

Andrzej SADOWSKI, Bogdan ŻÓŁTOWSKI

WERYFIKACJA METODY BADAWCZEJ ROZPŁYWU ENERGII W UKŁADZIE NAPĘDOWYM

Streszczenie: W pracy przedstawiono weryfikację metody badawczej rozplywu energii w układzie napędowym samochodu ciężarowo-terenowego. Jako obiekt badań wykorzystano samochód marki STAR 266M2 o napędzie na wszystkie trzy osie. Pomiarzy poprzedzone zostały analizą układu napędowego, na podstawie której wyznaczono punkty pomiarowe. Sposób wykonania pomiarów obejmował wykorzystanie tensometrii oporowej w celu wyznaczenia odkształceń wałów napędowych w efekcie przeniesionego momentu obrotowego. Uzyskane wyniki badań mogą ułatwić identyfikację miejsc występowania strat energii w układzie napędowym pojazdów będących w procesie eksploatacji.

Słowa kluczowe: rozplyw energii, pomiary, moment obrotowy, straty energii

1. WSTĘP

Maszynę stanowi na ogół napędzany, pod wpływem impulsu wywołanego lub zadanego przez człowieka, mechanizm lub zespół mechanizmów przeznaczony do wykonywania żądanej pracy związanej z procesem produkcji, przekształceniem energii. Główną częścią składową maszyny jest element aktywny, który bezpośrednio uczestniczy w przemianie energii, przekazywaniu mocy, przetwarzaniu rodzajów ruchów roboczych na inne ich rodzaje, przenoszeniu obciążeń [9].

Przykładem elementu aktywnego maszyny jest układ napędowy, który przekształca i przekazuje energię na kolejne jej części składowe, tworząc zespół połączonych ze sobą mechanizmów. Członem w tym układzie uczestniczą w transformowaniu i przekazywaniu energii z członów napędzających na członny bierne, czyli obciążone siłami oporu. Nie cała jednak praca sił czynnych zostaje wykorzystana do zamierzonych celów użytecznych. Część energii zostaje zużyta na pokonanie towarzyszących ruchom oporów tarcia i rozprasza się w otoczeniu w postaci ciepła, część zaś gromadzi się w samym mechanizmie jako energia kinematyczna, a czasem także potencjalna [1].

Strumień energii, przepływając przez każdy z tych mechanizmów, zmniejsza się, co spowodowane jest występującymi tam oporami. W układzie napę-

dowym, pozbawionym urządzeń pracujących z ciągłym poślizgiem, dominującym źródłem strat energetycznych są przekładnie.

O wartości strat energetycznych w układzie napędowym decydują czynniki:

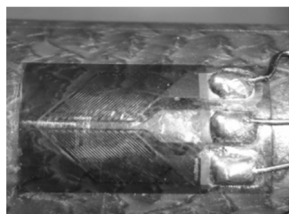
- konstrukcyjne (budowa podzespołów, parametry zazębień itp.),
- ruchowe (prędkość kątowna i przenoszony moment obrotowy, opory ruchu),
- eksploatacyjne (ilość i właściwości smarne oleju, temperatura, stan zdatności obiektu).

Rozpływ energii w układzie napędowym zależy od wielu czynników zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych i pełni rolę stanu chwilowego dla ściśle określonych warunków pracy danego obiektu [3, 4, 7].

Celem pracy jest weryfikacja metody badawczej na podstawie analizy danych uzyskanych w trakcie realizacji badań oraz ocena wrażliwości systemu pomiarowego na zmiany zachodzące w obiekcie badań.

2. METODYKA BADAŃ

Metoda pomiaru opierała się na pomiarze napięcia, uzyskiwanego na wyjściu mostka tensometrycznego, proporcjonalnego do wartości odkształcenia, powstającego na wale napędowym wskutek obciążenia go momentem obrotowym. Z teorii wytrzymałości materiałów wiadomo, że w walcowym elemencie skręcanym maksymalne odkształcenia występują pod kątem 45° do głównej osi skręcania. Wskazuje to na konieczność precyzyjnego przeprowadzenia montażu tensometrów w celu uzyskania wiarygodnego sygnału pomiarowego. W przeprowadzonym eksperymencie wykorzystano tensometry przeznaczone do pomiarów momentu obrotowego (rys. 1), wykonane w półmostku pomiarowym Wheatstone'a.



