



# Koszty magazynowania energii w rzeczywistych zasobnikach

Opracował Park Naukowo-Technologiczny Euro-Centrum

## Wprowadzenie

Samochód elektryczny, a właściwie zasobnik akumulatorowy samochodu elektrycznego, (z definicji) umożliwia oddawanie energii elektrycznej do sieci zasilającej. W pewnych warunkach zasobnika taki może być źródłem zasilania dla instalacji elektrycznej budynku (po wprowadzeniu odpowiednich zabezpieczeń oraz kontroli mocy podłączonych odbiorów). Takie rozwiązanie nie jest fikcją naukową, a rzeczywistością. W 2013r. Nissan zaproponował możliwość zasilania budynku biurowego ze swoich samochodów elektrycznych (model Leaf). Jest to recepta dla sieci, w których często zdarzają się awarie zasilania. Jest to także metoda na obrót energią elektryczną – sprzedaż energii elektrycznej w szczycie zapotrzebowania, kiedy energia jest droższa. W aspekcie energetyki prosumenckiej (największy potencjał) jest to zasobnik (bufor) dla nieprzewidywalnych źródeł odnawialnych. W kontekście wykorzystania zasobnika akumulatorowego podłączonego do sieci niezbędne jest określenie ceny magazynowania energii (w której skład wchodzi trwałość akumulatorów i sprawność procesu ładowanie-wyładowanie).

### 1. Parametry energetyczne akumulatorów kwasowo-ołowiowych wykonanych w technologii AGM VRLA oraz litowo-jonowych (litowo-polimerowych).

Akumulatory kwasowo-ołowiowe nadal posiadają najkorzystniejszy stosunek pojemności (nominalnej) do ceny. Technologia akumulatorów szczelnych AGM VRLA jest bezpieczna (nie występuje emisja wodoru, w przypadku pęknięcia obudowy elektrolit nie wycieknie) i wygodna do stosowania (akumulatory mogą pracować w każdym ułożeniu) jako baterie stacjonarne oraz jako źródło energii dla samochodów elektrycznych. W celu wyznaczenia parametrów energetycznych akumulatorów AGM VRLA i kosztów magazynowania energii przeprowadzono serie badań wyładowania różnymi wartościami prądu akumulatora o parametrach (SSB SBL 100-12i): [1]

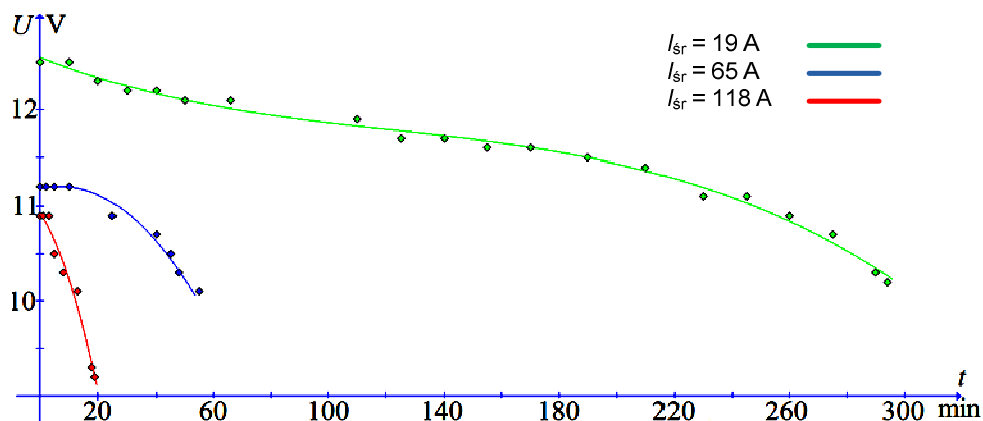
- pojemność znamionowa C<sub>20</sub> - 100 Ah,
- napięcie znamionowe - 12 V.

Pojęcia definiujące parametry akumulatorów:

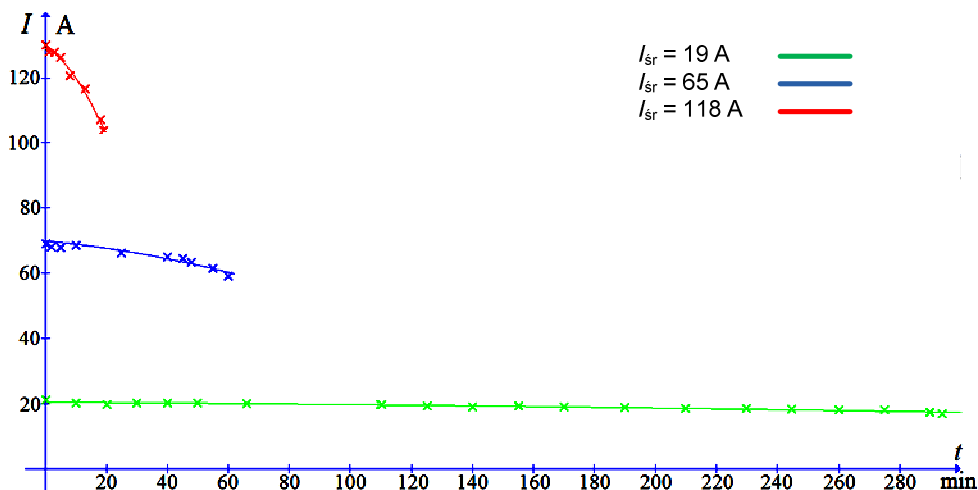
- Pojemność znamionowa C<sub>n</sub> (lub C<sub>20</sub> w przypadku pojemności dla prądu znamionowego dwudziestogodzinnego) - wyrażona w Ah pojemność akumulatora dostępna dla szczególnych warunków wyładowania przy prądzie znamionowym. Dla akumulatorów kwasowo-ołowiowych SSB SBL jest to prąd dwudziestogodzinny.
- Stopień naładowania akumulatora SOC (ang. state of charge) - stosunek pojemności pobranej przez obciążenie do pojemności znamionowej  $SOC = 1 - \frac{C_e}{C_n}$ . Wartość wskaźnika SOC zawarta jest w przedziale <0,1>.
- Głębokość naładowania akumulatora DOC (ang. deph of charge) - stosunek pojemności przy określonym prądzie wyładowania do pojemności znamionowej  $DOC = 1 - \frac{C_e}{C(I,t)}$ . Wartość wskaźnika SOC zawarta jest w przedziale <0,1>.

