ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: TRANSPORT z. 27 Nr kol. 1295

Eugeniusz Kałuża

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI STOSOWANIA LOKOMOTYW HYBRYDOWYCH W PRACY MANEWROWEJ

Streszczenie. W pracy zaprezentowano przeprowadzone badania eksploatacyjne obciążeń silników spalinowych lokomotyw manewrowych. Wyniki badań obciążeń przedstawiono w postaci uporządkowanych i uśrednionych przebiegów mocy silników. W ramach analizy efektywności wyznaczono funkcję przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia do eksploatacji lokomotyw hybrydowych w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych.

AN ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF HYBRID SHUNTING LOKOMOTIVES

Summary. The subject of the paper covers an analysis and exploitational tests of engine loads in diesel shuting lokomotives. The results of these tests are presented as systematized and average load characteristic curves. Function of gain increment in exploiting diesel accumulator hybrid lokomotives, instead of previously used diesel lokomotives has been defined to analyze the engine supply system in traction lokomotives.

1. WSTĘP

Efektywność ekonomiczna hybrydowej lokomotywy spalinowo - zasobnikowej jest wyższa od efektywności porównywalnej lokomotywy spalinowej w pracach manewrowych charakteryzujących się niskim wykorzystaniem mocy silnika spalinowego. Wprowadzenie do układu zasilania silników trakcyjnych lokomotywy spalinowo - elektrycznej zasobnika energii, celem wyrównywania obciążeń silnika spalinowego, umożliwia ograniczenie jego mocy znamionowej. Rozwiązanie takie prowadzi do obniżenia zużycia paliwa oraz kosztów eksploatacji lokomotywy.

Efektywność lokomotywy hybrydowej determinowana jest:

- charakterystyką obciążenia lokomotywy,
- charakterystykami energetycznymi źródeł zasilania silników trakcyjnych,
- poziomem kosztów eksploatacji i amortyzacji zasobników energii oraz zespołów prądotwórczych.

Pojazdy hybrydowe są to pojazdy trakcyjne czerpiące energię z co najmniej dwóch źródeł energii. Pojazdy hybrydowe wyposażone są w zasadnicze źródło energii - silnik spalinowy oraz zasobnik energii. Zasobnik ten wspomaga silnik spalinowy w czasie szczytowego obciążenia pojazdu trakcyjnego, a uzupełniany jest w energię w czasie pracy silnika spalinowego z małą mocą lub w czasie hamowania pojazdu.

Jako zasobniki energii stosuje się najczęściej zasobnikowe elektrochemiczne źródła energii elektrycznej, czyli baterie akumulatorow lub zasobnikowe mechaniczne źródła energii, jak np. zespoły żyroskopowe.

2. EKSPLOATACYJNE BADANIA OBCIĄŻEŃ LOKOMOTYW SPALINOWYCH SERII SM42 I SM31

W celu uzyskania danych dotyczących przebiegów obciążeń lokomotyw manewrowych i przemysłowych przeprowadzono badania eksploatacyjne lokomotyw serii SM42 i SM31, pracujących na wybranych dużych stacjach rozrządowych PKP, na stacji osobowej oraz na stacjach zakładowych. Do badań obciążeń lokomotyw manewrowych wybrano lokomotywy spalinowe serii SM42 i SM31, stanowiące około 80% wszystkich lokomotyw manewrowych pracujących na stacjach PKP oraz ok. 40% lokomotyw na stacjach zakładowych, obsługujących tereny przemysłowe.

Badania obciążeń lokomotyw wykonywano w czasie :

- pracy lokomotywy na górce rozrządowej,
- pracy manewrowej na torze wyciągowym płaskim, polegającej na przestawianiu składów wagonów,
- wykonywania przez lokomotywę pracy miejscowej, jak obsługa bocznic i punktów ładunkowych oraz pracy na stacji osobowej PKP,
- realizacji pracy na stacji zakładowej Huty B.