Rys. 1. Tensometry wykorzystywane w pomiarach (z lewej) – stanowisko laboratoryjne, (z prawej) – tensometr zainstalowany na wale napędowym obiektu badań
Fig.1. Strain gauges used in measuring (left) – the position of Laboratory, (right) – a strain gauge mounted on the drive shaft of the test object

Moment, rozumiany jako działanie pary sił stycznych do powierzchni bocznej walca, powoduje w wyniku elastyczności walca jego odkształcenie sprężyste [2, 6]. Można je wyznaczyć za pomocą zależności (1) określającej odkształcenie wału na podstawie napięcia zmierzonego na wyjściu mostka tensometrycznego. Dwukrotna wartość napięcia zmierzonego, wynikająca z zastosowanego rodzaju tensometru, jest odwrotnie proporcjonalna do iloczynu wzmocnienia sygnału, stałej tensometru oraz napięcia wzbudzenia:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \Delta U}{a \cdot k \cdot U_o} \quad (1)$$

gdzie:

- ΔU – przyrost napięcia (napięcie zmierzone), V,
- a – wzmacnienie sygnału,
- U_o – napięcie wzbudzenia tensometru, V,
- k – stała tensometru, mV/V.

Po uzyskaniu wartości odkształcenia wału można wyznaczyć wartość momentu obrotowego dla wału drążonego za pomocą zależności (2):

$$M_o = \frac{1}{8} \cdot \varepsilon \cdot G \cdot \pi \cdot (D^3 - d^3) \quad (2)$$

gdzie:

- G – moduł Kirchoffa, Pa,
- ε – odkształcenie wału (mierzone),
- D – średnica zewnętrzna wału, m,
- d – średnica wewnętrzna wału, m.

Znając wielkość momentu obrotowego oraz prędkość obrotową wału napędowego, na którym dokonano pomiaru, istnieje możliwość wyznaczenia mocy, co przedstawia zależność (3):

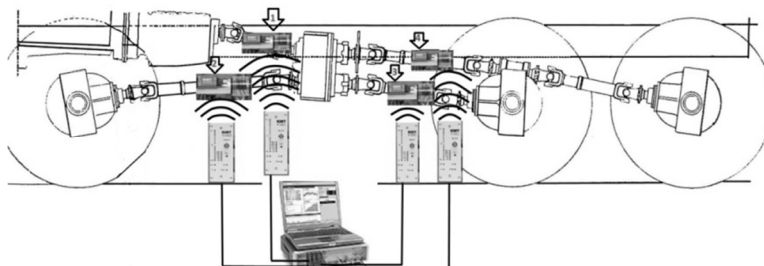
$$P = \frac{M_o \cdot n}{9549,3} \quad (3)$$

gdzie:

- M_o – moment obrotowy, Nm,
- n – prędkość obrotowa, obr·min⁻¹.

Do pomiaru odkształcenia wykorzystano tensometry firmy Micro-Mesurments Vishay Precision Group, przeznaczone do pomiaru momentu obrotowego (rys. 1), o następującej charakterystyce: rezystancja $350\Omega \pm 0,4\%$, stała tensometru 2,075, rozeta tensometru złożona z dwóch części pod kątem 90°, połączonych elektrycznie w półmostku Wheatstone'a.

Realizowane badanie polega na pomiarze momentu obrotowego w punktach pomiarowych przedstawionych na rysunku 2. Sygnał pomiarowy zarejestrowano w celu dokonania dalszych analiz za pomocą analizatora sygnałów LMS SCADAS Recorder oraz aplikacji programowych Testxpress.



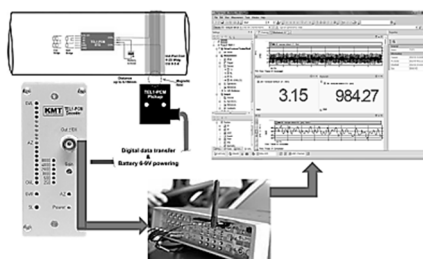
Rys. 2. Punkty pomiarowe w układzie przeniesienia napędu [źródło własne]
 Fig. 2. Measuring points in the transmission system [own source]

W celu wyboru techniki pomiarowej przeprowadzono analizę i przyjęto następujące kryteria wyboru:

- wprowadzanie jak najmniejszych zmian konstrukcyjnych w badanym obiekcie,
- dokładność pomiaru,
- gabaryty,
- koszt zakupu,
- możliwość współdziałania z rejestratorem.

Wybrano optymalne rozwiązanie polegające na pomiarze odkształcenia wału za pomocą tensometrii oporowej z telemetryczną transmisją sygnału pomiarowego.