- Głębokość rozładowania akumulatora DOD (ang. depth of discharge) - stosunek pojemności przy określonym prądzie wyładowania do pojemności znamionowej  $DOD = \frac{C_e}{C(I,t)}$ . Wartość wskaźnika SOC zawarta jest w przedziale  $\langle 0,1 \rangle$ .
- Czas ładowania lub wyładowania - zależność czasowa pomiędzy prądem ładowania lub wyładowania do pojemności znamionowej, np. dla akumulatora SSB SBL 100-12i o pojemności 100 Ah czas wyładowania 30 min odpowiada prądowi o wartości 100 A.
- Sprawność - stosunek ładunku (w Ah lub Wh) pobranego z akumulatora do ładunku potrzebnego do uzyskania początkowego (przed rozpoczęciem cyklu wyładowania) stanu naładowania akumulatora. Sprawność akumulatora jest zależna od zakresu SOC w jakim akumulator pracuje oraz od prądu wyładowania i ładowania.
- Trwałość - liczba cykli ładowania/wyładowania akumulatora po których pojemność akumulatora zmniejszy się trwale o 20%.

Przebieg napięcia za zaciskach akumulatora dla badanych prądów obciążenia przedstawiono na rysunku 1.1, a na rysunku 1.2 pokazano przebiegi zmian prądu wyładowania.



Rys. 1.1 Przebiegi napięć podczas wyładowania akumulatora SSB SBL 100-12i. [opracowanie własne]



Rys. 1.2 Przebiegi prądów podczas wyładowania akumulatora SB 100-12 przy obciążeniu  $I = 20, 60, 120$  A. [opracowanie własne]

W tabeli 1.1 przedstawiono rzeczywiste parametry energetyczne ogniwa SSB SBL 100-12i zmierzone podczas badań.

Tabela 1.1. Rzeczywiste zmierzone parametry akumulatora kwasowo-ołowiowego SSB SBL 100-12i.

	Średni prąd wyładowania [A]		
	19	65	118
Pojemność [Ah]	92	59	37
Dostępna energia [kWh]	1,04	0,63	0,38

Parametry energetyczne akumulatorów VRLA AGM wyznaczono, przy założeniu stałej temperatury elektrolitu  $25^{\circ}\text{C}$ , z zależności przedstawionych poniżej. Pojemność znamionową badanych ogniw kwasowo-ołowiowych AGM VRLA producent definiuje dla prądu wyładowania dwudziestogodzinnego. W celach porównawczych wprowadzono wskaźnik wykorzystania energii akumulatora:

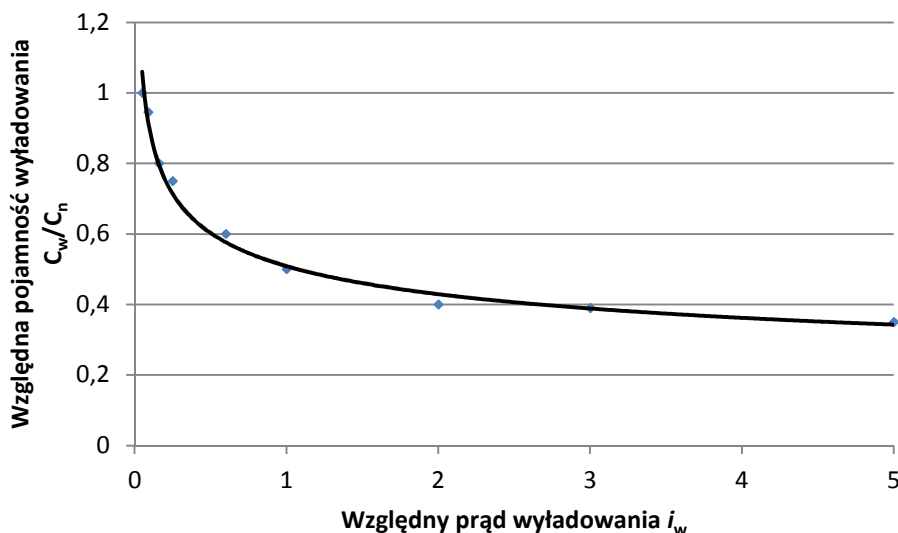
$$k_q = \frac{E_w(I_w)}{E_n} \quad (1)$$

gdzie:  $E_w$  – dostępna energia zależna od prądu wyładowania  
 $E_n$  – dostępna energia przy prądzie znamionowym

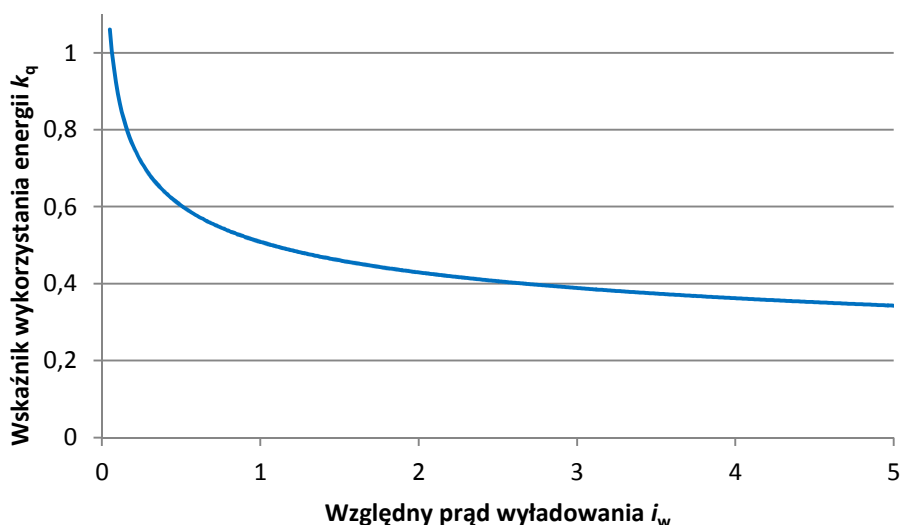
W tabeli 1.2 zamieszczono wyznaczone parametry ogniw kwasowo-ołowiowych AGM VRLA. Na rysunkach 1.3 - 1.5 przedstawiono wyznaczone charakterystyki energetyczne analizowanego typu akumulatorów.

