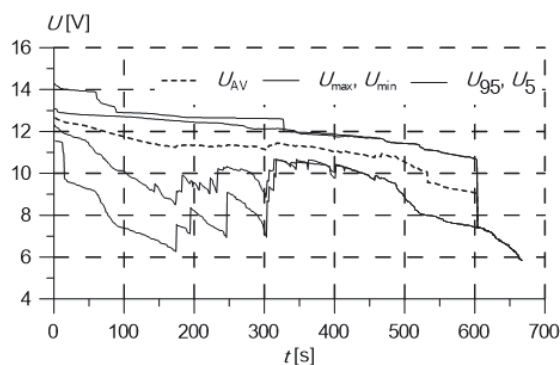
Przebieg współczynnika wiarygodności dla obu przypadków przedstawiono na rysunku 2b i 3b.

Na podstawie zarejestrowanych wartości napięć (rys. 2a i 3a) można stwierdzić, że napięcie uszkodzonego akumulatora nr 1 zdecydowanie odbiega od pozostałych, natomiast akumulatory od 2 do 6 mają zbliżone średnie wartości napięć. Tendencja ta dotyczy pozostałych

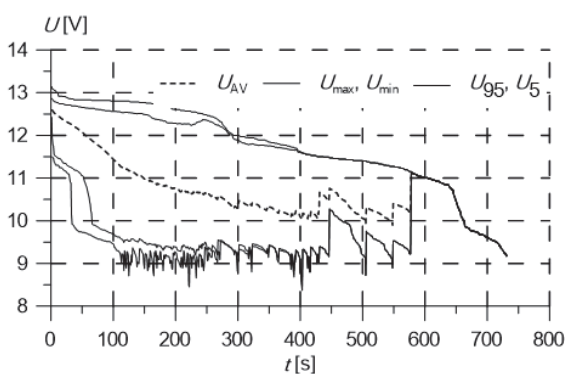
analizowanych miar statystycznych. W związku z tym, dla zwiększenia przejrzystości rysunków, w dalszej części artykułu analizowano napięcia akumulatorów nr 1 i 2.



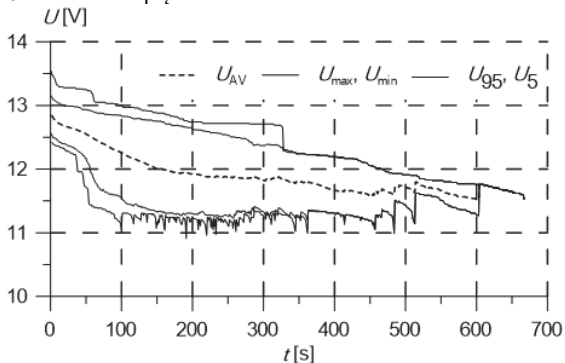
Rys.3. Wartości średnie napięć poszczególnych akumulatorów zarejestrowane w czasie jazdy analizowanego pojazdu (a) oraz odpowiadający im przebieg współczynnika wiarygodności (b) dla układu z zainstalowanym balanserem



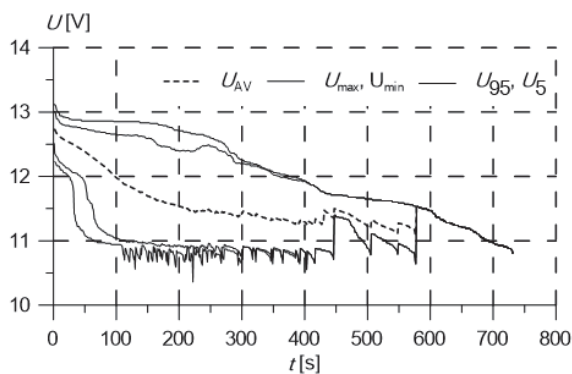
Rys.4. Wartości napięć akumulatora nr 1 dla układu bez balansera



Rys.5. Wartości napięć akumulatora nr 1 dla układu z balanserem



Rys.6. Wartości napięć akumulatora nr 2 dla układu bez balansera



Rys.7. Wartości napięć akumulatora nr 2 dla układu z balanserem

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono porównanie wartości napięć (wg zależności od 1 do 3) zarejestrowanych w czasie jazdy dla akumulatora nr 1 w układzie bez i z zainstalowanym balanserem. Takie samo porównanie dla akumulatora nr 2 przedstawiają rysunki 6 i 7.