Telemetryczny system pomiarowy pozwala na bezprzewodowy pomiar momentu obrotowego z akwizycją danych pomiarowych w postaci sygnału napięciowego na wirujących bądź pozostających w ruchu obiektach w czasie ich pracy w sposób całkowicie bezkontaktowy. Charakteryzuje się niewielkimi wymiarami i masą, odpornością na trudne warunki pracy. Bezkontaktowa transmisja sygnału w formie cyfrowej charakteryzuje się niskim poziomem zakłóceń, a bezprzewodowe zasilanie indukcyjne nie wymaga konieczności stosowania baterii powodujących dodatkowe niewyrównowazenie wału. System pomiarowy umożliwia skonfigurowanie współpracy z typowymi tensometrami oporowymi [2, 3]. W tym celu wykorzystano system pomiarowy KMT Telemetry TEL1-PCM-BATT umożliwiający pomiar odkształcenia wału (rys. 3).



Rys. 3. Schemat transmisji sygnału pomiarowego odkształcenia [8]
 Fig. 3. Measuring signal transmission scheme deformation [8]

3. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań w przeprowadzonym eksperymencie był układ napędowy pojazdu ciężarowo-terenowego marki Star model 266M2, przedstawiony na rysunku 4, będący na wyposażeniu Wojskowego Instytutu Techniki Pancерnej i Samochodowej w Sulejówku, gdzie przeprowadzono badania.



Rys. 4. Obiekt badań STAR 266M2 [źródło własne]

Fig. 4. STAR test object 266M2 [own source]

Zaprezentowany pojazd został zmodernizowany w 2012 roku 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 maksymalnym momencie obrotowym 560 Nm,
- montaż skrzyni biegów Eaton o 6-ciu przełożeniach,
- wszystkie zespoły samochodu (m.in. mosty napędowe, skrzynia rozdzielcza, wały napędowe) poddane zostały naprawie głównej.

Silnik IVECO F4AE0481A zastosowany w obiekcie badań jest czterocylindrowym doładowanym silnikiem wysokoprężnym o pojemności skokowej 3920 cm³. Maksymalny moment obrotowy równy 560 Nm występuje przy 1200 obr·min⁻¹, a maksymalna moc 125 kW przy prędkości obrotowej silnika 2700 obr·min⁻¹. Silnik współpracuje z sześciostopniową skrzynią biegów EATON FS-5206B.

4. PRZYGOTOWANIE OBIEKTU I WARUNKI BADAŃ

Przed przystąpieniem do badań założono jak najmniejszą ingerencję w konstrukcję badanego obiektu oraz całkowitą bezkontaktowość wykonania pomiaru. Przygotowanie obiektu do badań polegało na przygotowaniu powierzchni wałów napędowych pod naklejenie tensometrów. Związane było to z koniecznością miejscowego oczyszczenia wału z warstwy lakierniczej. Tak przygotowaną powierzchnię poddano wygładzeniu papierem ściernym o gradacji: 800, 1200, 1800 oraz odłuszczeniu powierzchni. Klejenie tensometru dokonano za pomocą kleju cyjanoakrylowego, a następnie poddano dosychaniu w podwyższonej temperaturze. Encoder wraz z anteną nadawczą zabezpieczono taśmą ferromagnetyczną eliminującą zakłócenia sygnału pomiarowego.

Kolejnym etapem przygotowania obiektu do badań był montaż anten odbiorczych. Dzięki zaopatrzeniu systemu pomiarowego w dodatkowe źródło zasilania, widoczne na rysunku 5, zwiększono odległość między anteną nadawczą a odbiorczą z 50 do 150 mm. Umożliwiło to dokonanie pomiaru przy eksploatacyjnych warunkach pracy układów napędowego i zawieszenia.



Rys. 5. Układ pomiarowy w trakcie montażu na wale napędowym obiektu badań
Fig. 5. The measuring system during assembly on the drive shaft testing facility

Badanie przeprowadzono na otwartym terenie o nawierzchni utwardzonej sześciokątnymi płytami betonowymi typu Trylinka (o wymiarach: szerokość 35 cm, długość ścianki bocznej 20 cm, wysokość 15 cm). Temperatura powietrza podczas pomiaru wynosiła 21°C, przy wilgotności względnej powietrza 88%, ciśnienie atmosferyczne: 1014 hPa, prędkość wiatru: 11 km·h⁻¹.

Badania zrealizowano przy ustalonej prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1512 obr·min⁻¹ na trzecim biegu, co odpowiada przełożeniu skrzyni biegów 1:2,80.