Tabela 1.2. Obliczone parametry energetyczne ogniw kwasowo-ołowiowych AGM VRLA.

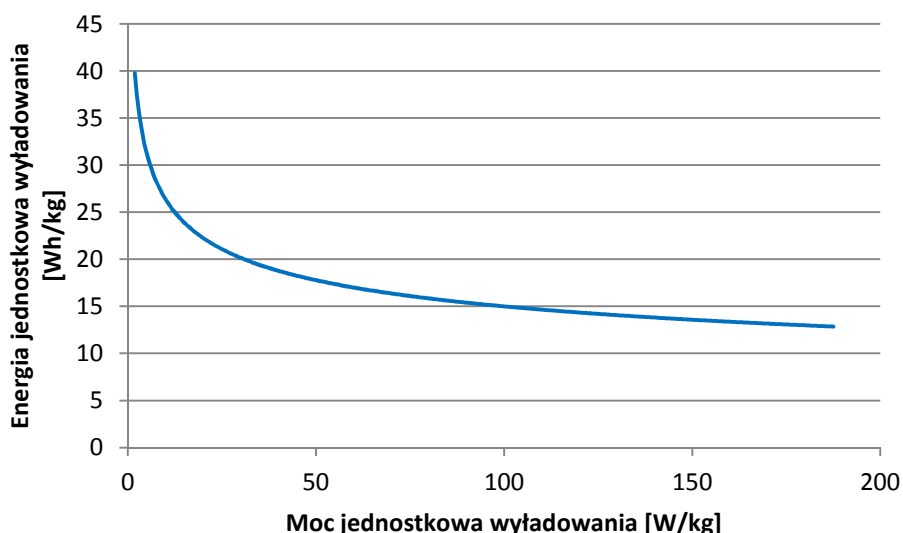
$t_w$	$i_w$	$U_{wAV}$	$C_w/C_n$	$p_{wAV}$	$q_{en}$	$k_q$	$\eta_{en}$
	-	V	-	W/kg	Wh/kg	-	-
20 h	0,05	11,85	1,00	1,9	37	1	0,697
10 h	0,09	11,84	0,95	3,33	35	0,94	0,697
5 h	0,16	11,76	0,80	5,88	29,4	0,79	0,692
3 h	0,24	11,51	0,75	9	27	0,73	0,677
1 h	0,62	11,46	0,60	21,5	21,5	0,58	0,675
30 min	1,00	11,22	0,5	35,1	17,5	0,47	0,661
12 min	2,00	11,19	0,4	70	14	0,38	0,659
8 min	3,00	11,05	0,39	103,6	13,5	0,36	0,652
4 min	5,00	10,9	0,35	170,3	11,9	0,32	0,64



Rys. 1.3. Charakterystyka względnej pojemności wyładowania akumulatorów SSB typu SBL wykonanych w technologii VRLA AGM w funkcji względnego prądu wyładowania. [opracowanie własne na podstawie danych producenta akumulatorów SSB]



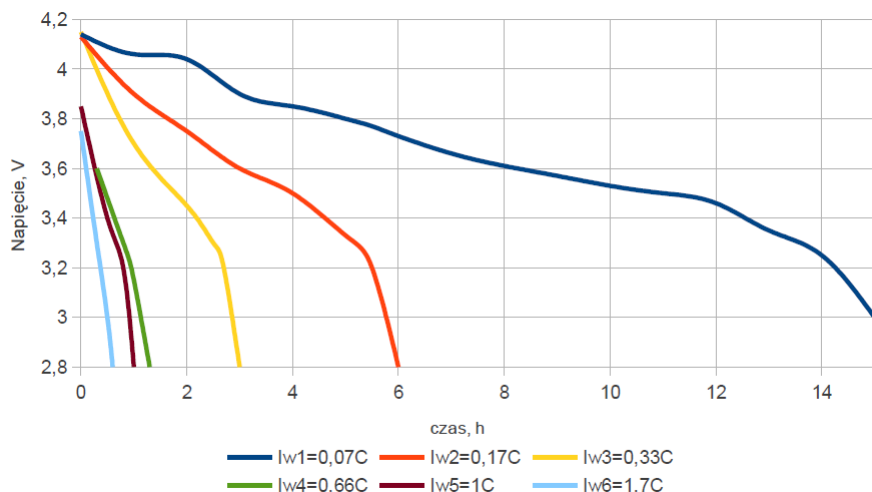
Rys. 1.4. Charakterystyka względnej energii wyładowania akumulatorów SSB typu SBL wykonanych w technologii VRLA AGM w funkcji względnego prądu wyładowania. [opracowanie własne na podstawie danych producenta akumulatorów SSB]



