

Eugeniusz KAŁUŻA

Politechnika Śląska

O PEWNYCH ASPEKTACH DOBORU ELEKTROCHEMICZNYCH
ZASOBNIKOWYCH ŹRÓDEŁ ENERGII DLA POJAZDÓW HYBRYDOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę wyznaczania masy zasobnika energii na podstawie przebiegu obciążenia pojazdu trakcyjnego oraz charakterystyk energetycznych elektrochemicznych zasobnikowych źródeł energii. Charakterystyki energetyczne tych źródeł energii, czyli wybranych ogniw akumulatorowych kwasowych i zasadowych wyznaczone w funkcji jednostkowej mocy wyładowania umożliwiły wyprowadzenie zależności na obliczanie energii ładowania ogniw oraz stopnia wykorzystania jednego cyklu ich pracy w układzie zasilania silników trakcyjnych lokomotywy hybrydowej. Wykazano, w jakim stopniu powyższe parametry zależą od charakteru obciążenia lokomotywy, mocy znamionowej silnika spalinowego i charakterystyk energetycznych zasobników energii.

1. Wstęp

Literatura przedmiotu [3,4,5,8,12] zagadnienie doboru pojemności znamionowej i liczby ogniw określonego elektrochemicznego zasobnika energii, czyli określonej baterii akumulatorów, ogranicza do sprawdzenia, czy dobrany zasobnik zapewni możliwość osiągnięcia założonych parametrów pracy pojazdu w czasie rozruchu, jazdy z prędkością ustaloną i maksymalną oraz założonego promienia dojazdu. Dobór pojemności znamionowej i liczby ogniw równoznacznej z napięciem znamionowym baterii zastępuje się w wielu zależnościach masę baterii. W analizie zagadnień energetycznych oraz efektywności ekonomicznej przyjmuje się bardzo przybliżone wartości sprawności energetycznej i trwałości zasobników, nie wiążąc tych wartości z przebiegiem obciążenia zasobnika. W niniejszym artykule przedstawiono uściśloną metodę doboru elektrochemicznego zasobnika energii dla pojazdów hybrydowych uwzględniającą zależność jego charakterystyk energetycznych od jednostkowej mocy wyładowania. Przedstawione metody obliczeń odnoszą się do pojazdów hybrydowych sieciowo-akumulatorowych i spalinowo-akumulatorowych, zaś dane liczbowe do manewrowych lokomotyw sieciowo-akumulatorowych i spalinowo-akumulatorowych. W prezentowanych metodach obliczeń pominięto wpływ zmian temperatury elektrolitu zasobnika na jego parametry energetyczne, ponieważ pojazdy hybrydowe poza zasobnikiem energii wyposażone są w podstawowe źródło zasilania energią, dzięki któremu można zapewnić pracę zasobnika w optymalnym przedziale temperatur.

2. Charakterystyki energetyczne elektrochemicznych zasobników energii

2.1. Wprowadzenie

Parametrami oraz charakterystykami decydującymi o doborze zasobnikowych ze elektrochemicznych źródeł energii przeznaczonych do zastosowanie w pojazdach hybrydowych są:

- dopuszczalna jednostkowa moc wyładowania i ładowania,
- zależność sprawności energetycznej zasobnika od jednostkowej mocy wyładowania,
- zależność zmian stanu naładowania zasobnika od jednostkowej mocy wyładowania i czasu wyładowania.

Powyższe parametry i charakterystyki odniesiono do dwóch wybranych zasobników energii produkcji krajowej, mogących znaleźć zastosowanie w pojazdach hybrydowych, a mianowicie do:

- ogniw akumulatorowych kwasowych trakcyjnych z dodatnimi płytami pancernymi, z podwójnymi końcówkami biegunowymi o symbolu 6A570(TS6u),
- ogniw akumulatorowych zasadowych, niklowo-kadmowych o obniżonej rezystancji wewnętrznej typu SN 375.

2.2. Jednostkowe moce wyładowania i ładowania

Moc jednostkową wyładowania ogniw akumulatorowych p_w w funkcji wartości względnej prądu wyładowania i_w można wyznaczyć z zależności:

$$p_w = \frac{I_w U_w}{m_{og}} \quad [W/kg] \quad (1)$$

$$i_w = \frac{I_w T_n}{Q_{5h}} \quad (2)$$

gdzie:

- Q_{5h} - pojemność znamionowa odpowiadająca 5 godz. prądowi wyładowania w Ah,
- I_w - prąd wyładowania w A odpowiadający określonemu czasowi wyładowania,
- $I_{5h} \cdot I_{3h} \cdot I_{1h} \cdot I_{30min}$ - prąd wyładowania 5 godz, 3 godz, 1 godz, 30 minutowy,
- U_w - napięcie wyładowania odpowiadające prądowi wyładowania I_w oraz określonemu stanowi naładowania ogniwa,
- m_{og} - masa ogniwa napełnionego elektrolitem w kg,
- $T_n = 1h$ - znamionowy czas.