Wyniki pomiarów obciążeń lokomotyw opracowano w celu uzyskania danych wyjściowych umożliwiających przeprowadzenie optymalnego doboru źródeł zasilania silników trakcyjnych specjalizowanej lokomotywy hybrydowej spalinowo - zasobnikowej. Zestawione chronologicznie wyniki pomiarów podzielone zostały na 30 - minutowe przedziały pracy. Podział ten wynikał z następujących przesłanek:

- 30 - minutowy przedział czasu pracy pokrywał się często z cyklami pracy lokomotywy lub ich krotnością,
- obciążenia maszyn elektrycznych lokomotyw, wyznaczone na podstawie dwóch przedziałów 30 - minutowych, można odnosić do ich parametrów znamionowych 1 -- godzinnych.

Dla każdego 30 - minutowego przedziału czasu pracy lokomotywy obliczono łączne czasy pracy silnika Δt_i obciążonego mocą P_{Di} dla kolejnych pozycji nastawnika jazdy lokomotywy.

W dalszej kolejności zgrupowano uporządkowane 30 - minutowe przedziały czasu pracy lokomotyw z uwzględnieniem serii lokomotywy oraz rodzaju realizowanej pracy manewrowej; wyniki czasów pracy na kolejnych pozycjach nastawnika jazdy w poszczególnych grupach uśredniono. Wyniki obliczeń uporządkowanych uśrednionych czasów pracy $\Delta t_{ur\,i}$ silnika spalinowego obciążonego mocą P_{Di} dla wybranych rodzajów pracy manewrowej przedstawiono w postaci uporządkowanych uśrednionych przebiegów obciążeń silnika spalinowego lokomotyw na rys. 1.

Przedstawione na rys. 1 przebiegi obciążeń aproksymowano w zakresie szczytowych obciążeń liniowo za pomocą równania:

$$P_D(t) = P_{max} - ct \tag{1}$$

Wartości P_{max} oraz współczynnika c wyznaczono z warunku (rys.1b):

$$\int_0^{t_k} P_D(t)\, dt = \sum_k^n P_i\, \Delta t_i \tag{2}$$

Analizując przedstawione wyniki pomiarów obciążeń lokomotyw pracujących na stacjach PKP oraz na stacjach zakładów przemysłowych można sformułować następujące wnioski:

a) obciążenie silników spalinowych lokomotyw manewrowych charakteryzują się dużą zmiennością,
b) zmiany obciążenia mieszczą się w całym zakresie dopuszczalnych obciążeń silników, lecz często obciążenia zbliżone do mocy znamionowej silników nie są w określonych rejonach pracy lokomotywy wykorzystywane,
c) łączny czas pracy silnika spalinowego z mocą większą od 50% jego mocy znamionowej mieści się w granicach od 3 do 11% czasu pracy lokomotywy,
d) średnia wartość czasu pracy silników spalinowych na biegu jałowym dochodzi do ok. 78% łącznego czasu pracy i postoju (praca lok. SM 42 na stacji osobowej),
e) decydującym czynnikiem mającym wpływ na przebiegi obciążeń ma rodzaj pracy manewrowej realizowanej przez lokomotywę,
f) największe obciążenie występuje w czasie pracy manewrowej na torze płaskim (przestawianie pełnych składów wagonów oraz odrzucanie wagonów),
g) czynnikiem decydującym o średniej wartości czasu pracy silnika spalinowego na biegu jałowym było występowanie długich postojów, kiedy lokomotywa z przyczyn organizacyjnych lub technicznych oczekiwała na możliwość dalszej kontynuacji pracy manewrowej. W związku z tym, że szczytowe obciążenia lokomotyw manew-rowych i przemysłowych występują sporadycznie, celowe jest przeprowadzenie analizy efektywności stosowania lokomotywy hybrydowej, w której obciążenia szczytowe będą pokrywane nie tylko przez silnik spalinowy, lecz także przez zasobnik energii.

