MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
POJAZDY SZYNOWE NOWYCH GENERACJI '99

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
TRANSPORT z.35, nr kol. 1415

Eugeniusz KAŁUŻA
Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej, Politechnika Śląska

O PEWNYCH ASPEKTACH DOBORU ŹRÓDEŁ ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJNYCH AUTONOMICZNYCH LOKOMOTYW MANEWROWYCH

Streszczenie. W pracy omówiono wpływ doboru rodzaju źródeł zasilania w energię elektryczną lokomotyw manewrowych oraz wpływ doboru ich parametrów na efektywność eksploatacyjną lokomotyw. Przedmiotem analizy były zespoły prądotwórcze, baterie akumulatorowe oraz zespoły bezwładnikowe.

ON SOME ASPECTS OF SELECTING SUPPLY SOURCES FOR TRACTION MOTORS OF AUTONOMOUS SHUNTING LOCOMOTIVES

Summary. The paper describes the influence of selecting supply sources for the drive systems of shunting locomotives and the impact of the ratings' selection on the operational effectiveness of the locomotives. The analysis was focused on diesel-generator sets, batteries and inertial elements.

1. WSTĘP

Najczęściej stosowanymi źródłami zasilania silników trakcyjnych autonomicznych lokomotyw manewrowych są zespoły prądotwórcze zestawione z wysokoprężnych silników spalinowych i prądnic prądu stałego lub przemiennego. Przymiotnik „autonomicznych" wskazuje na lokomotywy uniezależnione od zewnętrznego źródła zasilania, czyli od systemu elektroenergetycznego połączonego z lokomotywami za pomocą sieci trakcyjnej. Rzadziej stosowanymi źródłami zasilania silników trakcyjnych wymienionych lokomotyw są elektrochemiczne zasobniki energii, czyli baterie akumulatorowe. Istnieją także rozwiązania lokomotyw dołowych, w których zastosowano elektromechaniczne zasobniki energii, czyli zespoły bezwładnikowe zestawione z bezwładnika i maszyny elektrycznej. Pierwsze z wyszczególnionych rozwiązań stosowane jest w lokomotywach spalinowo-elektrycznych (w lokomotywach spalinowych z przekładnią elektryczną), drugie rozwiązanie dotyczy lokomotyw akumulatorowych. Poza wyżej wyszczególnionymi typami lokomotyw wprowadzane są także do eksploatacji lokomotywy hybrydowe, wyposażone w co najmniej dwa różne źródła zasilania silników trakcyjnych, z których podstawowym źródłem energii jest zespół prądo-

twórczy, a pomocniczym, uruchamianym w czasie występowania szczytowych obciążeń lokomotywy, jest zasobnik energii.

Wadą uniwersalnych spalinowo-elektrycznych lokomotyw manewrowych jest niewspółmiernie wysokie zużycie paliwa w czasie realizacji pracy manewrowej charakteryzującej się niskim wykorzystaniem mocy znamionowej silnika spalinowego i wydłużonymi czasami pracy silnika przy biegu jałowym.

W obecnej dobie lokomotywy napędzane silnikami elektrycznymi zasilanymi poprzez przekształtnik z baterii akumulatorowej, czyli lokomotywy akumulatorowe, nie stanowią konkurencji dla lokomotyw spalinowych. Koszty eksploatacji lokomotyw akumulatorowych, uwzględniające odpisy amortyzacyjne, znacznie przekraczają koszty eksploatacji porównywalnych lokomotyw spalinowych. O poziomie kosztów stanowi w pierwszej kolejności wysoka cena zakupu baterii akumulatorowej o masie ok. 1/3 masy lokomotywy oraz konieczność wymiany zużytej baterii w odstępach czasu nie przekraczających kilku lat. Lokomotywy akumulatorowe charakteryzują się także w porównaniu z lokomotywami spalinowymi gorszymi parametrami technicznymi, a mianowicie mniejszym promieniem dojazdu oraz mniejszą prędkością maksymalną i mniejszymi przyspieszeniami w zakresie wyższych prędkości. Pomimo tych wad lokomotywy akumulatorowe są niezastąpione w podziemiach kopalń zagrożonych wybuchem, w halach fabrycznych i magazynach.

Rozwiązaniem ograniczającym negatywne cechy lokomotyw spalinowych i akumulatorowych są lokomotywy hybrydowe. W lokomotywach tych, przeznaczonych do pracy manewrowej, masa baterii może być znacznie mniejsza od masy baterii lokomotywy akumulatorowej. Dzięki ograniczeniu mocy znamionowej silnika spalinowego i stosowaniu hamowania rekuperacyjnego zużycie paliwa lokomotywy hybrydowej może zostać ograniczone o 10-20% w stosunku do zużycia paliwa porównywalnej lokomotywy spalinowej realizującej określoną pracę manewrową [1]. Rolę zasobnika energii w lokomotywie hybrydowej może także pełnić zespół bezwładnikowy.