Dane do obliczeń odczytano z charakterystyk przebiegu napięcia wyładowania w funkcji wybranej pojemności lub czasu wyładowania zamieszczonych w katalogach [6,7]. Wyniki obliczeń jednostkowych mocy wyładowania dla 50% wybranej pojemności zestawiono w tabeli 1, a charakterystyki $p_w = f(i_w)$ dla 10%, 50% i 80% wybranej pojemności przedstawiono na rys. 1.

Uwzględniając zalecenia literatury [2,6,7] oraz własne doświadczenia laboratoryjne, określono dla analizowanych ogniw następujące maksymalne parametry wyładowania:

- dla ogniw 6A570 (TS6u), przy 0,5Q:

$$i_{w \max} = 1,06; \quad p_{w \max} = 26,3 \text{ W/kg}; \quad i_{w \infty} = 0,295; \quad p_w = 8,4 \text{ W/kg}$$

- dla ogniw SN 375; przy 0,5Q:

$$i_{w \max} = 3,0; \quad p_{w \max} = 47,7 \text{ W/kg}; \quad i_{w \infty} = 0,32; \quad p_w = 7,03 \text{ W/kg}.$$

Jednostkowe moce ładowania obliczyć można ze wzorów (1) i (2), zastępując indekсы "w" indeksami "ł". Wartości napięć ładowania określić można z charakterystyk firmowych ogniw dla określonego prądu ładowania, stanu naładowania ogniwa oraz temperatury elektrolitu. Dla zalecanych przez katalogi [6,7] oraz instrukcje obsługi [2] wartości prądu ładowania normalnego wyznaczono (tabela 2) odpowiadające im jednostkowe moce ładowania.

2.3. Jednostkowa pojemność energetyczna

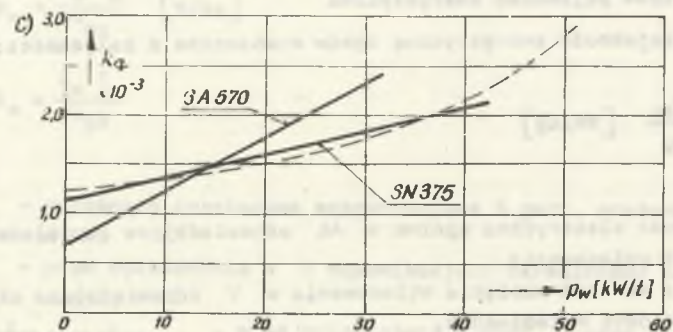
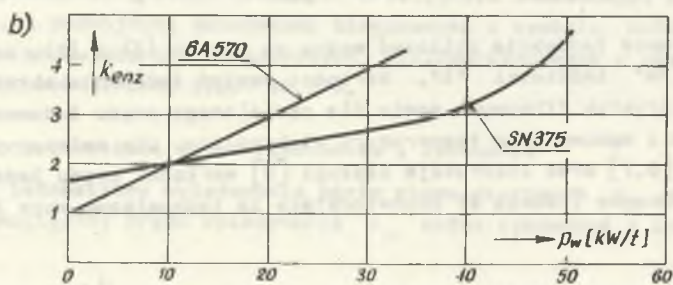
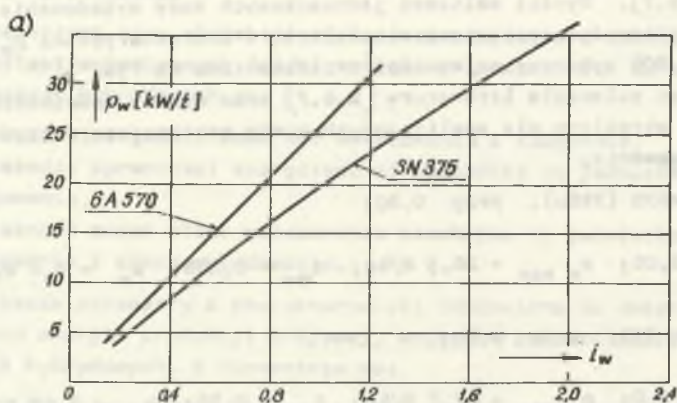
Jednostkową pojemność energetyczną ogniw wyznaczono z zależności:

$$q_{en} = \frac{Q U_{\text{śr}}}{m_{og}} \quad [\text{Wh/kg}] \quad (3)$$

gdzie:

- Q - pojemność elektryczna ogniwa w Ah odpowiadająca określonemu prądowi wyładowania,
- $U_{\text{śr}}$ - średnia wartość napięcia wyładowania w V odpowiadająca określonemu prądowi wyładowania,
- m_{og} - masa ogniwa z elektrolitem.

Wyniki obliczeń jednostkowej pojemności dla analizowanych ogniw zestawiono w tabeli 1.