3. ANALIZA EFEKTYWNOŚCI STOSOWANIA LOKOMOTYW HYBRYDOWYCH W PRACY MANEWROWEJ

3.1. Wprowadzenie

Przedstawiona w niniejszym rozdziale analiza efektywności stosowania lokomotyw hybrydowych obejmuje zagadnienia efektywności ekonomicznej. Do efektów nie ujętych w niniejszej analizie należą między innymi:

- ograniczenie substancji toksycznych emitowanych do atmosfery w wyniku ograniczenia zużycia paliwa przez lokomotywę hybrydową,
- poprawa warunków pracy maszynistów w wyniku ograniczenia wibracji i hałasu wywołanych pracą silnika spalinowego. Wibracje i hałas wzrastają z mocą znamionową silnika spalinowego.

Wskaźnik ekonomicznej efektywności można wyznaczyć jako stosunek rocznych kosztów eksploatacyjnych wraz z odpisami amortyzacyjnymi oraz oprocentowaniem nakładów inwestycyjnych do wielkości efektu użytkowego. Dla prawidłowo zaprojektowanej lokomotywy wskaźnik ten powinien osiągnąć wartość minimalną.

W niniejszej pracy analizę efektywności ekonomicznej sprowadzono do analizy przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia lokomotywy hybrydowej w miejsce lokomotywy spalinowej.

3.2. Analiza przyrostu korzyści wynikających z wprowadzenia lokomotyw hybrydowych

A.Wyznaczenie różnicy kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej

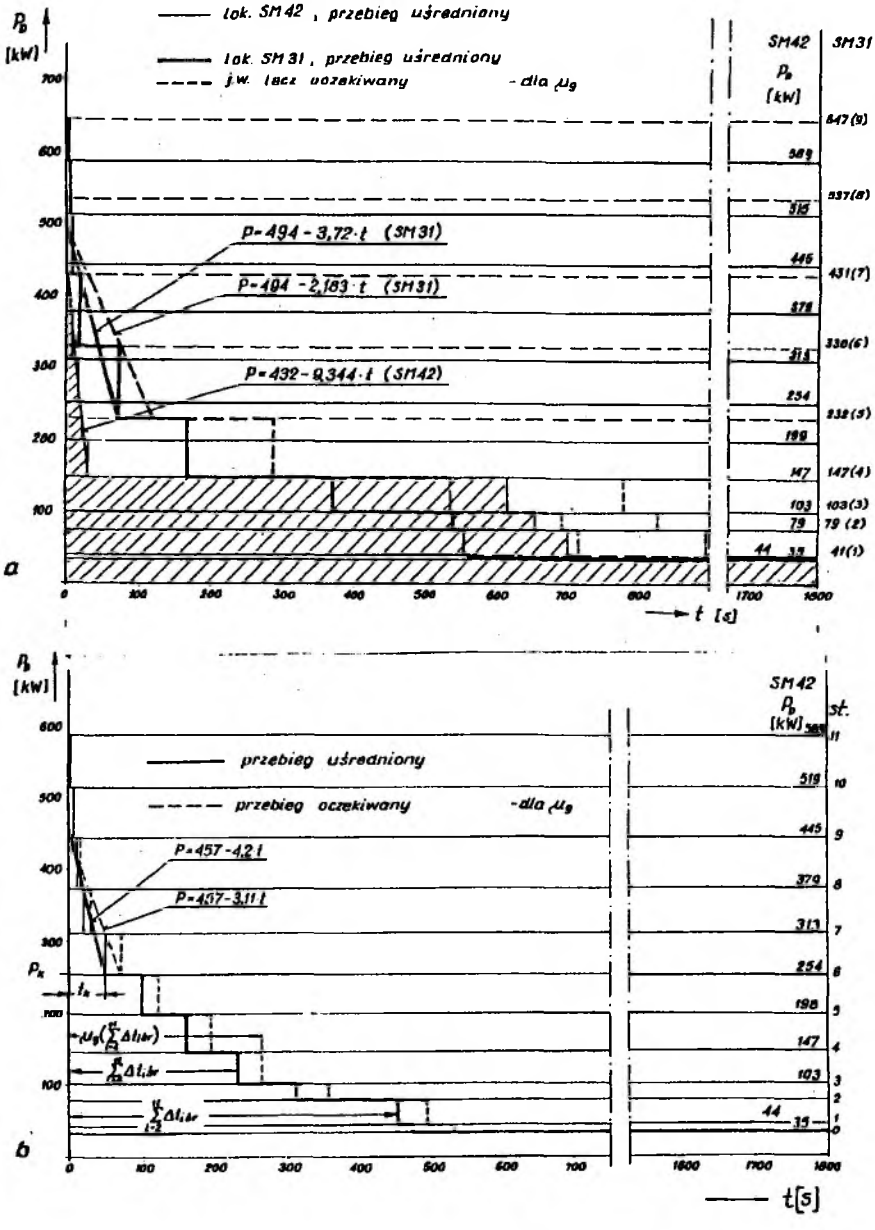
Niniejsza analiza przyrostu korzyści z wprowadzenia do eksploatacji manewrowych i przemysłowych lokomotyw hybrydowych w miejsce dotychczas eksploatowanych lokomotyw spalinowych odniesiona została do różnicy całkowitych rocznych kosztów eksploatacji lokomotyw spalinowych i hybrydowych. Różnica kosztów eksploatacji wynika z zastąpienia w spalinowej lokomotywie manewrowej zespołu prądotwórczego dużej mocy zespołem o mniejszej mocy, wspomaganym przez zasobnik energii.

