

Andrzej SADOWSKI, Bogdan ŻÓLTOWSKI

e-mail: a.sadowski@utp.edu.pl

Zakład Pojazdów i Diagnostyki, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Wyznaczanie sprawności układu przeniesienia napędu w aspekcie badań rozptyłu energii samochodu ciężarowo-terenowego

### Wstęp

Z uwagi na wyczerpujące się zasoby energetyczne w gospodarce paliw ropopochodnych oraz narastające zanieczyszczenie środowiska naturalnego istnieje pilna potrzeba ograniczenia zużycia paliw, co wiąże się bezpośrednio ze stanem zdatności i rozptyłem energii wykorzystywanych masowo pojazdów użytkowych.

Zapotrzebowanie na metody i środki umożliwiające skuteczny wgląd w przyczyny oraz skutki występowania strat energii w pojazdach ciężarowych to wyzwania, z którymi należy się zmierzyć dostępnymi środkami i w możliwie krótkim czasie.

Poszukiwania rozwiązań mających na celu zmniejszenie zużycia paliwa obok prac nad usprawnieniem silnika, koncentrują się głównie na optymalizacji konstrukcji pojazdu. Wynika stąd celowość poszukiwania rozwiązań prowadzących do minimalizacji energochłonności, przy jednocześnie jak najniższych stratach przetwarzania i przekazywania energii.

Energochłonność ruchu oraz sprawność układu napędowego są wielkościami decydującymi o zużyciu paliwa, którego wartość jest podstawowym miernikiem jakości energetycznej konstrukcji i eksploatacji pojazdu.

W procesie przekształceń energii w układzie napędowym pojazdów zachodzi szereg procesów, którym towarzyszy występowanie strat. Przy zmiennej prędkości samochodu, suma strat energetycznych może przekraczać 80% energii doprowadzonej do tłokowego silnika spalinowego. Łączny udział strat energetycznych określa sprawność napędu, będąca iloczynem sprawności użytecznej silnika i sprawności układu przeniesienia napędu.

Analiza zjawisk w procesie przekształceń i przekazywania energii oraz metody określania dróg jej rozptyłu umożliwiają wyznaczenie sprawności poszczególnych podzespołów układu napędowego.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie metody wyznaczania sprawności układu przeniesienia napędu w aspekcie zrealizowanych badań rozptyłu energii samochodu ciężarowo-terenowego.

### Rozptył energii w układzie przeniesienia napędu

Rozptył energii wiązany jest bezpośrednio z takimi zagadnieniami jak: bilans energetyczny, sprawność mechaniczna omawianego obiektu, energochłonność, oraz występujące w nim straty energii. Pełni rolę zestawienia ilościowego mocy przekazywanej oraz traconej w poszcze-

gólnych elementach układu napędowego. Energia mechaniczna pobierana od silnika zostaje poprzez szereg mechanizmów doprowadzona do kół napędzanych samochodu. Zostaje W wyniku momentu obrotowego przyłożonego do osi kół napędzanych powstaje styczna reakcja nawierzchni powodująca ruch samochodu. Strumień mocy płynący od silnika zostaje rozdzielony na mniejsze strumienie płynące do poszczególnych kół. Ilość energii doprowadzonej do poszczególnych kół w zależności od warunków ruchu samochodu oraz w zależności od zastosowanych mechanizmów rozdziału strumienia mocy nie jest równa [Arczyński, 1994; Jedliński, 2007; Kolor, 2010].

Energia mechaniczna uzyskana w silniku musi być przeniesiona na koła samochodu, aby pojazd mógł się poruszać. Mechanizmy użyte do przeniesienia tej energii nazywane są mechanizmami przeniesienia napędu, a cały układ układem napędowym. Za podstawowy stan ruchu samochodu należy uznać jazdę wymuszoną momentem obrotowym przekazywanym z silnika kołom napędzanym. W takim przypadku niezbędny całkowity wydatek energii, wyrażony iloczynem ilości doprowadzonego paliwa  $G_L$  [dm<sup>3</sup>] i jego wartości opałowej  $W_d$  [kJ/dm<sup>3</sup>], zwany energochłonnością całkowitą, określa suma energochłonności ruchu oraz straty energetyczne w silniku i układzie przeniesienia napędu [Silka, 1997; Lisowski, 2003; Sadowski i Żółtowski, 2010]:

$$G_L W_d = E + \Delta E_s + \Delta E_p \quad (1)$$

gdzie:

$E$  – energochłonność ruchu, [kJ],

$\Delta E_s$  – straty powstające w trakcie przetwarzania energii w silniku, [kJ],

$\Delta E_p$  – straty powstające w trakcie przekazywania energii w układzie przeniesienia napędu [kJ],

Straty te są zazwyczaj uwzględniane w postaci współczynników sprawności:

$$G_L W_d = \frac{E}{\eta_n} \quad (2)$$

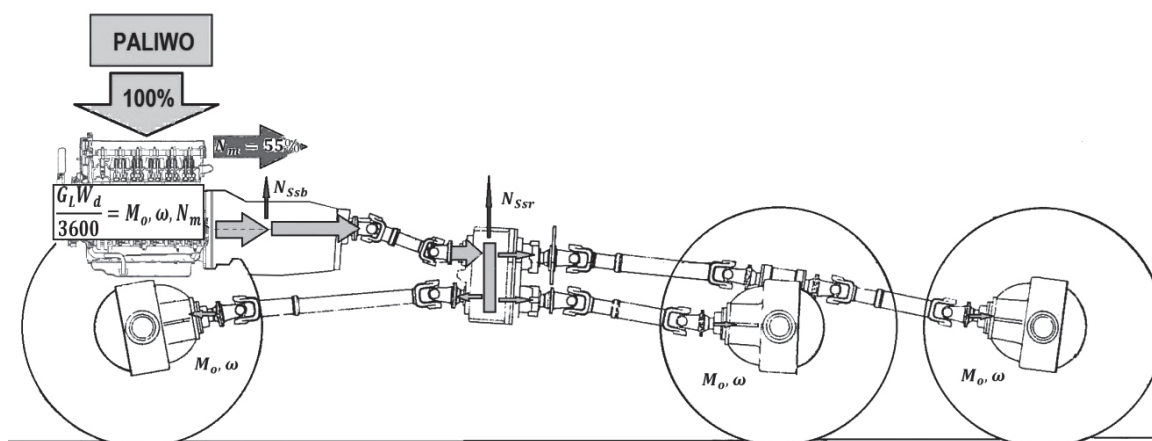
gdzie:

$\eta_n$  – sprawność napędu.

Sprawność napędu jest iloczynem sprawności użytecznej silnika  $\eta_e$  i sprawności układu przeniesienia napędu  $\eta_p$ .

$$\eta_n = \eta_e \eta_p \quad (3)$$

Strumień mocy przepływając przez każdy z mechanizmów układu przeniesienia napędu zmniejsza się, co spowodowane jest występującymi tam oporami (Rys. 1). Omawiane straty energetyczne można



Rys. 1. Przemiany energetyczne w układzie napędowym [Źródło własne]

scharakteryzować sprawnością mechaniczną poszczególnych elementów układu przeniesienia napędu, jak również całkowitą sprawnością układu przeniesienia napędu.

Sprawność mechaniczna jest określana jako stosunek energii wykorzystanej do energii doprowadzonej w tym samym czasie. Zwiększenie sprawności jest równoznaczne ze zmniejszeniem zużycia energii. Sposób wyznaczania rozplywu energii w układzie napędowym uzależniony jest od sposobu połączenia poszczególnych elementów składowych [Żółtowski i Ćwik, 1996; Jedliński, 2007; Sadowski i Żółtowski, 2012].

### Metoda pomiaru sprawności podzespołów

Energia przepływająca przez układ przeniesienia napędu jest moment obrotowy oraz prędkość obrotowa uzyskiwana w wyniku procesów zachodzących w silniku spalinowym, a związanych z przemianą energii chemicznej zawartej w paliwie na energię mechaniczną. W wyniku pomiaru i porównania energii uzyskanej na wyjściu do energii zasilania danego podzespołu otrzymuje się jego współczynnik sprawności, określający wielkość strat energetycznych.

Do ilościowego określenia strat zaproponowano metodę wyznaczania sprawności układu polegającą na pomiarze wielkości przenoszonego momentu obrotowego w poszczególnych punktach układu przeniesienia napędu.

Pomiar wielkości przenoszonego momentu obrotowego realizowano sposobem bezkontaktowy za pomocą tensometrii oporowej w warunkach eksploatacyjnych na podstawie odkształcenia wału bez konieczności zmian układu napędowego [Milek, 2006; Sadowski i in., 2013].