Rys. 1

Fig. 1

Tabela 1

Moc jednostkowa, pojemność energetyczna jednostkowa oraz sprawność energetyczna ogniw akumulatorowych w czasie wyładowania

Ogniwo	t_w	i_w	I_w	Q	$U_w(0,5Q)$	$P_w(0,5Q)$	$U_w(\text{śr})$	q_{en}	$(w)_{en}$	k_{enz}	k
			A	Ah	V	kW/t	V	kWh/t			$\times 10^{-3}$
6A570 (7S6u) $m_{og} = 38 \text{ kg}$	5h	0,2	114	570	1,92	5,76	1,90	28,5	0,96	1,61	0,97
	3h	0,295	168	504	1,90	8,4	1,87	24,8	0,84	1,84	1,12
	1h	0,663	378	378	1,78	17,7	1,76	17,5	0,59	2,63	1,59
	30min	1,06	602	301	1,66	26,3	1,65	13,07	0,438	3,54	2,12
SN375 $m_{og} = 21 \text{ kg}$	5h	0,2	75	375	1,25	4,46	1,25	22,3	1,04	1,86	1,25
	0,94h	1,0	375	352	1,10	19,6	1,10	18,4	0,86	2,25	1,51
	24min	2,0	750	300	1,00	35,7	1,00	14,3	0,667	2,90	1,94
	13,3min	3,0	1125	250	0,89	47,7	0,89	10,6	0,478	4,05	2,62

Tabela 2

Moc jednostkowa oraz sprawność energetyczna ogniw akumulatorowych w czasie ładowania

Ogniwo	i_z	I_z	$U_z(0,5Q)$	P_z	$(z)_{en}$
		A	V	kW/t	
6A570	-	28,5	2,15	1,61	0,775
	0,05	45,6	2,195	2,63	0,759
	0,167	95	2,26	5,65	0,737
SN 375	0,2	75	1,41	5,03	0,608

2.4. Zależność sprawności energetycznej zasobnika od jednostkowej mocy wyładowania

Sprawność energetyczną ogniw kwasowych i zasadowych wyznaczono ze wzoru:

$$\eta_{en} = \eta_{en}^{(w)} \eta_{en}^{(z)} \quad (4)$$

$$\eta_{en}^{(w)} = \frac{A_w}{A_o} = \frac{Q_w U_w}{Q_{wn} U_n} \quad (5)$$

$$\eta_{en}^{(z)} = \frac{A_o}{A_z} = \frac{Q_{wn} U_n}{Q_z U_z} \quad (6)$$

gdzie:

- A_w - energia pobrana z akumulatora,
- A_o - wartość energii odniesienia (umownej), akumulatora w pełni naładowanego,
- Q_{wn}, Q_w, Q_z - pojemność znamionowa wyładowania i ładowania ogniwa
- U_w - napięcie wyładowania odpowiadające określonej pojemności wybranej,
- U_z - napięcie ładowania odpowiadające określonemu stanowi naładowania,
- U_n - 2V dla ogniw kwasowych, 1,2 V dla ogniw zasadowych.

Sprawność energetyczną ogniw obliczono dla cząstkowych cykli: ładowania i wyładowania oscylujących wokół określonego stanu naładowania (przyjęto $Q = 0,5 Q_n$). Ogniwo w pełni naładowane wykazuje stan naładowania

$$Q_z = k_z Q_5 = k_z Q_{wn} \quad (7)$$

gdzie:

- k_z - współczynnik ładowania; dla ogniw 6A570 $k_z = 1,2$,
dla ogniw SN 375 $k_z = 1,4$.

Wyniki obliczeń współczynników sprawności ładowania i wyładowania zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Uwzględniając sprawność urządzeń przetwarzających energię w czasie ładowania i wyładowania zasobnika η_p , wyznaczono współczynnik krętności energii ładowania do energii wyładowania zasobnika w postaci funkcji

$$k_{enz} = f(p_w)$$

$$k_{enz} = \frac{1}{\eta_z \eta_w \eta_p} = a_{en} + b_{en} p_w, \quad (8)$$

Przyjmując stałą wartość współczynnika sprawności urządzeń przetwarzających $\eta_p = 0,85$ oraz stałe wartości współczynników sprawności ładowania równe 0,759, a także ogniw 6A570 i 0,608 dla ogniw SN375, wyznaczono na podstawie danych z tabel 1 i 2 następujące wartości współczynników:

$$a_{en} = 1; \quad b_{en} = 0,1 \text{ kg/W} \quad - \text{ dla ogniw 6A570,}$$

$$a_{en} = 1,65; \quad b_{en} = 0,033 \text{ kg/W} \quad - \text{ dla ogniw SN 375.}$$

Pominięcie w obliczeniach zmiany wartości współczynnika sprawności ładowania w funkcji mocy ładowania w zakresie od 1,61 do 5,65 W/kg wiąże się z dopuszczeniem błędu nie przekraczającego 3%. Współczynniki równania (8), (rys. 1) odnoszą się do procesów wyładowania i ładowania przebiegających w stanach quasi-ustalonych, co zachodzi w pojazdach hybrydowych sieciowo-akumulatorowych. W pojazdach spalinowo-akumulatorowych, gdzie zasobnik pokrywając jedynie niedobory mocy szczytowej pracuje w stanach przejściowych, wartości współczynników k_{enz} są niższe.