Różnica całkowitych rocznych kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej wyznaczono przy następujących założeniach:

a) Koszty amortyzacji części lokomotywowni oraz koszty jej wyposażenia przypadające na jedną lokomotywę spalinową i hybrydową o tej samej liczbie osi napędnych i masie znoszą się w wyniku substytucji elementów składników kosztów.
Uwzględniając możliwość stosowania w lokomotywie hybrydowej hamowania ze zwrotem energii do zasobnika, otrzymamy z jednej strony niższe koszty wyposażenia lokomotywy w klocki hamulcowe, zaś z drugiej strony dodatkowe koszty związane z wyposażeniem lokomotywowni w urządzenia do ładowania baterii akumulatorów i ich konserwacji.

b) Różnica kosztów utrzymania brygad obsługi bieżącej lokomotyw i maszynistów dla porównywanych lokomotyw jest pomijalna. Koszt obsługi zasobnika złożonego np. z ogniw akumulatorowych kompensowany jest wyższym kosztem obsługi silnika spalinowego o mocy $P_{Dn} > P_{DHn}$ w lokomotywie spalinowej.

c) Różnica kosztów amortyzacji lokomotywy spalinowej i lokomotywy hybrydowej (bez uwzględnienia kosztów zasobnika) wynika z różnicy ceny zakupu ich zespołów prądotwórczych oraz urządzeń pomocniczych związanych z zespołem prądo-twórczym (ΔI_{DG}).



Rys. 1. Uporządkowane uśrednione przebiegi obciążeń silnika spalinowego lokomotyw realizujących pracę manewrową:
a) na górce rozrządowej; b) na stacji zakładowej Huty B

Fig. 1. Systematized average load courses of diesel lokomotive engine shunting:
a) at a hump; b) at Steel Plant B

Przyjmując, że cena zakupu zespołu prądotwórczego jest funkcją jego mocy znamionowej, można napisać:

$$\Delta I_G \cdot p_{am} = b_{DGI} (P_{Dn} - P_{DHn}) \cdot p_{am}, \tag{3}$$

gdzie:

P_{Dn} - moc znamionowa silnika spalinowego zespołu prądotwórczego lokomotywy spalinowej,

P_{DHn} - jw., lecz lokomotywy hybrydowej,

b_{DGI} - współczynnik określający składową ceny zespołu prądotwórczego proporcionalnej do jego mocy znamionowej,

p_{am} - odpisy amortyzacyjne.