Analiza energii

Ważnym czynnikiem wpływającym między innymi na zasięg pojazdu elektrycznego jest wartość energii pobieranej z akumulatora. Biorąc pod uwagę fakt, że bateria akumulatorów złożona jest z kilku sztuk, poprawna praca baterii zajdzie, gdy wszystkie akumulatory będą rozładowywane w podobnym stopniu. Zakładając, że stan początkowy akumulatorów (tj. po ich naładowaniu) jest taki sam, sytuacja powyższa ma miejsce, gdy każdy z akumulatorów będzie wydawał podobną energię w czasie jazdy pojazdu. W związku z tym, w drugim etapie analizy porównano wartości energii wydawanej przez poszczególne akumulatory. Energię wydawaną wyrażono wzorem:

$$(5) \quad E_i = U_i \cdot I_i \cdot \Delta t$$

gdzie: E_i – energia wydawana przez akumulator w i -tej chwili czasu, I_i – prąd pobierany z baterii akumulatorów, Δt – interwał czasowy pomiędzy próbkami równy 1 s.

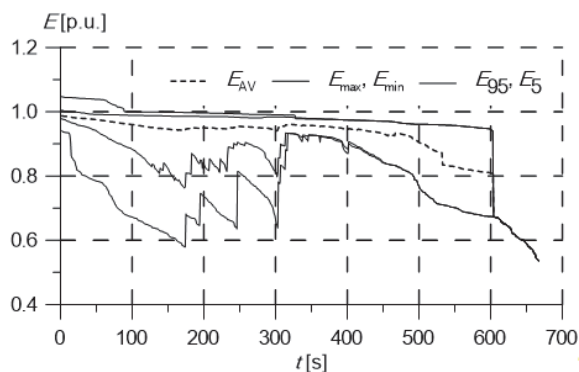
Dla ułatwienia porównań wartości energii wydawanej przez akumulatory wyrażono w wartościach względnych, przy czym jako wartość odniesienia przyjęto energię, jaka byłaby wydawana przez jeden akumulator w sytuacji, gdy wszystkie akumulatory rozładowywałyby się tak samo. Wartość energii odniesienia wynosi:

$$(6) \quad E_{odni} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k U_{j_i} \cdot I_i \cdot \Delta t$$

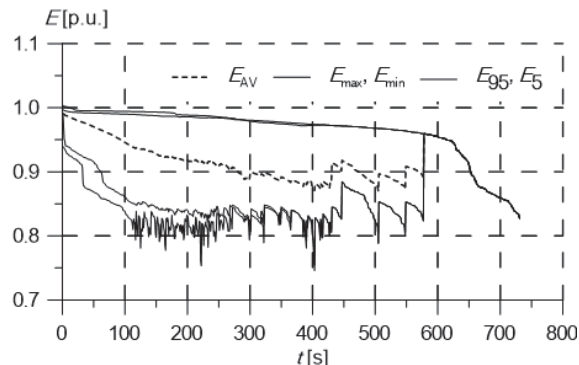
gdzie: E_{odni} – energia odniesienia w i -tej chwili czasu, U_{j_i} – napięcie j -tego akumulatora w i -tej chwili czasu, k – liczba akumulatorów zainstalowanych w baterii akumulatorów ($k = 6$).

Podobnie jak dla analizy napięć chwilowych, również w odniesieniu do analizy energii wydawanej z akumulatorów posortowano wartości od największej do najmniejszej i poddano je analizie statystycznej wyznaczając wartości skrajne, średnie i percentylowe. Wyznaczone wartości statystyczne energii wydawanej z akumulatorów zachowują własności napięć chwilowych, tj. energie wydawane przez akumulatory od 2 do 6 są do siebie zbliżone, w związku z tym wyniki zaprezentowano tylko dla akumulatora 1 i 2.

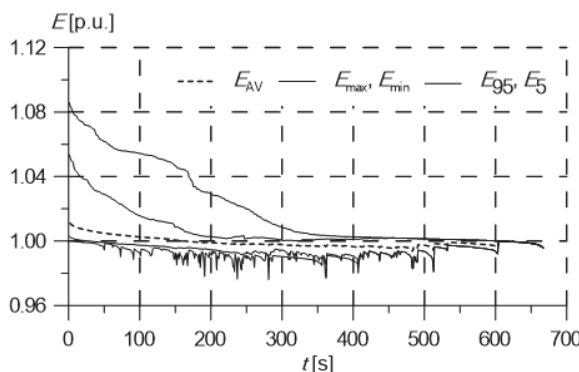
Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach od 8 do 11. Rysunki 8 i 9 przedstawiają porównanie wartości energii zarejestrowanych w czasie jazdy dla akumulatora nr 1, a rysunki 10 i 11 prezentują wyniki dla akumulatora nr 2. Na rysunkach przedstawiono wyniki dla układu bez i z zainstalowanym balanserem.