2.5. Zależność stopnia wykorzystania jednego cyklu pracy elektrochemicznego zasobnika energii od przebiegu wyładowania

Stopień wykorzystania jednego cyklu pracy elektrochemicznego zasobnika energii przy wyładowaniu z zasobnika energii odpowiadającej 1 kWs/t obliczono z zależności:

$$k_q = \frac{100\%}{q_{en} \cdot 3600} \left[\frac{\% \cdot t}{\text{kWs}} \right] \quad (9)$$

gdzie:

q_{en} - jednostkowa pojemność energetyczna zasobnika w kWh/t.

Wyniki obliczeń k_q dla ogniw 6A570 oraz SN 375 zestawiono w tabeli 1. Otrzymane wyniki obliczeń można przedstawić z wystarczającą dokładnością w granicach dopuszczalnych obciążeń za pomocą równania:

$$k_q = a_q + b_q p_w \left[\frac{\% \cdot t}{\text{kWs}} \right] \quad (10)$$

gdzie:

p_w - moc jednostkowa wyładowania w kW/t.

Obliczone wartości współczynników równania (10) dla wyładowań quasi-ustalonych wynoszą:

- ogniwo 6A570; $a_q = 0,66 \cdot 10^{-3} \% \cdot t / \text{kWs}$; $b_q = 0,054 \cdot 10^{-3} \% \cdot t^2 / \text{kW}^2 \cdot \text{s}$
- ogniwo 375; $a_q = 1 \cdot 10^{-3} \% \cdot t / \text{kWs}$; $b_q = 0,0275 \cdot 10^{-3} \% \cdot t^2 / \text{kW}^2 \cdot \text{s}$

Stopień wykorzystania jednego cyklu pracy zasobnika energii obciążonego mocą jednostkową $p_w(t)$ w czasie od 0 do t_1 można obliczyć z zależności:

$$K_q = \int_0^{t_1} k_q p_w(t) dt \quad (11)$$

3. Wyznaczenie optymalnej masy zasobnika energii dla wybranych przykładów rozwiązań pojazdów hybrydowych

3.1. Wprowadzenia

Przedstawiona w niniejszym rozdziale metoda wyznaczania masy zasobnika energii dotyczy lokomotyw manewrowych sieciowo-akumulatorowych i spalinowo-akumulatorowych. Przebiegi obciążenia lokomotyw manewrowych związane są z realizowanym rodzajem pracy manewrowej. Przedstawione przykłady obliczeń odnoszą się do lokomotywy realizującej pracę manewrową na torze płaskim. Na podstawie pomiarów obciążenia lokomotyw serii SM42 i SM31 pracujących na dużych stacjach rozrządowych PKP, wyznaczono uporządkowane uśrednione przebiegi obciążenia silnika spalinowego tych lokomotyw (rys. 2). Uporządkowany przebieg obciążenia silnika lokomotywy SM42 o mocy znamionowej 589 kW (800 KM) dla 30 minutowego przedziału czasu pracy lokomotywy można przedstawić za pomocą funkcji:

$$P_D(t) = \frac{a t^2 + b}{t^2 + h} \quad [\text{kW}] \quad (12)$$

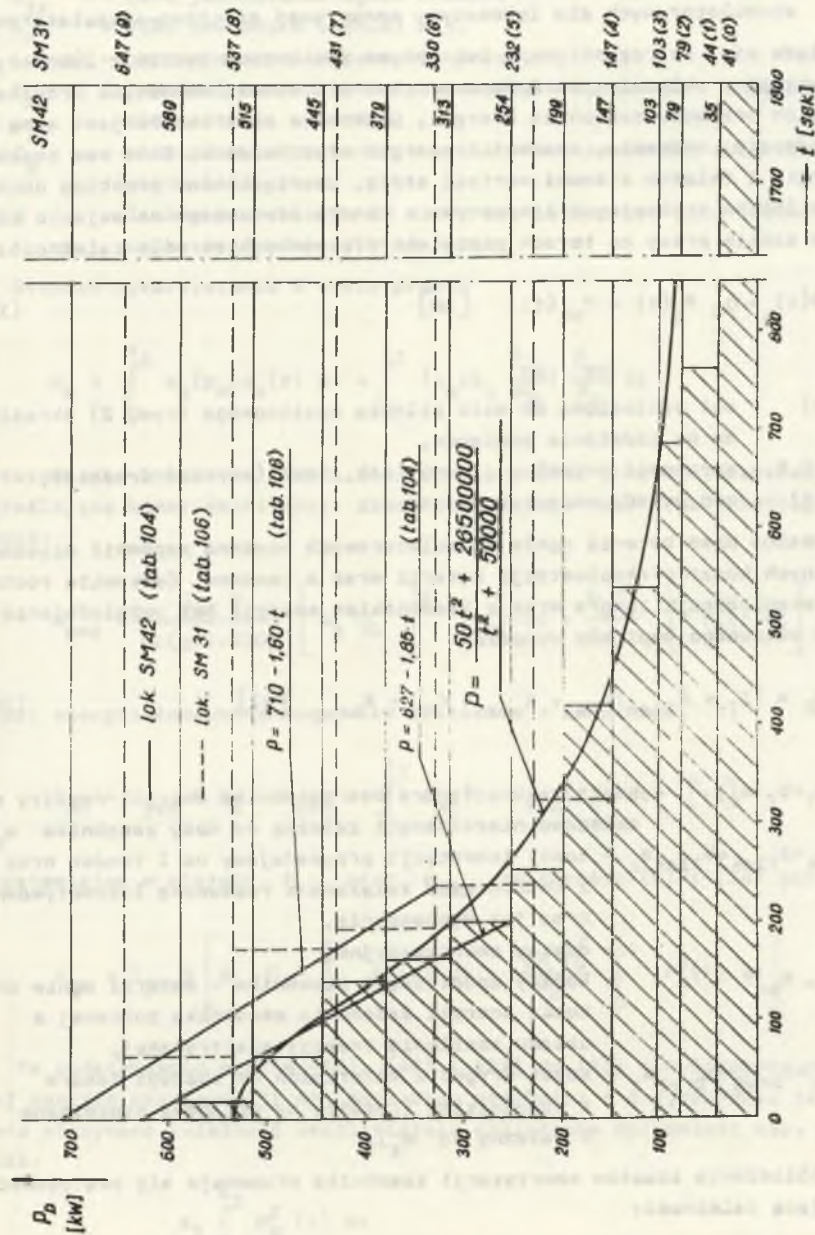
gdzie:

t - czas w s - na wykresie uporządkowanego uśrednionego przebiegu obciążenia (rys. 2),

a, b, h - współczynniki: $a = 50$; $b = 26\,500\,000$, $h = 50\,000$.

Z rys. 2 wynika, że lokomotywa w przedziale 30 min pracuje średnio pod obciążeniem 776 s ($t_1 = 776$ s), zaś na biegu jałowym 1024s. Wyznaczając parametry energetyczne zasobnika energii odpowiadające pracy lokomotywy sieciowo-akumulatorowej w przedziale 30 min, należy obliczenia przeprowadzić dla przedziału czasu od 0 do 776 s. W odniesieniu do lokomotywy spalinowo-akumulatorowych, gdzie silnik spalinowy pokrywa ok. 50% mocy szczytowej, wygodniej jest posługiwać się funkcją opisującą liniową zależność pomiędzy mocą a czasem jej występowania na uporządkowanym przebiegu obciążenia (rys. 2):

$$P_1(t) = P_{\max} - ct = 627 - 1,85 t \quad [\text{kW}] \quad (13)$$



Rys. 2
Fig. 2

3.2. Wyznaczenie optymalnej masy zasobnika energii-baterii ogniów akumulatorowych dla lokomotywy manewrowej sieciowo-akumulatorowej

Zakłada się, że rozpatrywana lokomotywa zestawiona będzie z lokomotywy elektrycznej o układzie osi BoBo oraz tendra z osiami napędzonymi przeznaczonymo do przewozu zasobnika energii. Całkowita masa tendra jest sumą masy podwozia, nadwozia, zasobnika energii oraz balastu. Suma mas zasobnika energii i balastu stanowi wartość stałą. Uporządkowany przebieg obciążenia silników trakcyjnych lokomotywy i tendra mierzonego na wejściu silników w czasie pracy na torach niezelektryfikowanych określa zależność:

$$P(t) = \eta_G P_D(t) = P_{wz}(t) \quad [\text{kW}] \quad (14)$$

gdzie:

$P_D(t)$ - moc odniesiona do wału silnika spalinowego (rys. 2) określona na podstawie pomiarów,

$\eta_G = 0,9$ - sprawność prądnicy głównej lok. SM42 (wartość średnia),

$P_{wz}(t)$ - moc wyładowania zasobnika.

