

Sprzęgła cierne, własności niezawodnościowe sprzęgieł ciernych, aproksymacja rozkładu Gaussa trójparametrowym rozkładem Weibulla

MACIEJCZYK Andrzej¹
ZDZIENNICKI Zbigniew²

WŁASNOŚCI NIEZAWODNOŚCIOWE SPRZĘGIEŁ CIERNYCH

W pracy przedstawiono metodę wyznaczenia funkcji niezawodności sprzęgieł ciernych będących istotnym elementem przeniesienia napędu w pojazdach samochodowych.

RELIABILITY FUNCTION OF FRICTION COUPLING

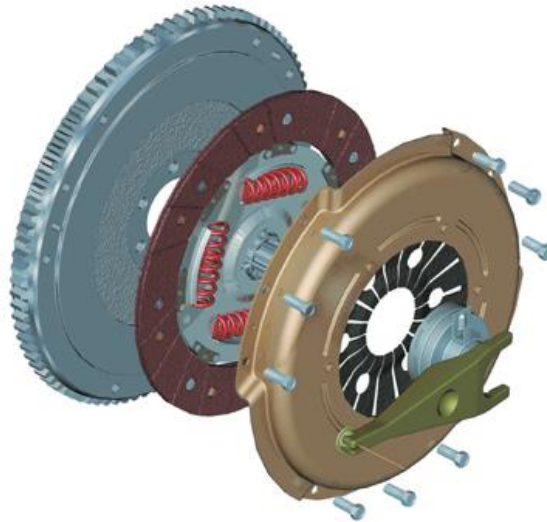
The paper presents a method of determining the reliability function of friction couplings being an essential element of drive system into automotive vehicles.

1. WSTĘP

Sprzęgła cierne stanowią istotny element napędu w pojazdach samochodowych. Przeniesienie momentu obrotowego z wału silnika na wałek sprzęgłowy skrzyni biegów odbywa się za pomocą sił tarcia. Sprzęgło cierne jednotarczowe (Rys. 1.), najczęściej stosowane w samochodzie, pozwala na włączanie i rozłączenie elementów układu przy użyciu niewielkiej siły ze strony kierowcy, za pomocą odpowiedniego układu docisku. Tarcza sprzęgła jako element cierne musi spełniać szereg założeń konstrukcyjnych. Do najistotniejszych należą odporność na ścieranie i możliwość pracy w wysokich temperaturach. Materiały stosowane na okładziny cierne tarczy sprzęgła to między innymi włókna węglowe, włókna szklane, materiały organiczne oraz spieki metalowe. Elementy cierne sprzęgła, z tytułu eksploatacji podlegają procesowi zużycia. Przyjmuje się, że ich trwałość zdeterminowana jest przebiegiem pojazdu. Jednak największy wpływ na warunki pracy sprzęgła ma sam kierowca, którego styl jazdy jest głównym czynnikiem zmniejszającym trwałość tego mechanizmu. Z przyczyn oczywistych niemożliwe jest uwzględnienie tego aspektu w poniższych rozważaniach.

¹Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny; 90-924 Łódź; ul. Stefanowskiego 1/15
Tel. +48 42 631 22 41, E-mail: maciejcz@p.lodz.pl

²Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny; 90-924 Łódź; ul. Stefanowskiego 1/15
Tel. +48 42 631 22 62, E-mail: zbychu@p.lodz.pl



Rys. 1. Klasyczne sprzęgło samochodowe

2. ZUŻYCIĘ ELEMENTÓW CIERNYCH SPRZĘGŁA [1, 2]

Trwałość powierzchni ciernych sprzęgła, przy założeniu, że ich zużycie objętościowe jest proporcjonalne do pracy tarcia, określa zależność:

$$L_h = \frac{V}{q_v W_t m_w} \quad [\text{godz.}] \quad (1)$$

gdzie: V – zużycie objętościowe powierzchni ciernych sprzęgła, cm^3 ,
 q_v – zużycie właściwe (parametr materiału okładziny), cm^3/kWh ,
 W_t – praca tarcia, kWh,
 m_w – liczba włączeń sprzęgła na godzinę, 1/godz.