d) Różnica kosztów napraw lokomotywy spalinowej i lokomotywy hybrydowej (bez tendra i zasobnika) wynika z różnicy kosztów napraw zespołów prądotwórczych oraz urządzeń pomocniczych porównywanych lokomotyw. Różnicę tych kosztów można sprowadzić do równania:

$$\Delta K_{LDrem} = b_{DGrem} (P_{Dn} - P_{DHn}), \tag{4}$$

gdzie:

b_{DGrem} - współczynnik określający składową kosztów napraw zespołu prądotwórczego proporcjonalną do jego mocy znamionowej.

e) Różnica kosztów zużycia paliwa i oleju silnikowego jest proporcjonalna do różnicy ilości zużytego paliwa i oleju silnikowego w czasie całorocznej eksploatacji przez lokomotywę spalinową i hybrydową. Różnicę ww. kosztów wyznaczono dla określonych rodzajów pracy manewrowej lokomotyw. Koszt zużywanego przez lokomotywy oleju silnikowego włączono do kosztu paliwa (oleju napędowego) poprzez współczynnik k_{ol}. Różnicę kosztów paliwa i oleju silnikowego można będzie obliczyć z zależności:

$$\begin{aligned} \Delta K_{LDpal} &= c_{jpal}(G_{LDr} - G_{LHr}) \cdot k_{ol} = \\ &= c_{jpal} \cdot k_{ol} \cdot N(G_{LD} - a_g - b_g \cdot P_{DHn} - dA_l), \end{aligned} \tag{5}$$

gdzie:

c_{jpal} - cena jednostkowa paliwa,

G_{LDr}, G_{LD} - zużycie paliwa przez silnik lokomotywy spalinowej w ciągu 1 roku, w przedziale 30 min.,

G_{LHr}, G_{LH} - jw., lecz lokomotywy hybrydowej,

N - liczba 30 - minutowych przedziałów czasu pracy lokomotywy realizującej określony rodzaj pracy manewrowej , przypadająca na 1 rok eksploatacji,

A_l - energia ładowania zasobnika,

d - współczynnik określający składową zużycia paliwa proporcionalną do mocy ładowania zasobnika.

W równaniu (5) roczne zużycie paliwa przez lokomotywę hybrydową przedstawiono w postaci sumy składowej zasadniczej rosnącej wraz z mocą znamionową silnika spalinowego i składowej związanej z ładowaniem zasobnika energii.

f) Koszt amortyzacji zasobnika energii K_{zam} złożonego z ogniw akumulatorowych proponuje się obliczyć z zależności:

$$K_{zam} = c_{jz} \cdot m_z \left[Lc(1\ rok):Lc(gw) + 1:T_z\right] \tag{6}$$

$$Lc(1\ rok) = K_q \cdot N/100\%, \tag{7}$$

gdzie:

c_{jz} - cena jednostkowa zasobnika,
m_z - masa zasobnika energii,
Lc(gw) - gwarantowana liczba cykli pracy zasobnika,
N - liczba 30 - minutowych przedziałów czasu pracy lokomotywy,
Lc(1 rok) - liczba pełnych cykli wyładowania i ładowania zasobnika w ciągu roku,
K_q - stopień wykorzystania 1 cyklu pracy ogniwa w % [1].

g) Koszt amortyzacji K_{dzam} urządzeń dodatkowych umożliwiających włączenie zasobnika do obwodu głównego lokomotywy określono na podstawie ceny przekształtnika I_{prz}, ceny instalacji dodatkowych I_{inst} oraz stopy amortyzacji p_{am}:

$$K_{dzam} = (I_{prz} + I_{inst})p_{am} \tag{8}$$

h) Koszty napraw K_{dzrem} ww. urządzeń przyjęto szacunkowo jako wartość stałą.