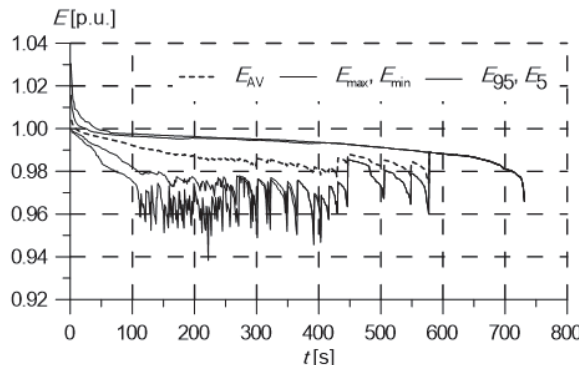
Rys.8. Wartości energii wydawanej przez akumulator nr 1 dla układu bez balansera



Rys.9. Wartości energii wydawanej przez akumulator nr 1 dla układu z balanserem



Rys.10. Wartości energii wydawanej przez akumulator nr 2 dla układu bez balansera



Rys.11. Wartości energii wydawanej przez akumulator nr 2 dla układu z balanserem

Analiza wyników i wnioski

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że:

- miary tendencji centralnej napięcia początkowego (tab. 1) dla wszystkich akumulatorów (w tym uszkodzonego akumulatora nr 1, różnią się od siebie nie więcej niż 0,37 V. Tendencja ta nie ulega zmianie również po zainstalowaniu balansera.

- Miary rozproszenia napięcia początkowego (tab. 2) ulegają zmianie po zainstalowaniu balansera. Przykładowo różniąc pomiędzy maksymalnymi wartościami napięć początkowych poszczególnych akumulatorów dla układu bez balansera wynosiła 0,75 V a po jego zainstalowaniu spadła do 0,1 V, co świadczy o skuteczności jego działania. Podobną tendencję można również zauważyć dla wartości minimalnej napięcia początkowego, w tym przypadku różnica pomiędzy poszczególnymi akumulatorami z 1,38 V, dla układu bez balansera spadła do 0,96 V dla układu z balanserem.
- Instalacja balansera zmniejsza wartość odchylenia standardowego napięcia początkowego (tab. 2) dla wszystkich akumulatorów przy jednoczesnym mniejszym lub większym zmniejszeniu wartości rozstępu procentowego (przykładowo dla akumulatora nr 1 odchylenie standardowe zmniejsza się aż o 21% przy zmniejszeniu rozstępu o 9%, natomiast dla akumulatora nr 6 odchylenie standardowe maleje o 15% a rozstęp o 21%). Świadczy to o wpływie balansera na zwężenie rozkładów wartości napięć początkowych przy jednoczesnej eliminacji przypadków skrajnych, co potwierdza skuteczność wyrównywania wartości napięć poszczególnych akumulatorów.
- Po zainstalowaniu balansera maksymalne napięcie w czasie jazdy pojazdu dla uszkodzonego akumulatora nr 1 nie przekracza 13 V podczas gdy bez balansera sięgało ponad 14 V (por. rys. 3). Ponadto balanser skutecznie eliminuje przypadki, w których uszkodzony akumulator rozładowuje się do napięć skutkujących dalszą degradacją, tj. bez balansera akumulator - w skrajnych przypadkach – rozładowywał się do napięcia nieco powyżej 6 V a po jego wprowadzeniu napięcie nie spadało poniżej 8,5 V. Dodatkowo wartość średnia napięć chwilowych w czasie jazdy akumulatora nr 1 po wprowadzeniu balansera uległa zmianie. Przed jego instalacją zmieniała się w przedziale od 12,7 V do 9 V a po jego zainstalowaniu od 12,65 V do 9,9 V.
- Instalacja balansera wpływa, lecz w nieznacznym stopniu, na wartości chwilowe napięć pozostałych akumulatorów (por. rys. 4).
- Energia (wyrażona w wartościach względnych) wydawana przez akumulator uszkodzony w układzie bez balansera wykazuje znaczną zmienność, tj. od 1 aż do wartości 0,6 (por. rys. 5a). Po wprowadzeniu balansera zmienność ta ulega znacznemu zmniejszeniu (rys. 5b), przy jednoczesnej eliminacji wartości skrajnych, o czym świadczy zbliżenie się wartości maksymalnej i minimalnej odpowiednio do wartości percentyla 95 i 5.
- Zmniejszenie zmienności energii wydawanej w czasie jazdy można zauważyć również dla akumulatora nr 2 (por. rys. 6a i b).

