

Marek Babel

# Zwiększenie efektywności pracy lokomotyw spalinowych SM31 w eksploatacji

**Lokomotywy spalinowe eksploatowane od ponad 30 lat na PLK i w zakładach przemysłowych wymagają przeprowadzenia prac modernizacyjnych w celu zwiększenia ich technicznych i ekonomicznych wskaźników pracy, zdecydowanej poprawy warunków pracy maszynisty, wprowadzenia nowoczesnych rozwiązań technicznych zwiększających bezpieczeństwo ruchu.**

Zadanie to można zrealizować poprzez:

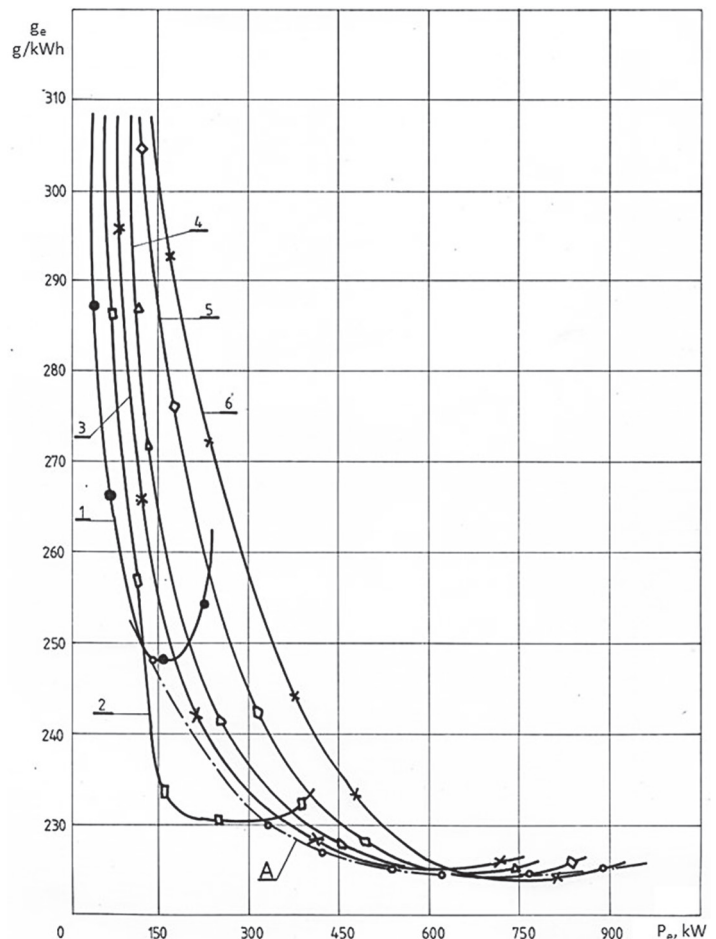
- kompleksową modernizację określonej partii lokomotyw według ustalonego zakresu, popartego oceną efektywności modernizacji na podstawie analiz kosztów cyklu trwałości LCC;
- modernizację wybranych zespołów lub układów lokomotywy, np. w trakcie napraw okresowych, jeżeli pozwoli to osiągnąć wymierne efekty w eksploatacji przy stosunkowo niewielkich nakładach finansowych.

W artykule przedstawiono propozycję modernizacji układu regulacji mocy zespołu napędowego lokomotyw serii SM31 z zastosowaniem nowej charakterystyki eksploatacyjnej silnika a8C22W i elektronicznego regulatora obrotów i mocy.