2. PARAMETRY ENERGETYCZNE ŹRÓDEŁ ZASILANIA SILNIKÓW TRAKCYJNYCH AUTONOMICZNYCH LOKOMOTYW MANEWROWYCH

2.1. Zespoły prądotwórcze

Wymagana moc znamionowa silnika spalinowego zespołu prądotwórczego lokomotywy manewrowej wynika bezpośrednio z mocy jednostkowej lokomotywy [1] określonej zależnością [2]:

$$p_L = \frac{P_{Dn}}{m_L} = \frac{981\varphi_{ad}k_n k_R V_{min}}{360(1-\beta_p)\eta_{przek}} \quad \left[\frac{kW}{t}\right] \tag{1}$$

gdzie:

P_{Dn} - moc znamionowa silnika spalinowego lokomotywy w kW,

m_L - masa służbowa lokomotywy w t,

φ_{ad} - współczynnik przyczepności lokomotywy z szynami na prostym poziomym odcinku toru przy grupowym napędzie osi zestawów kołowych ($k_n = 1$) w N/N,

k_n - poprawka uwzględniająca zmniejszenie współczynnika przyczepności w zależności od rozwiązania układu napędowego lokomotywy $k_n = 1 - 0{,}7$,

k_R - poprawka uwzględniająca zmniejszenie współczynnika przyczepności na łuku o promieniu $R < 500$m ; $k_R = 1 - 0{,}8$,

β_p - stosunek mocy pobieranej przez urządzenia pomocnicze lokomotywy do mocy znamionowej silnika, m $\beta_p = P_p / P_{dn} = 0{,}07 \div 0{,}1$,
v_{min} - minimalna prędkość lokomotywy pracującej pełną mocą,
η_{przek} - sprawność przekładni elektrycznej.

Wymaganą moc znamionową prądnicy głównej o sprawności znamionowej η_{Gn} napędzanej silnikiem spalinowym o mocy P_{Dn} wyznacza zależność:

$$P_{Gn} = P_{Dn}(1-\beta_p)\eta_{Gn} \tag{2}$$

Dla lokomotywy manewrowej uniwersalnej o układzie osi BoBo i masie 72 t, przyjmując [1]: $v_{min} = 8$ km/h, $k_R = k_n = 0{,}9$, $\varphi_{ad} = 0{,}312$, $\beta_p = 0{,}09$, $\eta_{przek} = \eta_G\, \eta_M\, \eta_z = 0{,}88 * 0{,}85 * 0{,}96 = 0{,}718$ (dotyczy maksymalnych prądów obciążenia), otrzymamy:
$p_L = 8{,}43$ kW/t, $P_{Dn} = 607$ kW, $P_{Gn} = 503$ kW (przy $\eta_{Gn} = 0{,}91$)
Dla lokomotywy manewrowej uniwersalnej o układzie osi CoCo i masie 120 t, uwzględniając niższą wartość poprawki ($k_n = 0{,}75$ ze względu na większą podatność wpadania w poślizg lokomotywy o układzie osi CoCo), otrzymamy
$p_L = 7{,}03$ kW/t, $P_{Dn} = 844$ kW, $P_{Gn} = 699$ kW (przy $\eta_{Gn} = 0{,}91$)

Użytkowanie lokomotyw o mocy znamionowej przekraczającej moc zapotrzebowaną w danym rejonie pracy manewrowej jest przyczyną zbytecznego wzrostu zużycia paliwa. Zużycie paliwa w funkcji obciążenia odpowiadające prędkości obrotowej n_i można opisać zależnością:

$$G_{ni} = G_{oi} + dP_D \text{ [kg/h]} \tag{3}$$

gdzie:
G_{oi} - zużycie paliwa silnika spalinowego nieobciążonego przy prędkości obrotowej n_i [kg/h],
P_D - obciążenie na wale silnika spalinowego [kW],
d - współczynnik określający przyrost zużycia paliwa w funkcji obciążenia silnika [kg/kWh].