Optymalna masa baterii ogniów akumulatorowych powinna zapewnić uzyskanie minimalnych kosztów eksploatacji baterii wraz z tendrem. Całkowite roczne koszty eksploatacji tendra wraz z zasobnikiem energii bez uwzględnienia zysku z włożonego kapitału wynoszą:

$$K_E = (I_T + I_{Tlok})P_{am} + K_{amz} + K_{en} + K_{bryg} \quad [\text{zł}] \quad (15)$$

gdzie:

$I_T = a_T + b_T m_z$ - koszt zakupu tendra bez zasobnika energii rozbity na składową niezależną i zależną od masy zasobnika m_z ,

$I_{Tlok} = a_{Tlok} + b_{Tlok} m_z$ - koszt inwestycji przypadający na 1 tender wraz z zasobnikiem związany z rozbudową lokomotywni oraz jej wyposażenia,

P_{am} - odpisy amortyzacyjne,

K_{amz}, K_{en} - koszty amortyzacji zasobnika - baterii ogniów oraz koszt energii ładowania zasobnika pobranej z układu zasilania trakcji elektrycznej,

$K_{bryg} = a_{bryg} + b_{bryg} m_z$ - koszt brygad i materiałów do obsługi tendra z zasobnikiem (rozbity na składową niezależną i zależną od m_z).

Dla obliczenia kosztów amortyzacji zasobnika proponuje się zastosować następującą zależność:

$$K_{amz} = C_{jz} m_z \left[\frac{Lc(1rok)}{Lc(gw)} + \frac{1}{T_z} \right] \quad [\text{zł}] \quad (16)$$

$$Lc(1rok) = \frac{K_g N}{100\%} \quad (17)$$

gdzie:

- C_{jz} - cena jednostkowe ogniów w zł/t,
 m_z - masa zasobnika (ogniów) w t,
 $Lc(gw)$ - gwarantowana liczba cykli pracy,
 T_z - trwałość zasobnika naładowanego, wyłączzonego z intensywnej eksploatacji w latach,
 K_q - stopień wykorzystania 1 cyklu pracy zasobnika obliczony ze wzoru (11),
 N - liczba przedziałów 30 min pracy lokomotywy poza średnią trakcyjną przypadających na 1 rok.

Stopień wykorzystanie 1 cyklu pracy:

$$K_q = \int_0^{t^1} k_q(p_w) p_w(t) dt = \int_0^{t^1} (a_q + b_q \frac{P_{wz}}{m_z}) \frac{P_{wz}}{m_z} dt. \quad (18)$$

Podstawiając wyrażenie (18) i (14) do wzoru (16) otrzymamy zależność określającą koszt amortyzacji zasobnika od jego masy oraz przebiegu obciążenia:

$$K_{amz} = \frac{C_{jz} N}{Lc(gw) \cdot 100\%} \left[a_q \gamma_G \int_0^{t^1} P_D(t) dt + \frac{b_q \gamma_G^2}{m_z} \int_0^{t^1} P_D^2(t) dt \right] + \frac{C_{jz} m_z}{T_z} \quad (19)$$

Koszt energii ładowania zasobnika obliczono z zależności

$$K_{en} = C_{jen} N A_z = C_{jen} N \int_0^{t^1} P_{wz}(t) k_{enz}(p_w) dt \quad [zł]. \quad (20)$$

Podstawiając w miejsce P_{wz} oraz k_{enz} zależności (8) i (14) otrzymamy:

$$K_{en} = C_{jen} N \left[a_{en} \gamma_G \int_0^{t^1} P_D(t) dt + \frac{b_{en} \gamma_G^2}{m_z} \int_0^{t^1} P_D^2(t) dt \right]. \quad (21)$$

Po podstawieniu wzorów (16), (19) i (21) do (15) i wyliczeniu pochodnej kosztów eksploatacji względem masy zasobnika i przyrównaniu jej do zera otrzymano zależność umożliwiającą obliczenie optymalnej masy zasobnika:

$$m_z^2 = \frac{k_1 \int_0^{t^1} P_D^2(t) dt}{(b_T + b_{Tlok}) p_{am} + C_{jz} T_z^{-1} + b_{bryg}} \quad [t^2] \quad (22)$$

$$k_1 = \frac{C_{jz} N b_g \eta_G^2}{Lc(gw) \cdot 100\%} + C_{jen} b_{en} \eta_G^2 N \quad (23)$$

$$\int_0^{t_1} P_D^2(t) dt = \int_0^{t_1} \left(\frac{at^2 + b}{t^2 + h} \right)^2 dt = \quad (24)$$

$$= a^2 \left\{ t_1 + 2\left(\frac{b}{a} - h\right) \frac{1}{\sqrt{h}} \arctg \frac{t_1}{\sqrt{h}} + \left(\frac{b}{a} - h\right)^2 \frac{\sqrt{h}}{2h^2} \left[\frac{t_1}{h(1 + \frac{t_1^2}{h})} + \arctg \frac{t_1}{h} \right] \right\}$$