Metoda pomiaru opiera się na pomiarze wielkości napięcia na wyjściu mostka tensometrycznego, proporcjonalnej do wartości odkształcenia powstającego na wale napędowym wskutek obciążenia go momentem obrotowym:

$$\varepsilon = \frac{2AU}{akU_o} \quad (4)$$

$$M_o = \frac{\pi}{8} \varepsilon G (D^3 - d^3) \quad (5)$$

gdzie:

- $a$  – wzmacnienie sygnału
- $D$  – średnica zewnętrzna wału, [m]

- $d$  – średnica wewnętrzna wału, [m]
- $G$  – moduł Kirchoffa, [Pa]
- $k$  – stała tensometru, [mV/V]
- $U_o$  – napięcie wzbudzenia tensometru, [V]
- $\Delta U$  – przyrost napięcia (napięcie mierzone), [V]
- $\varepsilon$  – odkształcenie wału (mierzone)

Wybrana lokalizacja punktów pomiarowych, zaprezentowana na rys. 2, ma na celu minimalną ingerencję w konstrukcję układu napędowego, a jednocześnie możliwość weryfikacji sygnału pomiarowego z poszczególnych odcinków badanego układu. [Łukowski i in., 1976; Milek, 2006; Sadowski i in., 2013].

W badaniach wykorzystano aparaturę pomiarową z telemetryczną transmisją sygnału pomiarowego pozwalającą na bezprzewodowy pomiar momentu obrotowego z akwizycją danych pomiarowych w postaci sygnału napięciowego.

### Obiekt badań

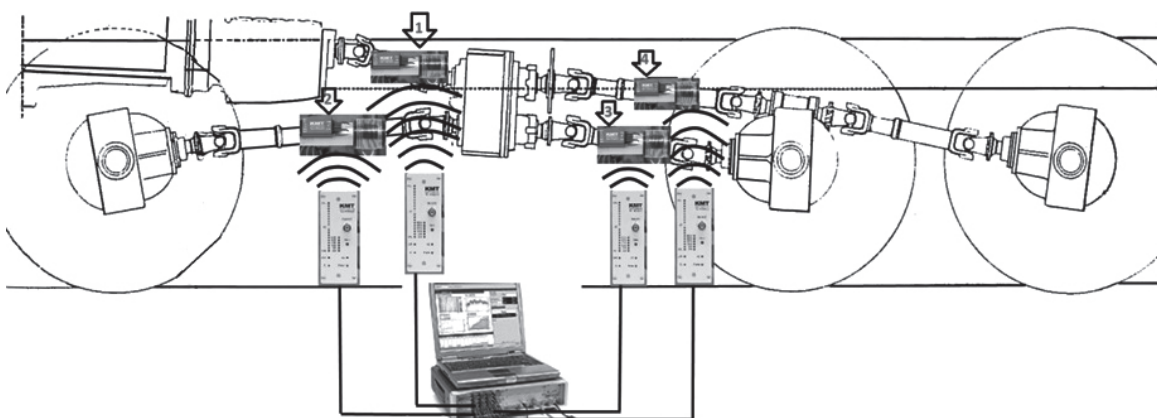
Obiektem badań był układ napędowy pojazdu ciężarowo-terenowego marki Star model 266M2, przedstawiony na rys. 3, będący na wyposażeniu *Wojskowego Instytutu Techniki Panczernej i Samochodowej* w Sulejówku.

Zaprezentowany pojazd został zmodernizowany w roku 2012 w *AUTOBOX Starachowice* z wersji 266 do 266M2. Podstawowe zmiany podczas procesu modernizacji dotyczące układu napędowego objęły:

- montaż silnika *IVECO* typ F4AE0481 o mocy 125 kW (170KM) oraz o maksymalnym momencie obrotowym 560 Nm (wg danych uzyskanych od producenta silnika).
- montaż skrzyni biegów *Eaton* o sześciu przełożeniach,
- wszystkie zespoły samochodu (m.in. mosty napędowe, skrzynia rozdzielcza, wały napędowe) poddane zostały naprawie głównej.