W czasie postoju, jazdy z wybiegu oraz hamowania lokomotywy z silnikiem spalinowym napędzającym nieobciążoną prądnicę główną oraz prądnicę i urządzenia pomocnicze, a więc w czasie pracy silnika „przy biegu jałowym" ($n = n_0$, $G_{ni} = G_{no}$), zużycie paliwa Gno wynosi około 10% zużycia w czasie pracy z pełną mocą [2]. Zużycie to w przybliżeniu jest proporcjonalne do mocy znamionowej silnika spalinowego. W czasie występowania niskich obciążeń zużycie paliwa odniesione do realizowanej pracy trakcyjnej jest znacznie zawyżone.

Wyniki badań obciążeń prądnic głównych lokomotyw serii SM31 o układzie osi CoCo o mocy $P_{Dn} = 883$ kW (1200 KM) pracujących na stacjach rozrządowych T.G. i Sz. oraz przy obsłudze bocznic stacji L. wykazały, że:
-łączny czas pracy silnika spalinowego „przy biegu jałowym" wynosił (na dziennych zmianach) od 70 do 80% łącznego czasu pracy i postoju lokomotywy,
- łączny czas pracy prądnicy głównej z mocą powyżej 500 kW nie przekraczał 0,3% łącznego czasu pracy i postoju lokomotywy,
- zastąpienie lokomotywy SM31 lokomotywą uniwersalną spalinową o mocy 1200 kW [4] w rejonach pracy manewrowej objętych badaniami zamiast spowodować ograniczenie zużycia paliwa, spowoduje jego dalsze powiększenie.

Przebiegi obciążeń prądnicy głównej lokomotywy SM31 występujące w czasie badań przedstawiono na rysunku 1, natomiast zestawienie wybranych parametrów obciążenia tej prądnicy w tabeli 1.

2.2. Baterie akumulatorowe

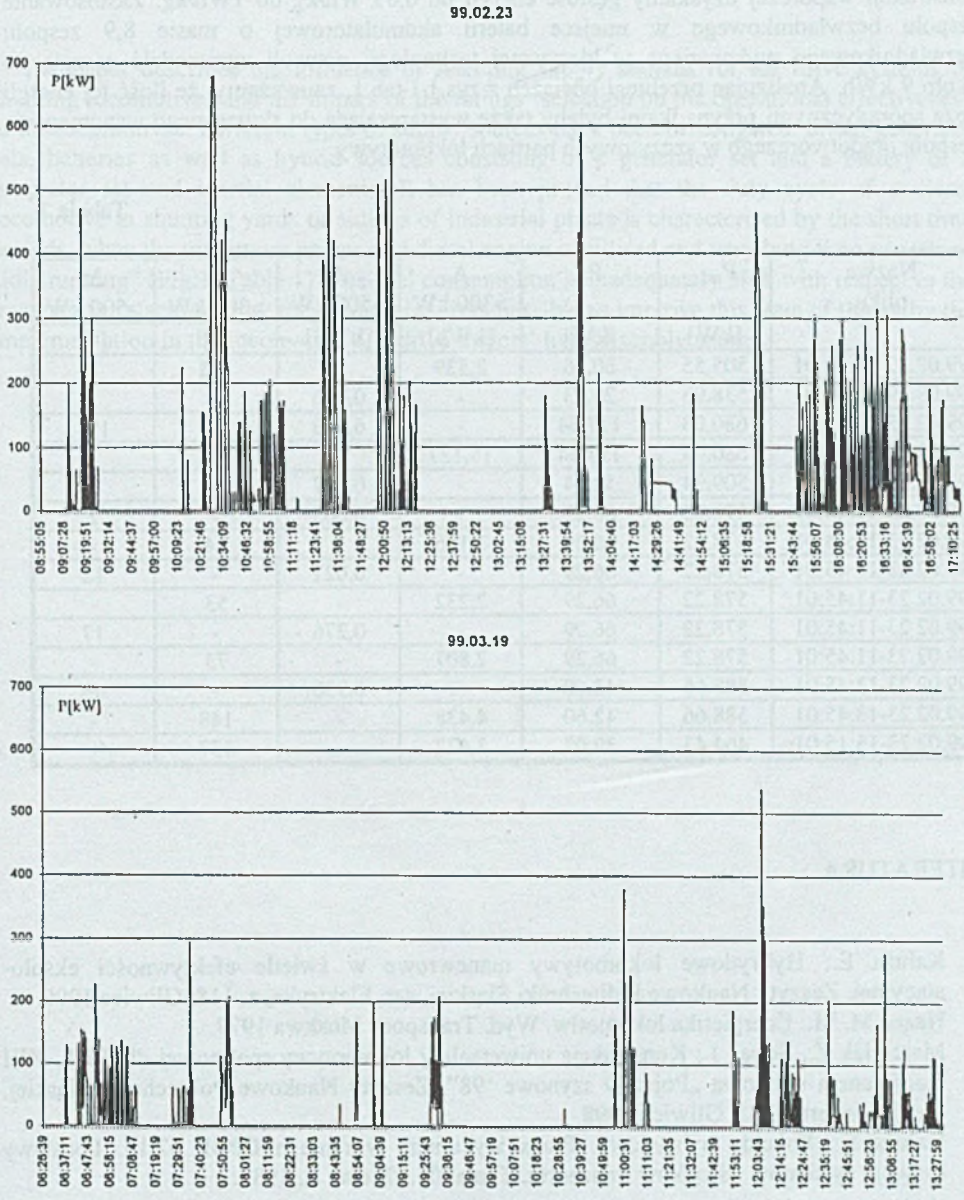
Zastosowanie baterii akumulatorowej jako jedynego źródła zasilania silników trakcyjnych lokomotywy przeznaczonej do pracy na torach stacji rozrządowych, gdzie czas pracy w ciągu doby wynosi ok. 20 godzin, jest nieefektywne z uwagi na:
- konieczność zwiększenia liczby lokomotyw w celu zapewnienia ciągłości obsługi stacji w czasie ładowania baterii,
- wysoki koszt zakupu baterii o masie co najmniej 20 t w celu zapewnienia niezbędnej mocy wyładowania i energii.
- konieczność wymiany zużytej baterii na nową w odstępach kilkuletnich.