Obliczenia liczbowe wykonano dla zasobnika energii złożonego z ogniów typu 6A570, przyjmując wcześniej wyznaczone wartości współczynników równań (8), (10), (12) i (14) oraz niżej wyszczególnione ceny jednostkowe i składniki kosztów obowiązujące w II kwartale 1988 r.:

$$C_{jz} = 260\ 000 \text{ zł/t}; \quad C_{jen} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ zł/kWs}; \quad Lc(gw) = 1000; \quad N=2400$$

$$b_T + b_{Tlok} = 70\ 000 \text{ zł/t}; \quad p_{am} = 0,07; \quad T_z = 10; \quad b_{bryg} = 10\ 000 \text{ zł/t.}$$

Wyniki obliczeń: $k_1 = 0,662 \text{ zł} \cdot \text{t/kW}^2 \cdot \text{s}$; mianownik równania (22):
 $M = 40\ 900 \text{ zł/t}$

$$P_D^2(t)dt = 55,865 \cdot 10^6 \text{ kW}^2 \cdot \text{s}; \quad m_z = 30 \text{ t.}$$

3.3. Wyznaczenie optymalnej masy zasobnika energii dla lokomotywy manewrowej spalinowo-akumulatorowej

Zakłada się, że zasobnik energii umieszczony będzie na tendrze (jak w p.3.2) połączonym z lokomotywą spalinową wyposażoną w silnik spalinowy o mocy znamionowej P_{DHN} . Suma masy zasobnika i balastu w tendrze stanowi wartość stałą. Moc wyładowania zasobnika wspomagającego zespół prądotwórczy lokomotywy dla obciążeń $P_D > P_{DHN}$ można wyznaczyć z zależności:

$$P_{wz}(t) = [P_D(t) - P_{DHN}] \eta_G = [(P_{max} - ct) - P_{DHN}] \eta_G. \quad (25)$$

Wstawiając do wzoru (18) zależność (25) otrzymano wzór na obliczanie stopnia wykorzystania i cyklu pracy zasobnika energii:

$$K_q = \frac{a_g \eta_G}{2c m_z} (P_{max} - P_{DHN})^2 + \frac{b_g \eta_G^2}{3 c m_z^2} (P_{max} - P_{DHN})^3 \quad [\%] \quad (26)$$

gdzie oznaczenia przyjęto tak jak we wzorach (10), (13), (14).

Dodatkowe zużycie paliwa przez silnik spalinowy napędzający poza prędnicę główną i wzbudnicę także prędnicę pomocniczą zasilającą w czasie ładowania zasobnik energii wynosi:

$$\Delta G = d A_z \quad [g] \quad (27)$$

gdzie:

$d = 170 \text{ g/kWh} = 0,04729 \text{ g/kWs}$ - składowa jednostkowego zużycia paliwa silnika pracującego z parametrami obciążenia bliskimi biegowi jałowemu.

Cena jednostkowa energii elektrycznej ładowania zasobnika z zespołu prądotwórczego wynosi:

$$C_{jen} = C_{jpol} d k_d \quad [zł/kWs] \quad (28)$$

gdzie:

$C_{jpol} = 110 \text{ zł/kg} = 0,11 \text{ zł/g}$ - cena jednostkowa oleju napędowego (1988),
 $k_d = 1,08$ - współczynnik uwzględniający koszt oleju silnikowego.

Energię ładowania zasobnika odpowiadającą przebiegowi obciążenia lokomotywy $P(t)$ w 30 min przedziale czasu pracy obliczono z zależności (8), (20) i (24):

$$A_z = \frac{a_{en} \eta_G}{2c} (P_{max} - P_{DHN})^2 + \frac{b_{en} \eta_G^2}{3c m_z} (P_{max} - P_{DHN})^3 \quad [kWs] \quad (29)$$

Optymalną masę zasobnika wyznaczono tak jak w pkt. 3.2 korzystając z zależności (15), (16), (17), (26), (28), (29).

$$m_z^2 = \frac{k_2 (P_{max} - P_{DHN})^3}{(b_T + b_{Tlok}) P_{am} + C_{jz} T^{-1} + b_{bryg}} \quad [t^2] \quad (30)$$

$$k_2 = \frac{N \eta_G^2}{3c} \left(\frac{C_{jz} b_g}{Lc(gw) \cdot 100\%} + C_{jen} b_{en} \right) \quad (31)$$