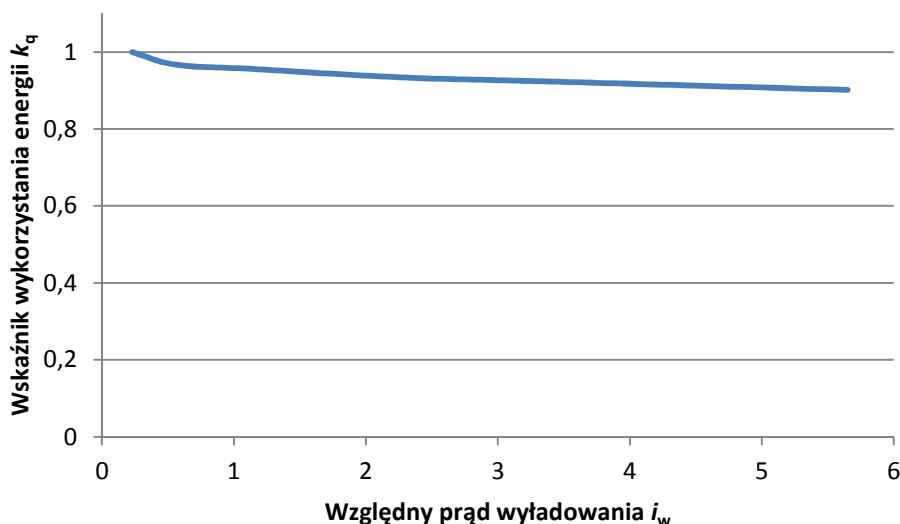
Rys. 1.5. Charakterystyka jednostkowej energii wyładowania akumulatorów SSB typu SBL wykonanych w technologii VRLA AGM w funkcji mocy jednostkowej wyładowania. [opracowanie własne na podstawie danych producenta akumulatorów SSB]

Akumulatory kwasowo-ołowiowe ze względu na dużą masę są mało popularne w rozwiązaniach mobilnych- jako zasobniki samochodów elektrycznych (w odróżnieniu do zastosowań stacjonarnych, gdzie głównie decyduje cena, a masa i objętość nie są najważniejsze). Najbardziej popularnymi akumulatorami do zastosowań w samochodach

elektrycznych są obecnie akumulatory litowo-jonowe (litowo-polimerowe). Gęstość energii akumulatorów Li-Ion to 100 – 150 Wh/kg, a gęstość mocy dochodzi do 400 W/kg. Na rysunku 1.6 pokazano przebiegi napięcia podczas procesu wyładowania akumulatora Li-Ion Panasonic NCR-18650A (parametry znamionowe:  $C_n = 3$  Ah,  $U_n = 3,7$  V), a na rysunku 1.7 pokazano charakterystykę względnej pojemności wyładowania do względnego prądu wyładowania. Najważniejszą zaletą akumulatorów Li-Ion, pod względem energetycznym jest dostępność energii niezależnie od prądu wyładowania.



Rys. 1.6. Przebieg napięcia ogniwa Li-Ion NCR-18650A dla różnych prądów wyładowania [opracowanie własne]

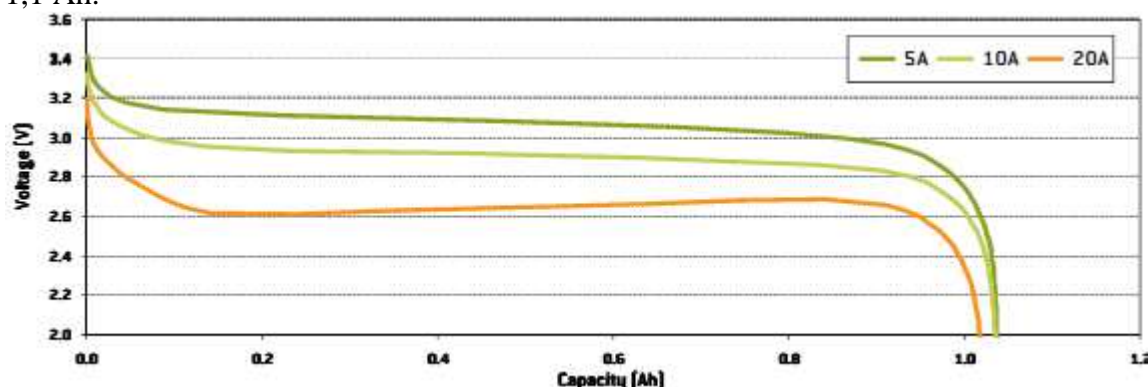


Rys. 1.7. Charakterystyka względnej energii wyładowania ogniwa Li-Ion NCR-18650A w funkcji względnego prądu wyładowania [opracowanie własne]

Tabela 1.2. Wyznaczone parametry energetyczne ogniów Li-Ion NCR-18650A.

I <sub>w</sub> A	t <sub>w</sub> min	i <sub>w</sub> -	U <sub>wAV</sub> V	P <sub>wAV</sub> W/kg	Q <sub>en</sub> Wh/kg	k <sub>q</sub> -
0,2	900	0,23	3,66	16	244	1,00
0,5	360	0,56	3,54	39	236	0,97
1	180	1,13	3,5	77	233	0,96
2	90	2,26	3,42	150	228	0,93
3	60	3,39	3,38	223	225	0,92
5	36	5,65	3,3	363	220	0,90

Na rysunku 1.8 pokazano charakterystyki dostępnej energii dla trzech prądów wyładowania (5A, 10A, 20A) ogniwa Li-Fe-PO<sub>4</sub> APR18650M1A o pojemności nominalnej 1,1 Ah.



Rys. 1.8. Charakterystyka napięcia w funkcji dostępnej energii (pojemności) ogniwa Li-Fe-PO<sub>4</sub> APR18650M1A dla trzech prądów wyładowania. [3]

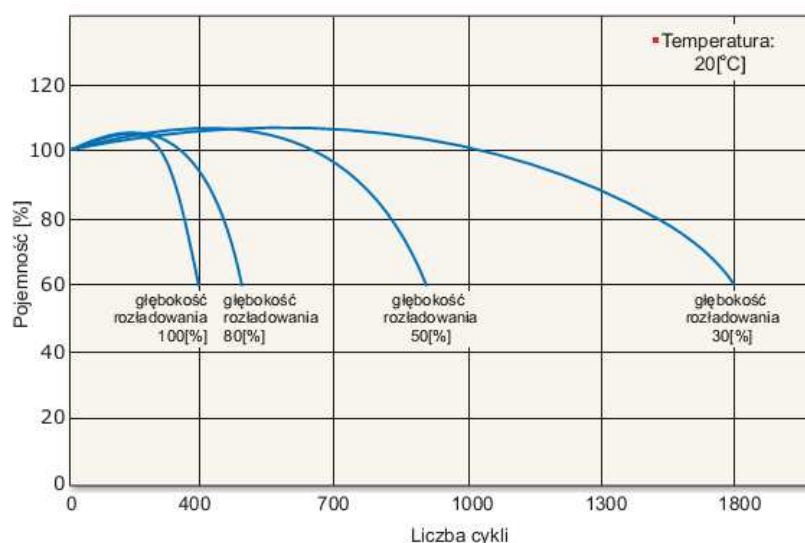
## 2. Trwałość akumulatorów.