Natomiast zastosowanie baterii akumulatorowej jako pomocniczego źródła zasilania silników trakcyjnych, wspomagającej zespół prądotwórczy w szczytowych partiach obciążeń, może zapewnić wysoką efektywność eksploatacji lokomotywy manewrowej (hybrydowej). Przeprowadzone analizy kosztów wykazały [2], że decydującymi czynnikami mającymi wpływ na przyrost korzyści związany z wprowadzeniem do eksploatacji lokomotyw hybrydowych w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych są:
- stosunek ceny jednostkowej baterii akumulatorowej do ceny jednostkowej paliwa,
- trwałość baterii akumulatorowej,
- czas wykorzystania mocy szczytowych silnika spalinowego (lokomotywy spalinowej),
- koszt amortyzacji i napraw silnika spalinowego zastosowanego w lokomotywie hybrydowej.

Najkorzystniejszy stosunek ceny jednostkowej baterii akumulatorowej do ceny jednostkowej paliwa uzyska się stosując baterie zestawione z ogniw ołowiowych trakcyjnych produkcji krajowej, których ograniczona trwałość w stosunku do porównywalnych ogniw importowanych kompensowana jest niższą ceną. Trwałość baterii akumulatorowej związana jest ściśle z gwarantowaną liczbą pełnych cykli ładowania i wyładowania ogniw, czyli z czasem występowania mocy szczytowych lokomotywy hybrydowej i poziomem mocy wyładowania baterii wynikającym z różnicy pomiędzy poziomem mocy szczytowej i mocą znamionową prądnicy głównej zespołu prądotwórczego. Mając na uwadze czasy występowania szczytów obciążenia Δt (tab.1, dla P.>300 kW) nie przekraczających kilkudziesięciu sekund, można przyjąć jako maksymalny prąd wyładowania równy 30- minutowemu prądowi wyładowania. Dla I_{30min} gęstość mocy wyładowania p_{30min} ogniw ołowiowych osiąga wartość około 26 W/kg, natomiast gęstość energi $q_{en30min}$ około 13 Wh/kg. Jeśli zastąpi się istniejący zespół prądotwórczy w lokomotywie SM31 o mocy znamionowej P_{Dn} = 883 kW i mocy wyjściowej prądnicy głównej P_{Gn} = 731 kW mniejszym zespołem, o mocy wyjściowej prądnicy głównej równej P'_{Gn} = 300 kW, niezbędna masa bateri akumulatorowej wyniesie; $m_B = (P_{Gn} - P'_{Gn})/p_{30min}$ = 8,9 t. Bateria przy p_{30min} będzie dysponowała energią równą $A_B = m_B\, q_{en30min}$ = 115,7 kWh, wielokrotnie przekraczające zapotrzebowanie [tab.1, $\sum A$ (dla P > 300 kW)]. Dzięki ograniczeniu mocy silnika spalinowego uzyska się zmniejszenie zużycia paliwa przez lokomotywę.