i) Koszty napraw zasobnika K_{zrem} uzależniono liniowo w funkcji masy zasobnika:

$$K_{zrem} = a_{zrem} + b_{zrem} m_z \tag{9}$$

Różnicę kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej sprowadzono po uwzględnieniu przyjętych założeń do następującej postaci:

$$\Delta K = b_{DGl}(P_{Dn} - P_{Dfin}) + b_{DGrem}(P_{Dn} - P_{Dfin}) + c_{jpal}(G_{LDr} - G_{LHr}) \cdot k_{el} - \sum K_z \tag{10}$$

$$\sum K_z = K_{zam} + K_{zrem} + K_{dzam} + K_{dzrem} \tag{11}$$

B. Wyznaczenie funkcji przyrostu korzyści związanych z zastąpieniem lokomotywy spalinowej lokomotywą hybrydową

W celu wyznaczenia różnicy kosztów eksploatacji w postaci funkcji ograniczonej do dwóch zmiennych, wprowadzono nową zmienną Y:

$$Y = P_{max} - P_{Dfin}, \tag{12}$$

zdefiniowaną jako zakres wyrównywania obciążeń silnika spalinowego lokomotywy hybrydowej. Powyższa wielkość związana jest bezpośrednio z funkcją opisującą zależność pomiędzy mocą silnika lokomotywy spalinowej P_D (1) w zakresie szczytowych obciążeń a łącznym czasem jej występowania na uporządkowanym uśrednionym przebiegu obciążenia (rys 1b).

Energię ładowania A_l (5) oraz stopień wykorzystania energii znamionowej zasobnika K_q (7) uzależniono od zakresu wyrównywania obciążeń silnika spalinowego Y, przebiegu jego obciążenia (współczynnik c w równaniu (1)) oraz masy zasobnika energii m_z [1] zgodnie z równaniami:

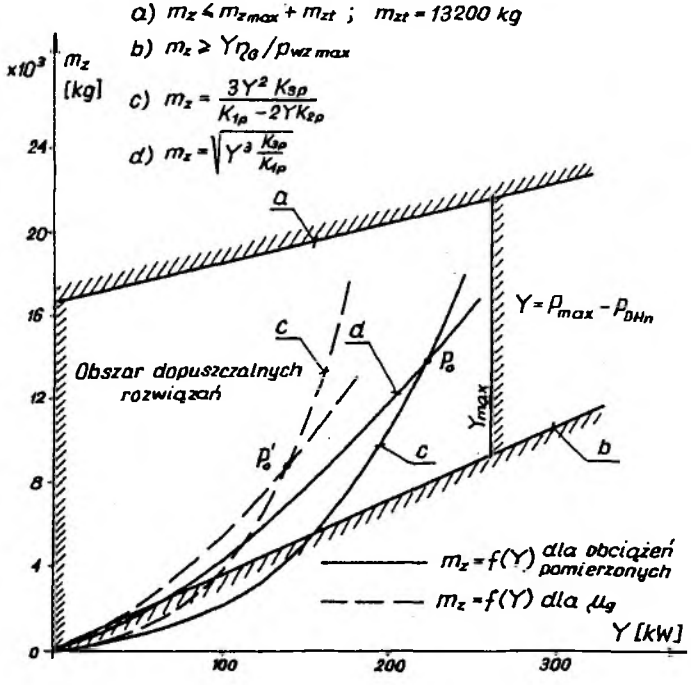
$$A_l = \frac{a_1}{c} Y^2 + \frac{b_1}{c \cdot m_z} Y^3 \tag{13}$$

$$K_e = \frac{a_2}{c \cdot m_z} Y^2 + \frac{b_2}{c \cdot m_z^2} Y^3 \tag{14}$$

Wykorzystując równania od (10) do (14) otrzymano nową postać zależności określającej różnicę kosztów eksploatacji lokomotywy spalinowej i hybrydowej. Dzieląc obie strony otrzymanej zależności przez cenę jednostkową paliwa c_{jpal} można wyznaczyć przyrost korzyści wynikających z zastąpienia lokomotywy spalinowej lokomotywą hybrydową w postaci uzyskanego paliwa ΔG_{rp} (15).

$$\Delta G_{rp} = K_{op} + K_{1p} Y - K_{2p} Y^2 - \frac{K_{3p}}{m_z} Y^3 - m_z \cdot K_{4p} \tag{15}$$

Ekstremum funkcji przyrostu korzyści występuje w punkcie przecięcia przebiegów zależności $m_z = f(Y)$ wyznaczonych z pierwszych pochodnych cząstkowych funkcji (15) - rys.2.