Akumulatory w systemie off-grid (np. zasilanie awaryjne budynku) współpracujące z odnawialnymi źródłami energii choć są na stałe podłączone do źródła zasilania i odbiornika (tzw. praca buforowa) pracują w reżimie cyklicznym, czyli w cyklach rozładowywania mocą obciążenia i następnie ładowania, są narażone na szybką utratę trwałości. Trwałość akumulatorów kwasowo-ołowiowych, jak również innych typów, jest zależna od głębokości wyładowania. Na rysunku 2.8 pokazano charakterystyki trwałości przykładowego akumulatora kwasowo-ołowiowego o pojemności 100 Ah i napięciu 12 V wykonanego w technologii AGM z przeznaczeniem do pracy cyklicznej. Tego typu akumulatory są przystosowane do pracy cyklicznej i mają trwałość do 1800 cykli ładowania-rozładowania przy głębokości wyładowania do 30%. Standardowe akumulatory kwasowo-ołowiowe AGM przeznaczone do pracy buforowej charakteryzują się maksymalną trwałością 1200-1500 cykli przy głębokości rozładowania 30%, pojemność, przy głębokości rozładowania 100% trwałość spada do ok. 200 cykli (rysunki 1.10 i 1.11). Przyjmuje się, że akumulator utraci swoją trwałość jeśli pojemność spadnie poniżej 60% pojemności znamionowej. Na rysunku 1.9 pokazano zależność trwałości akumulatora wykonanego w technologii AGM z

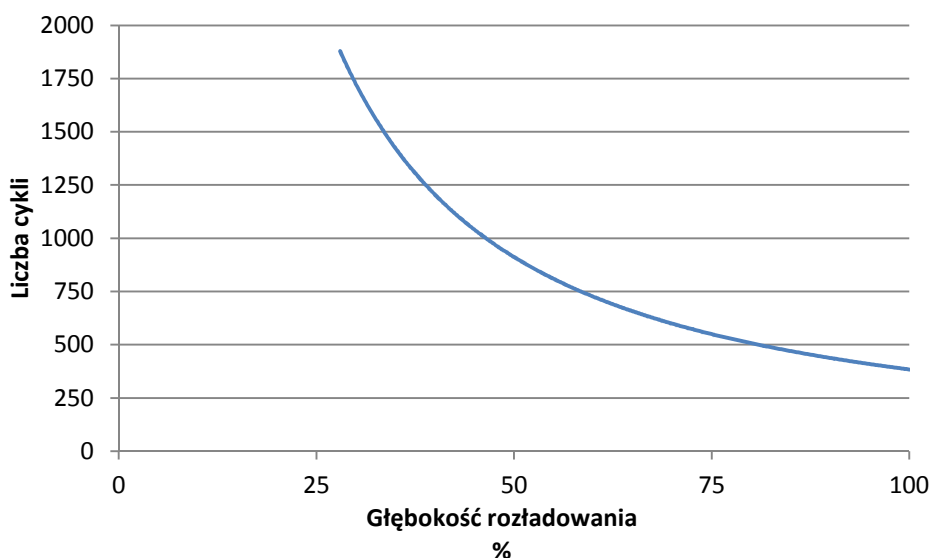


przeznaczeniem do pracy cyklicznej liczoną w cyklach ładowanie-wyładowanie od głębokości wyładowania.

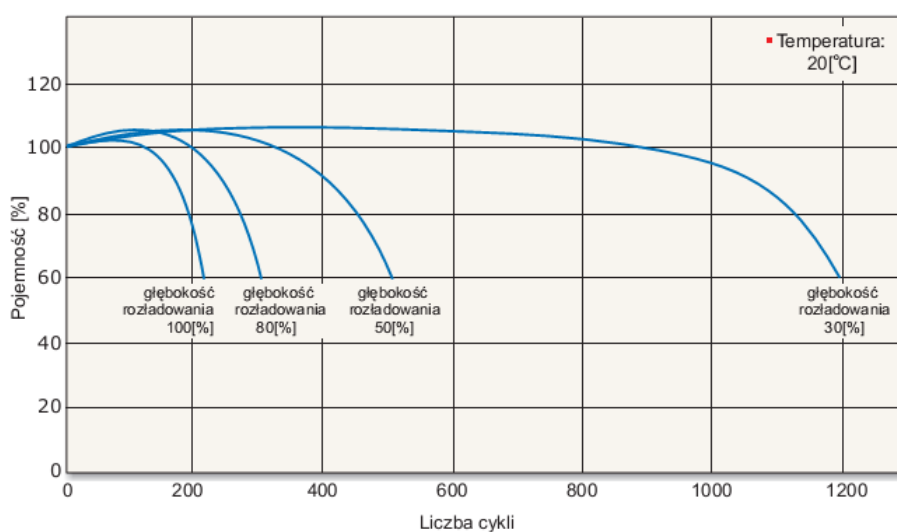
Dobór pojemności akumulatorów współpracujących z instalacją domu i źródłem takim jak ogniwo fotowoltaiczne musi uwzględniać trwałość oraz charakterystyki energetyczne akumulatorów. Zwiększenie mocy odbiorników skutkować będzie zmniejszeniem dostępnej energii elektrycznej i przez to zwiększeniem głębokości wyładowania akumulatorów. Podawana przez producentów akumulatorów trwałość liczona w latach dotyczy pracy akumulatorów w trybie buforowym pracujących przy stałym napięciu doładowania i ciągłym przepływie niewielkiego prądu doładowania. Natomiast podawana trwałość w cyklach dotyczy pracy w cyklach płytkich ładowania-rozładowania (do 70% stanu naładowania). Przy głębokim rozładowaniu akumulatorów, np. do 20% stanu naładowania trwałość akumulatorów kwasowo-ołowiowych wykonanych w technologii AGM z przeznaczeniem do pracy cyklicznej spadnie do 400 cykli.