Wykorzystywane do ciężkich prac manewrowych lokomotywy spalinowe SM31 wyposażone są w wysokodładowane silniki a8C22W. Silniki te pracują w warunkach często zmieniających się obciążeń i zakresów prędkości. Badania wykazały, iż lokomotywa taka pracuje najczęściej w zakresie 20–30% mocy nominalnej. Z ogólnego czasu pracy silnika pod obciążeniem stany przejściowe wynoszą do 40–50%, praca na biegu jałowym wynosi średnio 50–60% całkowitego czasu eksploatacji lokomotywy. Podczas pracy na stacji towarowej w lokomotywach manewrowych w ciągu 1 godziny wykonywanych jest około 400 przełączeń nastawnika jazdy, w tej liczbie przy zwiększaniu obciążenia około 300, z których tylko 5 ze stanów ustalonych – liczba przełączeń typu zmniejszanie/zwiększanie obciążenia wynosi 80. Jest to przyczyną występowania takich negatywnych zjawisk, jak zwiększenie zużycia paliwa, zadymienia spalin, zanieczyszczenie układu wylotowego oraz znaczny wzrost obciążeń cieplnych w układzie tłok–cylinder silnika spalinowego. Badania eksperymentalne właściwości dynamicznych lokomotyw SM31 przeprowadzone na oporniku wodnym Lokomotywni Warszawa – Odolany i w Newag S.A. wykazały, że procesowi zwiększania obciążenia towarzyszy silne zadymienie spalin, praktycznie dla wszystkich najczęściej występujących w eksploatacji warunków pracy silnika. Stopień zadymienia spalin wynosił od 50–90 stopni w 100-stopniowej skali Hartridge. Podczas pracy silnika w stanach ustalonych dla mocy nominalnej zadymienie spalin wynosi ok. 25 stopni Hartridge. Prowadzi to do zmniejszenia niezawodności silników, skrócenia okresu ich eksploatacji i w efekcie do

zwiększenia kosztów związanych z przestojem lokomotyw, na naprawy awaryjne i części zamienne. Wnioski te potwierdzają się w przypadku eksploatacji lokomotyw spalinowych SM31 z silnikami a8C22W [1].

Wyniki badań dowodzą, że dla zwiększenia niezawodności silników spalinowych konieczna jest poprawa jakości pracy w stanach przejściowych, które w znacznej mierze są zależne od czasu osiągania żądanego poziomu mocy. Lepszą jakość pracy silników w stanach przejściowych można osiągnąć poprzez racjonalny wybór charakterystyki eksploatacyjnej. W lokomotywach SM31 charakterystykę eksploatacyjną silnika spalinowego wybrano z założeniem osiągnięcia minimalnego zużycia paliwa, tzw. charakterystyka ekonomiczna (rys.1). Przedmiotową charaktery-



Rys. 1. Charakterystyki jednostkowego zużycia paliwa silników a8C22W dla charakterystyk obciążeniowych

1 –  $\omega_s = 52 \text{ rad/s}$ ; 2 –  $\omega_s = 67 \text{ rad/s}$ ; 3 –  $\omega_s = 82 \text{ rad/s}$ ; 4 –  $\omega_s = 90 \text{ rad/s}$ ; 5 –  $\omega_s = 97 \text{ rad/s}$ ; 6 –  $\omega_s = 105 \text{ rad/s}$ ; A – charakterystyka eksploatacyjna (ekonomiczna)

stykę wykreślono na podstawie badań stanowiskowych przy ustalonych warunkach pracy silnika. Przedstawione wyniki eksploatacji lokomotyw SM31 dowodzą, że konieczne jest powiązanie charakterystyk silników spalinowych z warunkami ich pracy w eksploatacji. Dlatego też wybór racjonalnego poziomu charakterystyki eksploatacyjnej dla lokomotywy SM31 wymaga zastosowania matematycznego modelowania reżimów pracy zespołu silnik – prądnica a8C22W z symulacją pracy lokomotywy w eksploatacji i uwzględnieniem parametrów niezawodności na podstawie wybranego kryterium.