Rys.2. Przebiegi zależności pomiędzy masą zasobnika m_z i zakresem wyrównywania obciążeń wyznaczone na podstawie funkcji przyrostu korzyści dla lokomotywy hybrydowej o układzie osi $B_0B_0+B_0$

Fig. 2. Courses of dependences between mass m_z and load compensation range Y according to the function of gain increment for hybrid locomotive with the axis position $B_0B_0+B_0$

5.PODSUMOWANIE

Wyznaczona różnica kosztów eksploatacji (10) oraz funkcja przyrostu korzyści związanych z wprowadzeniem do eksploatacji lokomotyw hybrydowych (15) ujmuje nie tylko korzyści w postaci zmniejszonego zużycia paliwa przez ww. lokomotywę, lecz także korzyści związane z ograniczeniem sumy pozostałych składników kosztów eksploatacji.

Wyprowadzona funkcja przyrostu korzyści odniesiona została do jednostek towarowych - kg paliwa (15). Ta postać jest wygodna, kiedy ceny paliwa, ogniw akumulatorowych oraz pozostałego wyposażenia lokomotywy ulegają ciągłym zmianom. Czynnikami decydującymi o współrzędnych punktu $P_0(Y,m)$, w otoczeniu którego funkcja przyrostu korzyści osiąga wartość maksymalną, są:

- przebieg obciążenia lokomotywy spalinowej, w miejsce której wprowadzono lokomotywę hybrydową (dla górnego przedziału ufności wartości oczekiwanych μ_g czasów występowania obciążeń na poszczególnych poziomach mocy P_0 (Y,m) (rys.2) przemieszcza się do P_0' (Y,m)),
- ceny jednostkowe paliw i zasobników energii.

Przeprowadzone obliczenia korzyści wynikającej z wprowadzenia do eksploatacji w rejonie górki rozrządowej w miejsce lokomotywy SM31 lokomotywy hybrydowej o układzie osi $B_0B_0 + B_0$, wyposażonej w silnik spalinowy o mocy znamionowej P_{Dn} = 294.4 kW i zasobnik energii o masie m_z = 14000 kg, złożony z ogniw akumulatorowych 6A570, wykazały, że korzyść przeliczona na paliwo ΔG_{rp} (15) mieści się w granicach od 40 do 50 tysięcy kg paliwa na 1 lokomotywę w ciągu 1 roku. Na tę ilość paliwa składają się: rzeczywista różnica zużycia paliwa przez lokomotywę spalinową i hybrydową (24 ÷ 30 tys. kg) oraz ilość paliwa (16 ÷ 20 tys. kg), którą można kupić za ograniczenie pozostałych kosztów eksploatacji.

Recenzent: doc. dr inż. Zbigniew Ginalski

Wpłynęło do redakcji: 10.07.1995 r.

Literatura

[1] Kałuża E.: Hybrydowe lokomotywy manewrowe w świetle efektywności eksploatacyjnej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Elektryka z.118, Gliwice 1990.

Abstract

Th paper covers some problems connected with the design and running of hybrid shunting locomotives, which can be used on non-electrified tracks in shunting yards of Polish railways

(PKP) and on factory tracks. An analysis and run tests of engine loads of diesel shunting locomotives working on some selected tracks have been performed. The results of these tests are presented as systematized and average load characteristic curves of diesel locomotives shunting locally in shunting yards and factories, shunting at a hump and other places.

The energy characteristic curves defined in unit function of unload power have been determined. This has led to the derivation of some formulas for calculating the load energy (13) and usability percentage of cells' nominal energy (14). The said cells are used in the supply units of traction hybrid locomotive.

The dependence of the parameters mentioned above on the locomotive load, the ratings of diesel engine and characteristic curves of energy accumulator has been demonstrated.

In order to facilitate the analysis of engine supply system in traction locomotives the function of gain increment has been defined.