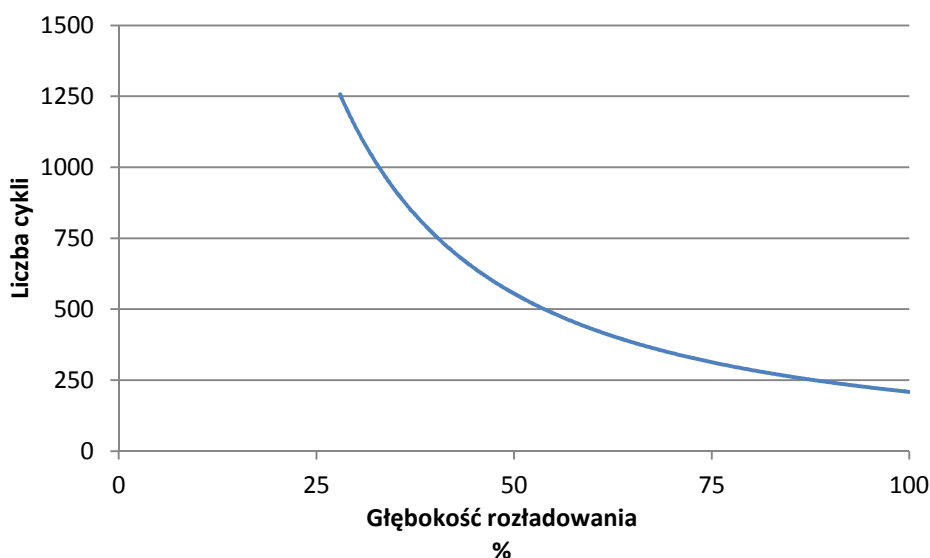
Rys. 1.8. Charakterystyki żywotności akumulatorów kwasowo-ołowiowych wykonanych w technologii AGM przeznaczonych do pracy cyklicznej. [7]



Rys. 1.9. Zależność trwałości akumulatora kwasowo-ołowiowego wykonanego w technologii AGM z przeznaczeniem do pracy cyklicznej (liczona w cyklach ładowanie-wyładowanie) od głębokości rozładowania. [opracowanie własne na podstawie danych producenta akumulatorów SSB]

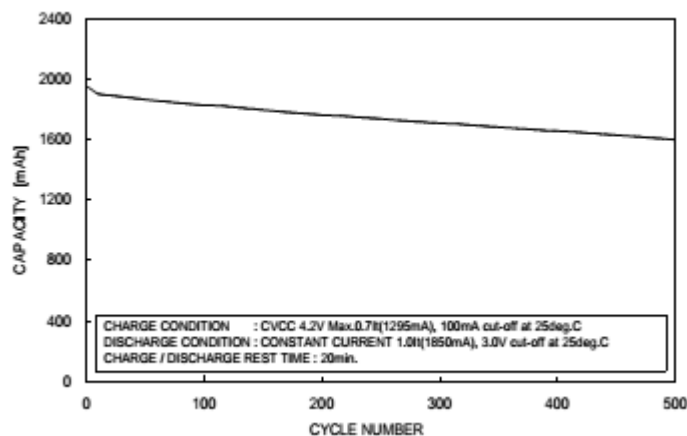


Rys. 1.10. Charakterystyki żywotności akumulatorów kwasowo-ołowiowych wykonanych w technologii AGM przeznaczonych do pracy buforowej. [7]



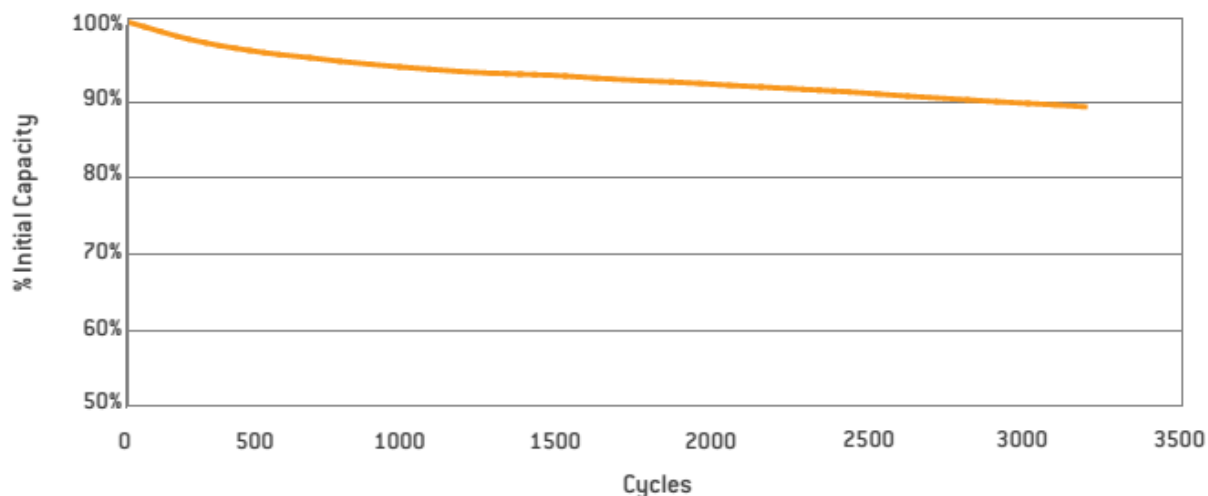
Rys. 1.11. Zależność trwałości akumulatora kwasowo-ołowiowego wykonanego w technologii AGM z przeznaczeniem do pracy buforowej (liczona w cyklach ładowanie-wyładowanie) od głębokości rozładowania [opracowanie własne na podstawie danych producenta akumulatorów SSB]

Trwałość akumulatorów Li-Ion producenci najczęściej określają dla prądu wyładowania 1C i pełnego wyładowania akumulatora w cyklu na poziomie 300 do 500 cykli (rys. 1.12). Najważniejszą zaletą, pod względem energetycznym, jest dostępność energii niezależnie od prądu wyładowania.