W wyniku prac autora opracowano modele matematyczne pracy silników spalinowych a8C22 na lokomotywach SM42 i a8C22W na lokomotywach SM31 [2,3]. W opracowanym modelu matematycznym obieg pracy silnika rozpatrywany jest w sposób uproszczony na podstawie ocen całościowych i danych doświadczalnych. Model matematyczny pracy silnika a8C22W w warunkach ustalonych i stanach przejściowych uwzględnia wspólną pracę części tłokowej silnika z urządzeniami doładowującymi (turbosprężarką), włączając układ sterujący dawkowaniem paliwa i obciążeniem silnika, układy wlotu powietrza i wylotów spalin, znajdujących się na lokomotywie SM31 oraz odbiornik mocy. Model układu część tłokowa silnika – turbosprężarka zo-

stał po raz pierwszy opracowany na podstawie układu nieliniowych równań algebraicznych bez konieczności wprowadzenia równań różniczkowych procesu wymiany ładunku i wylotu spalin. Pozwoliło to znacznie skrócić czas obliczeń i opracować model nadający się do wielokrotnych obliczeń optymalizacyjnych przy zmianach parametrów pracy silnika spalinowego w warunkach eksploatacji. Porównanie wskaźników pracy i charakterystyk silników a8C22W w warunkach ustalonych i stanach przejściowych, otrzymanych z obliczeń, z wynikami badań eksperymentalnych lokomotywy na oporniku wodnym, wykazało dostateczną zbieżność wyników (rys. 2 i 3), co pozwala wykorzystać opracowany model do obliczeń optymalizacyjnych.

Celem przeprowadzenia oceny porównawczej efektywności pracy lokomotywy SM31 przy istniejącej charakterystyce eksploatacyjnej silnika oraz przy jej zmianie, model matematyczny procesów roboczych silnika a8C22W został dopełniony modelem symulacyjnym, pozwalającym odwzorować warunki pracy manewrowej i przewozowej lokomotywy SM31 w eksploatacji. Warunki pracy lokomotywy zadawane są w postaci histogramy przedstawiającej rozkład wykorzystywanej mocy lokomotywy (moc na obwodzie kół napędnych) w zależności od czasu pracy lokomotywy pod obciążeniem. Liczbę pojedynczych cykli pracy lokomotywy oraz liczbę przełączeń nastawnika jazdy w czasie wykonania przez lokomotywę zadanej pracy przyjęto z danych eksperymentalnych.

Wybór racjonalnych charakterystyk eksploatacyjnych dla zespołu silnik–prądnica z uwzględnieniem procesów przejściowych i stanów ustalonych odbywa się według minimum kryterium kosztów:

$$W_{\Sigma} = (C_P + C_R + C_{RN}) \cdot T_L$$

gdzie:

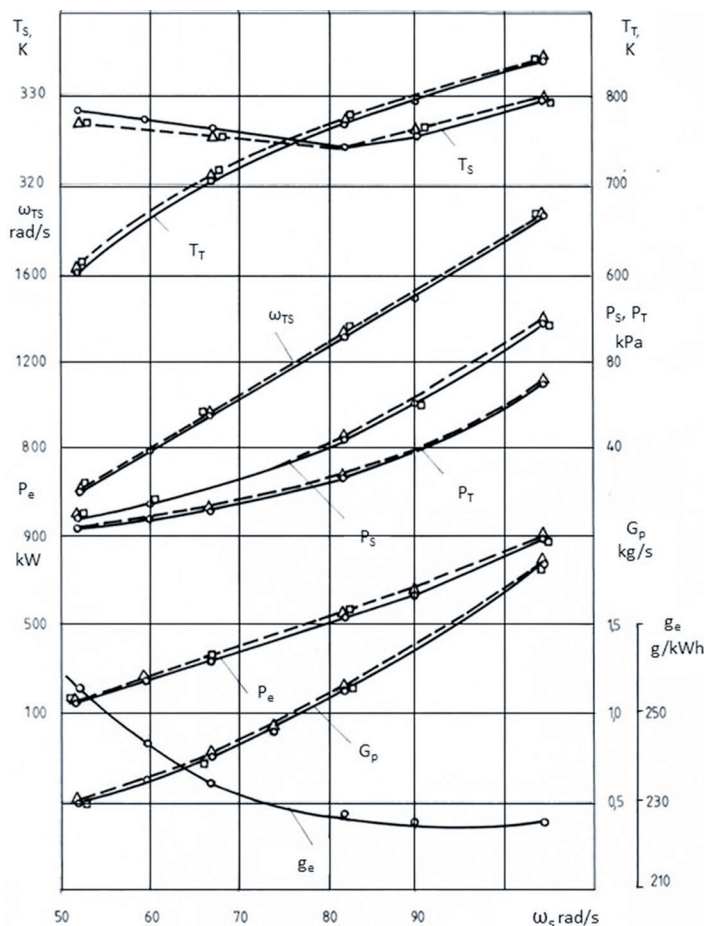
$C_P$  – koszt zużytego paliwa za okres  $T_L$  wykonania przez lokomotywę zadanej pracy trakcyjnej,