### Przygotowanie obiektu do badań

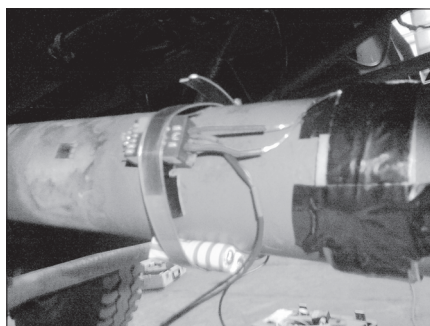
Przygotowanie obiektu do badań polegało na przygotowaniu powierzchni wałów napędowych pod naklejenie tensometrów, co wiązało się z koniecznością miejscowego oczyszczenia wału z warstwy lakierniczej. Do klejenia tensometru stosowano klej cianoakrylowy. Następnie tensometr poddawano dosychaniu w podwyższonej temperaturze.



Rys. 2. Punkty pomiarowe w układzie przeniesienia napędu wraz z aparaturą pomiarową [Źródło własne]



Rys. 3. Obiekt badań STAR 266M2 [Źródło własne]



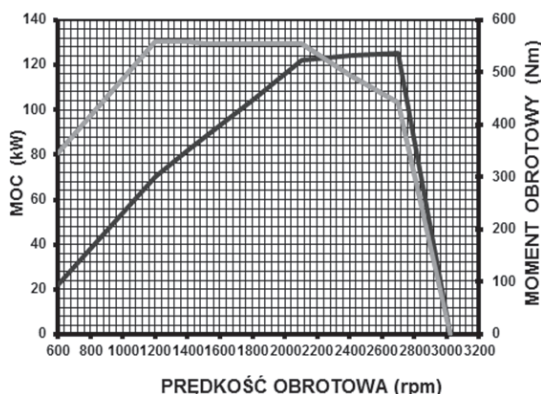
Rys. 4. Układ pomiarowy w trakcie montażu na wale napędowym [Źródło własne]

Enkoder wraz z anteną nadawczą zabezpieczono taśmą ferromagnetyczną eliminującą zakłócenia sygnału pomiarowego, a sposób montażu przedstawiono na rys. 4. Dzięki zaopatrzeniu systemu pomiarowego w dodatkowe źródło zasilania zwiększono odległość między anteną nadawczą a odbiorczą z 50 do 150 mm. Umożliwiło to dokonanie pomiaru w eksploatacyjnych warunkach pracy układów napędowego i zawieszenia.

### Warunki badań

Badanie przeprowadzono na otwartym terenie o nawierzchni utwardzonej sześciokątnymi płytami betonowymi typu trylinka. Temperatura powietrza podczas pomiaru wynosiła 21 °C, przy wilgotności względnej powietrza 88%, ciśnienie atmosferyczne: 1014 hPa, prędkość wiatru: 2 km/h. Badania zrealizowano przy ustalonej prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1512 obr/min oraz trzecim biegu, co odpowiada przełożeniu skrzyni biegów 1 : 2,80.

Wartości uzyskane z charakterystyki zewnętrznej silnika (Rys. 5) oraz wyniki obliczeń przełożeń realizowanych w przekładniach były następujące:



Rys. 5. Charakterystyka silnika IVECO F4AE0481A [IVECO MOTORS]

### Silnik:

- Prędkość obrotowa 1512 obr/min,
- Moment obrotowy 555 Nm,

### Skrzynia biegów:

- Przełożenie w skrzyni biegów na biegu III (1 : 2,8),
- Prędkość obrotowa 540 obr/min,
- Moment obrotowy 1554 Nm,

### Skrzynia rozdzielcza:

- Przełożenie w skrzyni rozdzielczej na biegu drogowym (1 : 1),
- Prędkość obrotowa 540 obr/min.

### Wyniki badań

Pomiary wykonano w trzech próbach na prostym odcinku drogi. W ich wyniku otrzymano wartości napięcia. Częstotliwość próbkowania ustalono na poziomie 41 kHz. Wyniki zarejestrowano, a następnie w trakcie analizy po uśrednieniu bloków pomiarowych zmniejszono do 1 kHz.