2.3. Zespoły bezwładnikowe

W lokomotywach hybrydowych można zastosować w miejsce baterii akumulatorowej zespół bezwładnikowy, należy jednak mieć na uwadze, że gęstości energii tych zespołów są znacznie niższe od gęstości energii akumulatorów. Przykłady obliczeń gęstości energii załączone w pracy [4] wykonane przy założeniu, że bezwładnik wykonany ze stali Cr-Ni o znaku 15H2N2 wg PN-65/H-8429 w postaci krążka z umieszczonym w środku otworem i zastosowanym współczynnikiem bezpieczeństwa X_w = 2,25 może wirować z prędkością obwodową równą 175,7 m/s. Dopuszczając zmiany prędkości w granicach od n_{max} do $0{,}5n_{max}$



Rys.1. Przebiegi obciążeń prądnicy głównej lokomotywy spalinowo-elektrycznej SM31 w czasie pracy manewrowej:
99.02.23. - praca manewrowa w rejonie górki rozrządowej stacji Sz,
99.03.19. - obsługa bocznic na stacji L.

Fig.1. The load courses of the main generator of SM31 diesel - electric locomotive during shunting:
99.02.23. - shunting in humpregion - Sz. station
99.03.19. - servicing of the siding - L. station

oraz uwzględniając niezbędną masę maszyny elektrycznej połączonej z krążkiem i konstrukcji wsporczej uzyskamy gęstość energii od 0,65 Wh/kg do 1Wh/kg. Zastosowanie zespołu bezwładnikowego w miejsce baterii akumulatorowej o masie 8,9 zespołu bezwładnikowego wykonanego w klasycznej technologii pozwoli zgromadzić energię do około 9 kWh. Analizując przebiegi obciążeń z rys.1 i tab.1, zauważamy, że ilość tej energii poza sporadycznymi przypadkami byłaby także wystarczająca do skutecznego wspomagania zespołu prądotwórczego w szczytowych partiach lokomotywy.

Tabela 1

Nazwa pliku	P_{max}	$P_{śr}$	A >300 kW	A >500 kW	Δt >300 kW	Δt >500 kW
	[kW]	[kW]	[kWh]	[kWh]	[s]	[s]
99.02.22-14:25:01	505,55	80,76	2,539	-	122	-
99.03.19-12:00:01	538,93	25,83	-	0,046	-	5
99.02.23-10:15:01	680,03	117,54	-	6,073	-	154
99.02.23-10:15:01	680,03	117,54	15,127	-	183	-
99.02.23-11:15:01	509,94	52,04	-	0,007	-	6
99.02.23-11:45:01	578,22	66,29	-	0,003	-	2
99.02.23-11:45:01	578,22	66,29	2,186	-	54	-
99.02.23-11:45:01	578,22	66,29	-	0,021	-	12
99.02.23-11:45:01	578,22	66,29	2,232	-	53	-
99.02.23-11:45:01	578,22	66,29	-	0,276	-	17
99.02.23-11:45:01	578,22	66,29	2,807	-	73	-
99.02.23-13:45:01	588,66	42,60	-	0,930	-	43
99.02.23-13:45:01	588,66	42,60	4,438	-	148	-
99.02.23-15:15:01	464,43	39,07	3,472	-	137	-

LITERATURA

1. Kałuża E.: Hybrydowe lokomotywy manewrowe w świetle efektywności eksploatacyjnej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Elektryka, z. 118, Gliwice 1990.
2. Hazen M. M.: Energietika lokomotiw. Wyd. Transport, Moskwa 1977.
3. Marciniak Z., Sobaś J.: Konstrukcja uniwersalnej lokomotywy spalinowej dla PKP. XIII Konferencja naukowa „Pojazdy szynowe '98". Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Transport, z. 31, Gliwice 1998.
4. Kałuża E.: Pojazdy hybrydowe. Praca wykonana w ramach CPBP 02.19. Podstawy rozwoju systemów i środków transportu. Temat 05.17, etap II, 1987.

Recenzent: Dr hab.inż. Jerzy Mikulik

Abstract

The paper describes the influence of selecting supply sources for the drive systems of shunting locomotives and the impact of the ratings' selection on the operational effectiveness of the locomotives. Different types of supply sources have been investigated: diesel-generator sets, batteries as well as hybrid sources consisting of a generator set and a battery or a generator set and inertial elements. It has been proved that the duty cycle of a diesel locomotive in shunting yards or sidings of industrial plants is characterised by the short time periods, when the maximum power of a diesel engine is utilised and very long time periods of „idle running" (Fig.1, Table 1). The fuel consumption is inadequately high with respect to the transport duty achieved by the locomotive. It is possible to improve this state of things by the implementation in the locomotive of a drive motors' hybrid supply source.