$C_R$  – koszty napraw bieżących i planowej obsługi silnika w okresie jednego cyklu naprawczego,

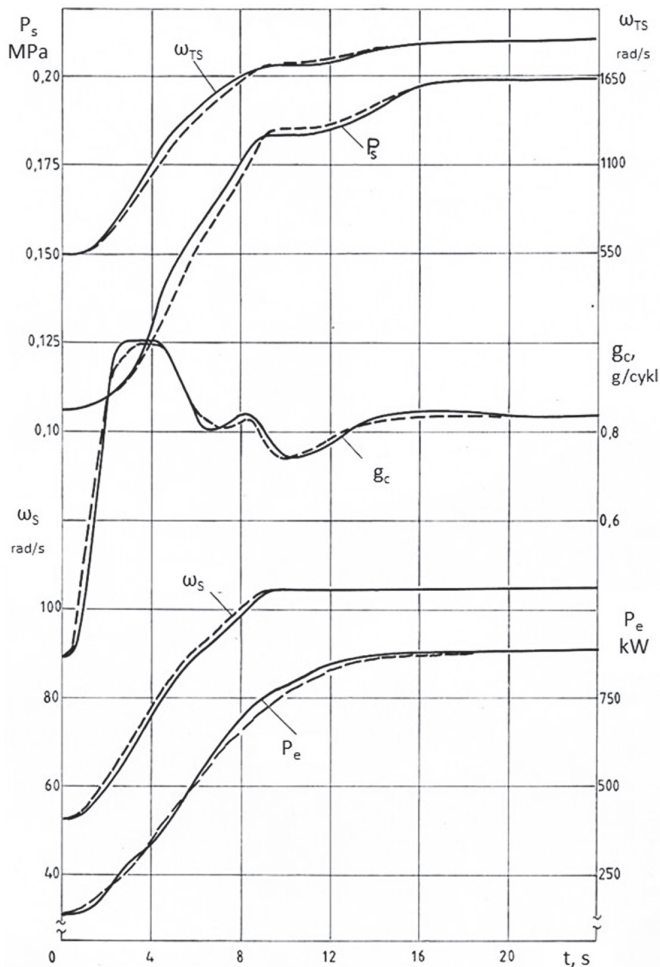
$C_{RN}$  – koszt napraw nieplanowych (np.: elementów układu tłok–cylinder) związanych z występowaniem awaryjnych uszkodzeń w eksploatacji.

Wskaźniki pracy silnika i lokomotywy za okres  $T_L$  (np. zużycie paliwa) obliczane są poprzez modelowanie pracy zespołu napędowego lokomotywy SM31 w warunkach eksploatacji. Koszt napraw bieżących  $C_R$  jest obliczany w zależności od średniej eksploatacyjnej prędkości kątowej wału korbowego silnika przy znanym sumarycznym koszcie napraw i przeglądów w ciągu jednego cyklu naprawczego. Wielkość  $C_{RN}$  jest liniowo zależna od trwałości elementów układu tłok–cylinder silnika, która to z kolei uwarunkowana jest ilością nagromadzonych uszkodzeń. Ilościowa ocena zmiany trwałości elementów układu tłok–cylinder silnika a8C22W (głowic cylindrowych) odbywa się w przybliżeniu z wykorzystaniem krzywej zmęczenia żeliwa szarego i liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w zależności od maksymalnych obliczonych wartości temperatur spalin przed turbiną [2].