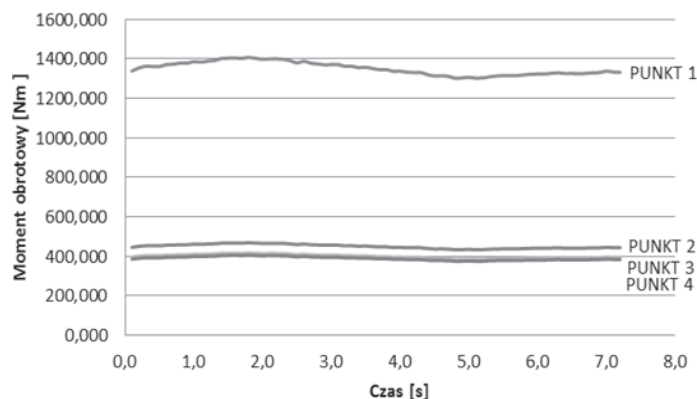
**Odształcenie wałów  $\varepsilon$**  wyznaczono z zależności (4) dla:

- przyrostu napięcia (napięcie zmierzone)  $\Delta U$ , V
- wzmocnienia sygnału  $a = 8000$ ,
- stałej tensometru  $k = 2,075 \text{ mV/V}$
- napięcia wzbudzenia tensometru  $U_0 = 4 \text{ V}$

Następnie uzyskane wartości odkształcenia  $\varepsilon$  wykorzystano w zależności (5) na moment obrotowy  $M_o$  dla:

- modułu odkształcalności postaciowej  $G = 80 \text{ GPa}$ ,
- średnicy zewnętrznej  $D = 70 \text{ mm}$ ,
- średnicy wewnętrznej  $d = 64 \text{ mm}$ .

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości momentu obrotowego w oznaczonych punktach pomiarowych. Zaprezentowano je na rys. 6.



Rys. 6. Przebieg czasowy momentu obrotowego dla punktów pomiarowych

Na podstawie uzyskanych wyników i ustalonych warunków badań określono następujące parametry energetyczne dla skrzyni rozdzielczej:

- **Wejście** (punkt pomiarowy 1) wartość uśredniona = 1351 Nm,
- **Wyjścia** (punkty pomiarowe 2, 3, 4) suma wartości uśrednionych = 1238 Nm.

### Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań zarejestrowano moment obrotowy w skrzyni rozdzielczej pomniejszony o wartość strat energii, co umożliwiło wyznaczenie sprawności tego podzespołu.

Na podstawie uzyskanych danych pomiarowych wyznaczono sprawność skrzyni rozdzielczej, która wynosi 91,66%.

Opierając się na danych dotyczących wartości mocy i momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej, zawartych w charakterystyce zewnętrznej silnika oraz przedstawionych warunkach badań można stwierdzić, że moment obrotowy dostarczony do skrzyni rozdzielczej jest momentem wyjściowym skrzyni biegów. Wynika stąd, że sprawność odcinka układu napędowego między silnikiem a skrzynią rozdzielczą wynosi 86,95%.

### LITERATURA

- Arczyński S., 1994. *Mechanika ruchu samochodu*. WNT, Warszawa
- IVECO MOTORS – Karta charakterystyki silnika F4AE0481A
- Jedliński R., 2007. *Podwozia Samochodów. Podstawy teorii i konstrukcji*. Wyd. UTP, Bydgoszcz
- Kolator B., 2010. *Studium doskonalenia procesu funkcjonowania agregatu maszynowego w warunkach polowych*. Wyd. UTP, Bydgoszcz
- Lisowski M., 2003. *Teoria ruchu samochodu – Teoria napędu*. Wyd. Pol. Szczecińskiej, Szczecin
- Łukowski Z., Pałacha R., Kukliński Z., Zapłotyński W., 1976. *Naprawa samochodów Star 266*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa
- Milek M., 2006. *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Wyd. Uniw. Zielonogórskiego, Zielona Góra
- Sadowski A., Żółtowski B., 2010. Appointing the efficiency of the arrangement of moving the drive. *Studies and Proceedings of Polish Association for Knowledge Management*, **35**, 128-135
- Sadowski A., Żółtowski B., 2012. Badania sprawności złożonych układów napędowych. *Inż. Ap. Chem.*, **51**, nr 5, 249-250
- Sadowski A., Żółtowski B., Kałaczyński T., Łukasiewicz M., 2013. *Monitoring transmission of the energy in driving systems of machines* [in:] B. Żółtowski B., Shalapko J. (Eds). *Interdisciplinary integration of science in technology, education and economy*. 171-175, Khmelnytsky-Yaremche, Ukraina
- Siłka W., 1997. *Energochłonność ruchu samochodu*. WNT, Warszawa
- Żółtowski B., Ćwik Z., 1996. *Leksykon diagnostyki technicznej* Wyd. ATR, Bydgoszcz