Obliczenia liczbowe wykonano dla zasobnika energii złożonego z ogniw typu 6A570 przyjmując następujące wartości współczynników i cen jednostkowych: $C_{jz} = 260 \text{ 000 zł/t}$; $C_{jen} = 0,11 \cdot 0,04729 \cdot 1,08 = 5,62 \cdot 10^{-3} \text{ zł/kWs}$; $Lc(gw) = 100G$; $N = 2 \cdot 23 \cdot 290 = 13 \text{ 340}$; mianownik równania (30): $M = 40 \text{ 900 zł/t}$; współczynniki równań (8), (10), (13) i (14):

$$b_q = 0,054 \cdot 10^{-3} \% \cdot t^2 / kW^2 \cdot s; \quad b_{en} = 0,1 \text{ t/kW}; \quad P_{max} = 627 \text{ kW};$$

$$c = 1,85 \text{ kW/s}.$$

Wyniki obliczeń: $k_2 = 1,367$; dla $P_{DHN} = 331 \text{ kW}$; $m_z = 29,4 \text{ t}$; dla $P_{DHN} = 441,6 \text{ kW}$; $m_z = 14,6 \text{ t}$.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę opisu parametrów energetycznych elektrochemicznych zasobnikowych źródeł energii za pomocą funkcji liniowych zależnych od mocy jednostkowej wyładowania zasobnika. Metoda ta pozwala obliczać energię ładowania oraz stopień wykorzystania pojemności zasobnika energii zasilającego odbiornik, którego przebieg obciążenia określony jest za pomocą funkcji $P(t)$. Otrzymana zależność na obliczanie energii ładowania oraz stopnia wykorzystania pojemności zasobnika energii stanowi podstawę do wyznaczenia optymalnej masy zasobnika energii zapewniającej uzyskanie minimalnych kosztów eksploatacji hybrydowego pojazdu trakcyjnego.

LITERATURA

- [1] Gomółka J., Kowalczyk F., Franke A.: Współczesne chemiczne źródła prądu. Wyd. MON, Warszawa 1977.
- [2] Instrukcja obsługi: Kwasowe ogniwa trakcyjne z dodatnimi płytami pancernymi. WPM WEMA.
- [3] Jansa F.: Elektrická trakcja I tom Alfa, Bratislava 1976.
- [4] Jansa F.: Elektrická vozidlo. Wyd. VSD Zilina, ALPA, Bratislava 1970.
- [5] Kałuża E.: Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej. Wyd. II. Skrypt uczelniany Nr 1066. Politechnika Śląska, Gliwice 1982.
- [6] Katalog SWW 1134-153: Ogniwa i baterie akumulatorowe trakcyjne. Wyd. Przemysłu Maszynowego WEMA.
- [7] Katalog 10-0: Akumulatory zasadowe. WPM WEMA.
- [8] Krasnowajew N.I.: Kontaktно-Аkkumuljatorная тјага на железнодорожном транспорте. Transport, Moskwa 1977.
- [9] Mai K.J. Mehrkraft: Thyristorlokomotiven für Fahrdrabt, Batterie und Dieselhilfsbetrieb auf Zechen und Hüttenbahnen. I CEB 1971.
- [10] Praca zbiorowa: Neue Batterien für Elektro - Straßenfahrzeuge. Varta special report Z/1972, 3000 Hannover.
- [11] Rappengluch W., Pfister F.: Elektrischer Triebwagen für Fahrleitung und Batteriebetrieb. ETR Nr 9, 1981.
- [12] Sachs K.: Elektrische Triebfahrzeuge tom 1.2. Wyd. II. Springer Verlag Wien, New York 1973.
- [13] Schleutn W.: Zur Ermittlung des Ladezustandes von Akkumulatoren. Sonderdruck aus etz - Archiv Band 4. VDE Verlag, Berlin 1982.
- [14] Szumański A.: Akumulacja energii w pojazdach. WKiŁ, Warszawa 1984.

Recenzent: Doc. dr inż. Zdzisław Klonowicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 maja 1989 r.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОДБОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ СРЕДСТВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье представлен метод определения массы аккумуляторных источников на основе изменения нагрузки тягового поезда, а также энергетических характеристик электромеханических аккумуляторных источников энергии.

Энергетические характеристики упомянутых источников энергии т.е. выбранных щелочных и кислотных аккумуляторных источников определённых в зависимости от удельной мощности разряда, создали предпосылки для вывода зависимостей, с помощью которых можно вычислить энергию подзаряда источников, а также степень использования одного цикла их работы в системе питания тяговых двигателей гибридного локомотива. Представлено, в какой степени эти параметры зависят от вида нагрузки локомотива, номинальной мощности двигателя внутреннего сгорания и энергетических характеристик аккумуляторных источников энергии.

ON SOME ASPECTS OF SELECTING ELECTROCHEMICAL ACCUMULATOR ENERGY SOURCES FOR MIXED ELECTRICAL SUPPLY (HYBRID) CARRIAGES

S u m m a r y

The work introduces a method of determining the mass of energy accumulator on the basis of traction carriage load diagram and energy characteristic curves of accumulator energy sources. Energy characteristic curves of the above mentioned energy sources (i.e. some lead and alkaline accumulators) defined as a function of unit power of discharge led to the derivation of the formula for calculating both the charging energy and the working cycle utilization factor in the traction motor supply system of hybrid locomotive. The work shows the dependence of these parameters on the character of the locomotive load, diesel engine power rating and power characteristic curves of energy accumulators.