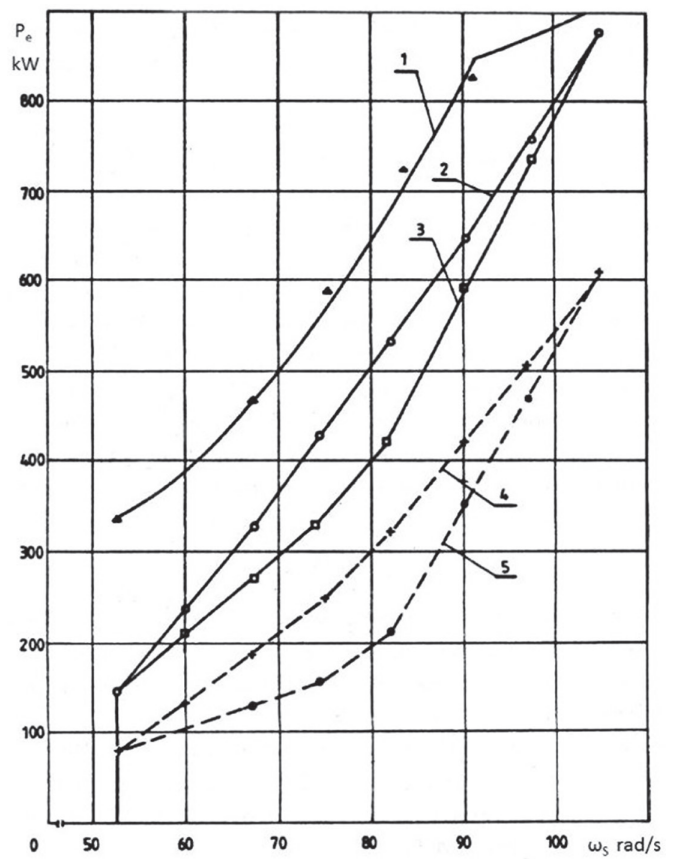
Opierając się na przedstawionych założeniach, opracowano metodykę wyboru charakterystyk eksploatacyj-



Rys. 2. Parametry pracy silnika a8C22W dla charakterystyki eksploatacyjnej  
 $T_s, T_T$  – temperatury powietrza w kolektorze zasilającym i spalin przed turbiną;  $\omega_{TS}, \omega_s$  – prędkość kątowa wirnika turbosprężarki i wału korbowego silnika;  $P_s, P_T$  – ciśnienie powietrza doładowania i spalin przed turbiną;  $P_e$  – moc efektywna silnika spalinowego;  $G_p$  – zużycie powietrza;  $G_e$  – jednostkowe zużycie paliwa; linia ciągła – dane z badań eksperymentalnych; linia przerywana – dane z obliczeń



Rys. 3. Charakterystyki procesu przejścia przy zwiększaniu obciążenia silnika a8C22W z poz. IV na poz. XI nastawnika jazdy  
 $\omega_{Ts}$ ,  $\omega_s$  – prędkość kątowa wirnika turbosprężarki i wału korbowego silnika;  $P_s$  – ciśnienie powietrza doładowania;  $g_c$  – zużycie paliwa na cykl pracy silnika (wysuw listwy paliwowej);  $P_e$  – moc efektywna silnika spalinowego; linia ciągła – dane z badań eksperymentalnych; linia przerywana – dane z obliczeń