5. WYNIKI

Pomiaru dokonano w trzech próbach na prostym odcinku drogi. W wyniku dokonanych pomiarów otrzymano wartości napięcia. Częstotliwość próbkowania ustalono na poziomie 41 kHz. Wyniki zarejestrowano, a następnie w trakcie analizy uśredniono. Na podstawie przedstawionych zależności matematycznych w punkcie 2 wyznaczono odkształcenie wałów według zależności (1), w której przyjęto następujące dane:

- ΔU – przyrost napięcia (napięcie zmierzone), V,
- a – wzmacnienie sygnału 8000,
- U_0 – napięcie wzbudzenia tensometru 4 V,
- k – stała tensometru 2,075.

Następnie uzyskane wartości odkształcenia wykorzystano w zależności (2), wyznaczającej moment obrotowy na podstawie:

- odkształcenia wałów (wartość wyznaczona powyżej),
- moduł odkształcalności postaciowej modułu Kirchoffa – 80 GPa,
- średnicy zewnętrznej – 70 mm,
- średnicy wewnętrznej – 64 mm.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości momentu obrotowego w ustalonych punktach pomiarowych. Wartości te zaprezentowano w tabeli 1.

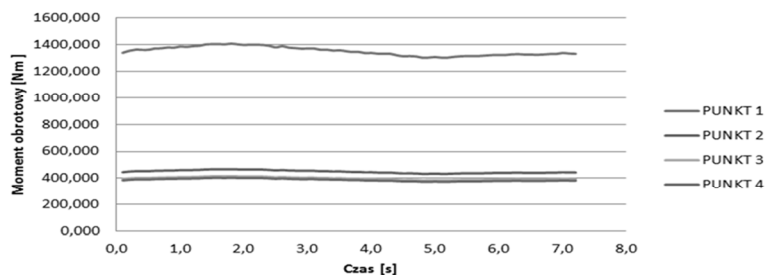
Tabela 1. Wartości momentu obrotowego dla punktów pomiarowych
Table 1. The torque values for the measuring points

Czas [s]	PUNKT 1 [Nm]	PUNKT 2 [Nm]	PUNKT 3 [Nm]	PUNKT 4 [Nm]
0,1	1339,113	445,686	396,215	385,518
0,2	1354,028	450,650	400,627	389,812
0,3	1362,719	453,542	403,199	392,314
0,4	1361,710	453,206	402,900	392,023
0,5	1361,822	453,243	402,933	392,056
0,6	1371,410	456,435	405,770	394,816
0,7	1372,531	456,808	406,102	395,139
0,8	1379,372	459,084	408,126	397,108
0,9	1377,858	458,581	407,678	396,672
1	1386,661	461,510	410,283	399,206
1,1	1383,745	460,540	409,420	398,367
1,2	1388,959	462,276	410,963	399,868
1,3	1391,931	463,265	411,842	400,724
1,4	1401,968	466,605	414,812	403,613
1,5	1403,818	467,221	415,359	404,146
1,6	1404,939	467,594	415,691	404,469
1,7	1402,809	466,885	415,061	403,855
1,8	1407,911	468,583	416,570	405,324
1,9	1402,753	466,866	415,044	403,839
2	1398,211	465,355	413,700	402,532
2,1	1399,949	465,933	414,215	403,032
2,2	1400,173	466,008	414,281	403,097
2,3	1398,155	465,336	413,684	402,516
2,4	1391,314	463,059	411,660	400,546
2,5	1380,269	459,383	408,392	397,366
2,6	1388,623	462,164	410,863	399,771
2,7	1378,699	458,861	407,927	396,914
2,8	1374,493	457,461	406,683	395,704
2,9	1370,344	456,080	405,455	394,509
3	1371,017	456,304	405,654	394,703
3,1	1371,634	456,509	405,837	394,880
3,2	1361,934	453,281	402,967	392,088
3,3	1362,831	453,579	403,232	392,346
3,4	1355,766	451,228	401,142	390,312
3,5	1358,177	452,031	401,855	391,006
3,6	1351,337	449,754	399,831	389,037
3,7	1345,562	447,832	398,122	387,374
3,8	1345,898	447,944	398,222	387,471
3,9	1337,151	445,033	395,634	384,953
4	1338,160	445,368	395,933	385,244
4,1	1332,497	443,484	394,257	383,613
4,2	1331,264	443,073	393,892	383,258