Rys. 1.12. Charakterystyka trwałości ogniwi Li-Ion CGA-103450A. [2]

Obiecującą technologią zasobnikową są akumulatory litowo-żelazowo-fosfatowe (Li-Fe-PO<sub>4</sub>). Parametry energetyczne są bardzo podobne do akumulatorów Li-Ion, natomiast trwałość ich jest znacznie wyższa, szacowana na 3000 pełnych cykli ładowanie-wyładowanie. Na rysunku 1.13 pokazano wykres trwałości akumulatorów AMP20M1HD-A przy 100% DOD i prądzie wyładowania 2C.



Rys. 1.13. Projektowana trwałość akumulatorów litowo-żelazowo-fosfatowych AMP20M1HD-A przy 100% DOD i prądzie wyładowania 2C [3]

### 3. Koszty magazynowania energii w zasobnikach mobilnych.

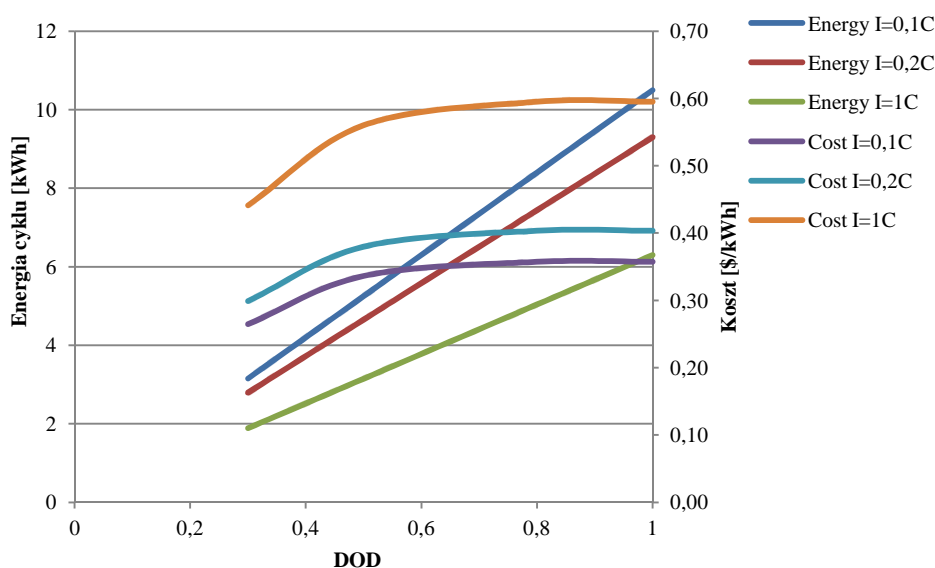
Koszt magazynowania energii zależy od ceny akumulatorów oraz ich trwałości. Trwałość akumulatorów litowo-jonowych (również litowo-polimerowych) nie jest znacznie lepsza od akumulatorów kwasowych biorąc wpływ głębokości rozładowania na trwałość akumulatorów. Nie brano pod uwagę sposobu ładowania akumulatorów, od którego także zależy trwałość ogniw. Trwałość akumulatorów kwasowo ołowiowych podana w tabeli 3.1 dotyczy niewielkiej głębokości wyładowania, zwykle nie więcej niż do 80%. Dotyczy to także akumulatorów Li-Ion, których trwałość przy głębokim rozładowaniu jest jedynie dwukrotnie wyższa od akumulatorów kwasowych. Trwałość nowoczesnych akumulatorów litowo-żelazowo-fosfatowych jest znacznie wyższa niż omawianych wcześniej kwasowych i Li-Ion. Dla prądu wyładowania 1C trwałość akumulatorów (utrata 20% pojemności) jest nie mniejsza niż 3000 cykli. Największą zaletą tych akumulatorów jest bardzo duża gęstość mocy (prądy wyładowania do 10C, prądy ładowania do 3C) oraz brak utraty pojemności przy dużych gęstościach mocy obciążenia

Tab. 3.1. Podstawowe parametry energetyczne akumulatorów oraz trwałość.

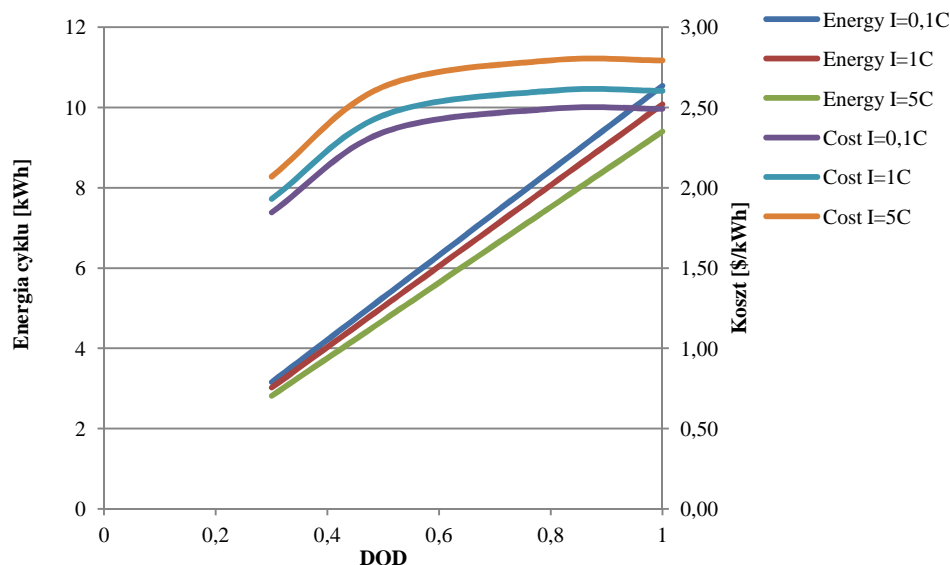
	Li-Fe-Po4	Li-Ion	Kwasowo- ołowiowy
Gęstość energetyczna [Wh/kg]	130	150	40
Koszt jednostkowy [\$/kWh]	1000	1000	135

Trwałość dla prądu nominalnego [cykle]	do 3000 DOD 100%	do 2000 DOD 20%	do 1800 DOD 20%
--	------------------	-----------------	-----------------

Porównano dwa zestawy baterii akumulatorów 1) lead-acid (wykonanych w technologii AGM VRLA), 2) Li-Ion o podobnej pojemności energetycznej 10,5 kWh dla prądu znamionowego. Na rysunkach 3.1 i 3.2 pokazano, odpowiednio, koszty energii dla obu typów baterii z uwzględnieniem prądu wyładowania oraz głębokości wyładowania. W analizie kosztów nie uwzględniono możliwości odsprzedaży zużytych akumulatorów (utrata 20% pojemności nominalnej).