W związku z powyższym można wyciągnąć następujące wnioski ogólne:

- zastosowanie balansera statystycznie nie zmienia napięć początkowych poszczególnych akumulatorów,
- aktywny balanser skutecznie wyrównuje wartości napięć na poszczególnych akumulatorach, a ponadto eliminuje przypadki rozładowania uszkodzonego akumulatora do napięć powodujących dalszą jego degradację,
- ograniczenie przypadków głębokiego rozładowania akumulatora uszkodzonego przez działanie balansera nie pogarsza warunków pracy pozostałych akumulatorów,
- zastosowanie balansera w znaczącym stopniu wyrównuje wartości energii wydawanej przez poszczególne akumulatory, łącznie z akumulatorem uszkodzonym, co wpływa korzystnie na całą baterię

akumulatorów pozwalając na równomierne rozładowanie poszczególnych akumulatorów, oczywiście przy założeniu, że pozostałe parametry decydujące o poziomie naładowania będą miały zbliżoną wartość [11, 12].

Reasumując, zastosowanie stosunkowo prostego i niezbyt drogiego urządzenia jakim jest balanser aktywny, zdecydowanie poprawia warunki pracy baterii akumulatorów w niskobudżetowym pojeździe elektrycznym. W konsekwencji można przypuszczać, że zostanie przedłużony cykl życia akumulatorów tym samym obniżając koszty eksploatacji pojazdu. Warto podkreślić, że problem degradacji akumulatorów staje się coraz bardziej znaczący w kontekście stale rosnącej presji na rozwój elektromobilności uznanej za jeden z ważniejszych priorytetów transformacji energetycznej. Z uwagi na atrakcyjność cenową, można ponadto przewidywać na rynku stale rosnący udział niskobudżetowych pojazdów elektrycznych. W konsekwencji wady tych pojazdów wynikające np. z braku odpowiednich układów zabezpieczających baterie akumulatorów (np. takich jak balansery) mogą stać się znaczącymi i wartymi dalszej pogłębionej analizy.

Autorzy: dr hab. inż. Adrian Nocoń, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: adrian.nocoon@polsl.pl; Tomasz Kurek, student, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: tomakur706@student.polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Khaligh A., Li Z., Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, July 2010, DOI: 10.1109/TVT.2010.2047877, 2806-2814
- [2] Aydin E., Aydemir M.T., Aksoz A., El Baghdadi M., Hegazy O., Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Applications: A Comprehensive Review, *Energies* 2022, 15, 4962, DOI: 10.3390/en15144962
- [3] Fazeli A., Stadie M., Kerner M., Burger A., Nagaoka H., Kramis M., Orloff J., Jomrich F., A Proof of Concept for the Application of Second-Life Electric Vehicle Batteries as A Stationary Energy Storage System, *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2021, DOI: 10.1109/EPEC52095.2021.9621442, 14-19
- [4] L'Heureux A.; Grolinger, K.; Capretz, M.A.M., Transformer-Based Model for Electrical Load Forecasting. *Energies* 2022, 15, 4993, DOI: 10.3390/en15144993
- [5] Portale aukcyjne: Allegro (<https://allegro.pl/>), OLX (<https://www.olx.pl/>), Otomoto (<https://www.otomoto.pl/>)
- [6] Portale aukcyjne: Alibaba (<https://www.alibaba.com/>), AliExpress (<https://best.aliexpress.com/>)
- [7] Prawo o ruchu drogowym, tekst jednolity, Dz. U. 2022 poz. 988
- [8] Karta katalogowa wzmacniacza izolowanego ISO124, SBOS074E –september 1997–revised june 2018
- [9] Daowd M., Omar N., Van Den Bossche P., Van Mierlo J., Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043010, 1-7
- [10] Sun C-C., Chou C-H., Lin Y-L., Huang Y-H., A Cost-Effective Passive/Active Hybrid Equalizer Circuit Design, *Energies*, 2022; 15(6):2000, DOI: 10.3390/en15062000
- [11] Kasprzyk L., Bednarek K., Burzyński D., Symulacja pracy akumulatorów kwasowo-ołowiowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 12, DOI: 10.15199/48.2016.12.16, 61-64
- [12] Moćko W., Szymańska M., Wojciechowski A., Opracowanie i kalibracja modelu matematycznego akumulatorów trakcyjnych przeznaczonych do samochodu elektrycznego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 2/2013 (99), 25-30
- [13] Nocoń A., The use of modified Monte Carlo simulation for the analysis of transient states of the industrial power network, *International Symposium on Electrical Machines SME 2018*, DOI: 10.1109/ISEM.2018.8442562, 1-6