cd. tabeli 1

4,3	1331,432	443,129	393,942	383,307
4,4	1320,274	439,416	390,640	380,094
4,5	1313,434	437,139	388,616	378,125
4,6	1314,723	437,568	388,998	378,496
4,7	1312,088	436,691	388,218	377,738
4,8	1302,332	433,444	385,332	374,929
4,9	1303,621	433,873	385,713	375,300
5	1307,322	435,105	386,808	376,366
5,1	1302,668	433,556	385,431	375,026
5,2	1303,397	433,799	385,647	375,236
5,3	1309,397	435,795	387,422	376,963
5,4	1313,265	437,083	388,567	378,077
5,5	1315,396	437,792	389,197	378,690
5,6	1315,228	437,736	389,147	378,642
5,7	1315,676	437,885	389,280	378,771
5,8	1319,097	439,024	390,292	379,755
5,9	1322,405	440,125	391,271	380,708
6	1323,582	440,517	391,619	381,047
6,1	1322,965	440,311	391,437	380,869
6,2	1327,507	441,823	392,780	382,177
6,3	1329,526	442,495	393,378	382,758
6,4	1326,161	441,375	392,382	381,789
6,5	1326,442	441,468	392,465	381,870
6,6	1324,479	440,815	391,885	381,305
6,7	1326,610	441,524	392,515	381,918
6,8	1330,086	442,681	393,544	382,919
6,9	1330,647	442,868	393,710	383,081
7	1338,160	445,368	395,933	385,244
7,1	1333,619	443,857	394,589	383,936
7,2	1331,600	443,185	393,992	383,355
średnia	1351,287	449,737	398,439	389,023

Powyższe wartości przedstawia wykres przebiegów czasowych w punktach pomiarowych dla wartości zmierzonych (rys. 6).



Rys. 6. Przebiegi czasowe momentu obrotowego w punktach pomiarowych
Fig. 6. The time courses of torque measuring points

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

Moment obrotowy dostarczony do skrzyni rozdzielczej jest momentem wyjściowym skrzyni biegów, z czego wynika, że sprawność odcinka układu napędowego między silnikiem a skrzynią rozdzielczą wynosi 86,95%.

6. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonego doświadczenia zarejestrowano moment obrotowy w układzie napędowym, pomniejszony o wartość strat występujących w sprzęgle oraz skrzyni biegów. Zarejestrowane w trakcie pomiarów dane wejściowe i wyjściowe w skrzyni rozdzielczej umożliwiają wyznaczenie sprawności tego podzespołu. Zarejestrowany moment obrotowy przekazywany przez wały napędowe został zużytkowany na opory ruchu oraz straty w mostach napędowych. W trakcie pomiaru nie zaobserwowano zmian prędkości obrotowej między wejściem a wyjściami skrzyni rozdzielczej. Świadczy to, że przy stałym załączeniu mechanizmów przekazujących napęd nie dochodzi do strat wartości tego parametru.

LITERATURA

- [1] MILLER S.: Teoria maszyn i mechanizmów: analiza układów kinematycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989.
- [2] MIŁEK M.: Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.
- [3] ORŁOŚ Z.: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń. PWN, Warszawa 1977.
- [4] SADOWSKI A., ŻÓŁTOWSKI B.: Badania sprawności złożonych układów napędowych. Inżynieria i aparatura chemiczna, nr 5, 2012.
- [5] SADOWSKI A., ŻÓŁTOWSKI B.: Badanie rozplywu energii pojazdu samochodowego. Polskie Stowarzyszenie Zarządzania Wiedzą, seria: Studia i Materiały nr 48, 2011.
- [6] SADOWSKI A., ŻÓŁTOWSKI B.: Bezinwazyjne metody pomiaru momentu obrotowego. Logistyka.net.pl 6, 2012.
- [7] SIŁKA W.: Teoria ruchu samochodu. WNT, Warszawa 2002.
- [8] www.kmt-telemetry.com
- [9] ŻÓŁTOWSKI B., ČWIK Z.: Leksykon Diagnostyki Technicznej. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1996.

VERIFICATION OF TEST METHOD OF ENERGY PROPAGATION SYSTEM

Summary: In the article a verification of research method of the energy dispersed in the driving system of cargo off-road car field was described. As the object of examinations a car of the STAR 266M2 brand having a drive to all three axes was used. Measurements were preceded by analysis of the driving system based on which test points were set. The way of performing measurements included the application strain gauge in the destination of appointing deformations of propeller shafts of the torque in the end moved. The results may help identify the sites of energy losses in the drive vehicles in the process of exploitation.

Keywords: energy dispersed, measurements, torque, energy losses