Rys. 3.1. Porównanie kosztów magazynowania energii dla akumulatora kwasowo-ołowiowego (pojemność znamionowa 10,8 kWh) w zależności od głębokości wyładowania i prądu wyładowania. [opracowanie własne]



Rys. 3.2. Porównanie kosztów magazynowania energii dla akumulatora Li-Ion (pojemność znamionowa 10,5 kWh) w zależności od głębokości wyładowania i prądu wyładowania. [opracowanie własne]

Zupełnie inaczej wyglądają koszty magazynowania dla akumulatorów Li-Fe-PO<sub>4</sub>. W tym przypadku, choć cena jednostkowa za energię nominalną jest wysoka to technologia ta pozwala na efektywniejsze wykorzystanie energii (rys. 1.8). Akumulatory Li-Fe-PO<sub>4</sub> charakteryzują się stałym poziomem dostępnej energii (pojemności) do prądu wyładowania nawet 5C. Do obliczeń przyjęto ogniwo AMP20M1HD-A:

- pojemność baterii akumulatorów - 160 Ah (176 ogniw), 11,5 kWh
- napięcie nominalne - 72,5 V
- trwałość - 3000 cykli przy prądzie wyładowania 5C i DOD 100%,
- prąd 5C - 800 A, moc dla prądu 5C – 57,6 kW.

Zakładając wykorzystanie 50% energii zgromadzonej w analizowanej baterii akumulatorów (5,75 kWh) dla usług sieciowych (sieci prosumenckiej) koszt magazynowania energii wynosi ok. 0,60 \$/kWh.

## Pozdsumowanie

Akumulatory kwasowo-ołowiowe mają najniższy koszt jednostkowy (w odniesieniu do energii). Jednak ich zastosowanie w samochodach elektrycznych jest niepopularne ze względu na wysoką masę baterii pozwalającej pokonać dystans 100 km. W ich miejsce stosuje się powszechnie akumulatory Li-Ion oraz coraz częściej litowo-żelazowo-fosfatowe. Dla technologii litowej nie są znane obecnie sposoby ich regeneracji (co nie oznacza, że takowe nie powstaną). Dla akumulatorów kwasowo-ołowiowych (powstały 150 lat temu) znane są i powszechnie stosowane procesy regeneracyjne (bez konieczności wymiany elektrolitu) pozwalające odzyskać utraconą w czasie normalnej eksploatacji pojemność. Cena

takie regeneracji nie jest wyższa niż 70% ceny nowej baterii (przy uzyskaniu efektu nowej baterii).

Nowoczesne systemy zarządzania energią w akumulatorach oraz stanem ich naładowania pozwalają wydłużyć ich trwałość, dotyczy to głównie akumulatorów Li-Ion i Li-Fe-PO<sub>4</sub>, bardzo wrażliwych na parametry ładowania. Wady mikro sieci, wynikające w głównej mierze z dostępnej technologii magazynowania energii, rekompensowane są nowoczesnymi technologiami BMS (battery management system). Akumulatory w sieci off-grid współpracujące z elektrownią wiatrową oraz ogniwami fotowoltaicznymi narażone są na głębokie rozładowanie ze względu na nieprzewidywalne warunki atmosferyczne w okresie nawet kilku dni. Dotyczy to głównie akumulatorów kwasowych wrażliwych na głębokie wyładowania, przechowywanie rozładowanych akumulatorów skutkuje szybką utratą trwałości. Akumulatory w samochodach elektrycznych także narażone są na głębokie rozładowania, przez co zmniejsza się ich trwałość (problem ten w najmniejszym stopniu dotyczy nowoczesnych akumulatorów Li-Fe-PO<sub>4</sub>). Dlatego też producenci samochodów elektrycznych zalecają, żeby akumulatory były doładowywane (do SOC = 80%) w każdej możliwej sytuacji i pracowały w płytkich cyklach ładowanie-rozładowanie. Niezbędne jest zatem określenie pojemności do której można bezpiecznie rozładować akumulator bez negatywnych skutków (w odniesieniu do technologii zasobnika), lub inaczej - określenie funkcji utraty trwałości do kosztów magazynowania energii elektrycznej.

Porównując koszty jednostkowe (dla energii nominalnej) zakupu akumulatorów technologia kwasowo-ołowiowa jest najtańsza. Koszt magazynowania energii przy pracy buforowej jest najniższy, na poziomie 0,30 \$/kWh (w odniesieniu do kosztów zakupu i dodatkowych układów ładowania i BMS). Porównując natomiast koszty magazynowania energii przy pracy cyklicznej i dużych mocach wyładowania koszty dla akumulatorów kwasowych są porównywalne z Li-Fe-PO<sub>4</sub> dla prądu wyładowania 1C. Powyżej tej wartości koszty dla akumulatorów kwasowych nie były szacowane, ale przyjmując trend rosnący nowoczesna technologia okazuje się tańsza.

## Literatura

- [1] Dane techniczne akumulatorów <http://www.ssb-battery-service.de>
- [2] Dane techniczne akumulatorów [www.industrial.panasonic.com](http://www.industrial.panasonic.com)
- [3] Dane techniczne akumulatorów <http://www.a123systems.com/>
- [4] Fice M. *EV jako zasobnik dla EP – koszty magazynowania energii w rzeczywistych akumulatorach*. BŻEP, www.klaster3x20.pl, Politechnika Śląska, Gliwice 2014