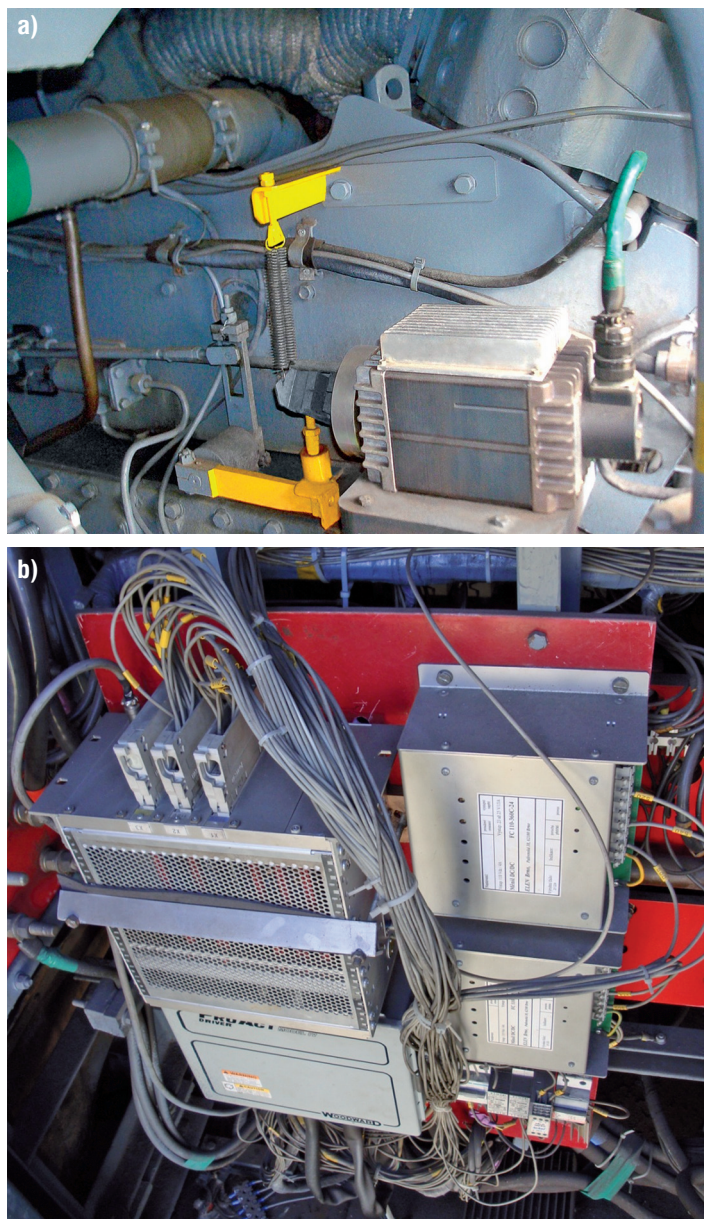
Rys. 4. Charakterystyki silnika a8C22W lokomotywy SM31  
 1 – charakterystyka graniczna – dopuszczalna temperatura spalin przed turbiną  $[T_T] = 850$  K; 2, 3 – charakterystyki eksploatacyjne – aktualna zgodna z DTR lokomotywy i proponowana na podstawie minimum kryteria  $W_{\Sigma}$ ; 4, 5 – charakterystyki selektywne – aktualna i proponowana dla charakterystyki 3

nych i przeprowadzono obliczenia dla lokomotywy SM31 z silnikiem spalinowym a8C22W. Obliczenia przeprowadzono zarówno dla warunków ciężkiej pracy manewrowej lokomotywy SM31 (znaczący udział procesów przejściowych), jak i dla pracy pociągowej (większy udział stanów ustalonych). Podstawowe wnioski z obliczeń są następujące.

- Przy istniejącym na lokomotywie SM31 układzie sterowania charakterystykę eksploatacyjną należy obniżyć w porównaniu z istniejącą o 20–23% w zakresie prędkości kątowej wału korbowego 75–80 rad/s (poz. 3 rys. 4).
- Obniżenie charakterystyki doprowadzi do zmniejszenia wartości temperatur spalin przed turbiną o 100–120 K podczas pracy silnika w stanach przejściowych, co przyczyni się do znacznego zmniejszenia obciążeń cieplnych elementów układu tłok–cylinder. Przybliżona ocena trwałości głowic cylindrowych wykazała, że wymienione zmniejszenie obciążeń cieplnych prowadzi do 2,5-krotnego zwiększenia trwałości obliczeniowej głowic cylindrowych. Należy przyjąć, że w nie mniejszym stopniu zwiększy się trwałość tłoków aluminiowych, zaworów wlotowych i wylotowych oraz podzespołów turbosprężarki.

- Zużycie paliwa w eksploatacji oraz czas osiągnięcia zadanego poziomu mocy dla zaproponowanej charakterystyki eksploatacyjnej, z uwzględnieniem pracy silnika w stanach ustalonych i przejściowych, nie uległy pogorszeniu i pozostają praktycznie na poziomie jak dla dotychczasowej charakterystyki silnika a8C22W.

Wdrożenie zaproponowanej charakterystyki na lokomotywie SM31 przy aktualnie istniejącym układzie sterowania wymaga zastosowania regulatora elektronicznego na silniku spalinowym. W wyniku prac autora, firmy LOKEL i Newag S.A. opracowały i wdrożyły elektroniczny regulator obrotów i mocy (fot. 1) na silniku spalinowym a8C22 lokomotywy SM42. Organ wykonawczy regulatora – siłownik elektryczny firmy Woodward, zabudowano w miejscu dotychczasowego regulatora PGEV bez zmian konstrukcyjnych układu dźwigni pomp wtryskowych na silniku spalinowym. Sterownik regulatora wraz z osprzętem zlokalizowano w szafie elektrycznej lokomotywy. Czujniki ciśnienia oleju silnika i obrotów wału korbowego dostarczają niezbędne sygnały do sterownika regulatora. Badania stanowiskowe oraz ponad trzyletni okres eksploatacji lokomotywy SM42 z przedmiotowym regulatorem wykazały poprawne i niezawodne jego działanie. Układ regulacji obrotów i mocy na lokomotywie działa stabilnie zarówno w stanach ustalonych, jak i w procesach przejściowych. Montaż regulatora elektronicznego na lokomotywie może odbywać się w trakcie planowych napraw rewizyjnych lokomotywy.



Fot. 1. Elektroniczny regulator obrotów i mocy silnika spalinowego a8C22  
a – siłownik elektryczny regulatora; b – sterownik regulatora wraz z osprzętem

Wdrożenie przedmiotowego regulatora na silnikach a8C22W pozwoli na realizację w układzie regulacji mocy lokomotywy SM31 zaproponowanej przez autora charakterystyki eksploatacyjnej, co przyczyni się do:

- stabilizacji nastaw mocy agregatu prądowłórczego na poszczególnych pozycjach nastawnika jazdy;
- znacznego zwiększenia niezawodności podzespołów silników a8C22W: głowic cylindrowych, tłoków, aparatu kierowniczego i wirnika turbosprężarki;
- zmniejszenia kosztów napraw awaryjnych silników a8C22W i związanych z tym kosztów nieplanowych postojów lokomotyw SM31;
- zmniejszenia w procesach przejściowych ilości niespalonego paliwa przepływającego do miski olejowej silnika poprzez ograniczenie dawki paliwa przez regulator elektroniczny, co przyczyni się do zmniejszenia spadku lepkości oleju smarującego i w efekcie obniżenia kosztów jego wymiany;
- zmniejszenia zadymienia spalin, co może wiązać się z wielkością ewentualnych opłat środowiskowych ponoszonych przez użytkownika lokomotyw SM31.

□

#### Literatura

- [1] Dudziński W., Marciniak J., Wolfram T.: *Wyniki badań niezawodności silnika spalinowego a8C22W. Metoda badania i wytyczne poprawy trwałości silników spalinowych a8C22W lokomotywy SM31*. COBiRTK, Warszawa 1987.
- [2] Babel M.: *Zwiększenie efektywności pracy silników wysokoprężnych a8C22W lokomotyw spalinowych na drodze dopasowania charakterystyk obciążeniowych do warunków eksploatacji*. Rozprawa doktorska, MIIT, Moskwa 1989.
- [3] Kossov E., Babel M.: *Zagadnienia modelowania eksploatacyjnych warunków pracy trakcyjnych silników spalinowych*. Silniki Spalinowe 2/1988, HCP Poznań, s. 27–31.

dr inż. Marek Babel  
Instytut Pojazdów Szynowych PK