Zużycie objętościowe określa zależność:

$$V = A \cdot s \quad [\text{cm}^3] \quad (2)$$

gdzie: A – powierzchnia okładzin sprzęgła, cm^2 ,
 s – dopuszczalne zużycie liniowe (zazwyczaj przyjmuje się $0,8 \div 0,9$ grubości okładziny), cm.

Pracę tarcia określa zależność:

$$W_t = \frac{1}{2} M_0 \omega_p r_m t_w \quad [\text{kWh}] \quad (3)$$

gdzie: M_0 – moment obliczeniowy przenoszony przez sprzęgło, kNcm,
 ω_p – prędkość kątowa poślizgu sprzęgła, zazwyczaj przyjmuje się $\omega_p = 0,92\omega$ –
prędkości kątowej sprzęgła, rd/s
 t_w – czas włączenia sprzęgła, s
 r_m – średni promień działania siły tarcia, cm

Moment obliczeniowy przenoszony przez sprzęgło określa zależność:

$$M_0 = F_w \cdot \mu \cdot r_m \quad [\text{kNcm}] \quad (4)$$

gdzie:

F_w – siła nacisku, kN
 μ – współczynnik tarcia

Analizując zależności (1) ÷ (4) można zauważyć, że wszystkie wielkości wchodzące w skład tych związków, oprócz liczby włączeń sprzęgła na godzinę m_w , są wielkościami określonymi w sposób zdeterminowany. Zależą one od wymiarów geometrycznych elementów sprzęgła, ich własności materiałowych i konstrukcyjnych.

Natomiast wielkość m_w przyjmuje swoje wartości w sposób probabilistyczny i jest określona przez zmienną losową. Zależy ona od szeregu czynników, przede wszystkim od warunków natężenia ruchu drogowego (ruch miejski, pozamiejski, korki itp.) oraz od stylu jazdy kierowcy. Dlatego też trwałość powierzchni sprzęgła L_h , określająca czas poprawnej pracy sprzęgła, jest również zmienną losową.

Przy określaniu niezawodności pojazdów samochodowych, lub ich podzespołów, wygodniej jest jako zmienną losową przyjmować przebieg pojazdu. Aby dokonać tej zamiany, dla potrzeb analizowanego przypadku, należy posłużyć się zależnością:

$$L = L_h v_{sr} \quad [\text{km}] \quad (5)$$

gdzie:

L – przebieg pojazdu przy nieużytych powierzchniach ciernych sprzęgła, km
 L_h – trwałość powierzchni ciernych sprzęgła, godz.
 v_{sr} – średnia prędkość pojazdu podczas pokonania dystansu L , km/godz.

3. WYZNACZENIE PARAMETRÓW ROZKŁADU ZMIENNEJ LOSOWEJ [3]

Charakter zużycia powierzchni ciernych sprzęgła pozwala przyjąć, że zmienna losowa określająca trwałość tych powierzchni ma rozkład gaussowski.

W celu wyznaczenia, w sposób inżynierski, parametry rozkładu zmiennej losowej L opisującej przebieg pojazdu przy nieużytych powierzchniach sprzęgła, należy określić dwie wielkości tej zmiennej: L_{min} i L_{max} . Wartości te, dla określonego modelu i typu pojazdu, można pozyskać z danych gromadzonych przez jednostkę serwisującą te pojazdy.

I tak, wartość średnia (oczekiwany czas zdatności) dla przedmiotowego rozkładu będzie wynosił:

$$L = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \quad [\text{km}] \quad (6)$$

natomiast odchylenie standardowe dla tego rozkładu:

$$\sigma = \frac{L_{max} - L_{min}}{6} \text{ [km]} \quad (7)$$

Dla powyższych parametrów rozkładu gaussowskiego zmiennej losowej opisującej przebieg pojazdu po którym następuje zużycie powierzchni ciernych sprzęgła, funkcja prawdopodobieństwa tej dysfunkcji sprzęgła ma postać:

$$f(L) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(L - L_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (8)$$

Funkcję niezawodności poprawnego procesu funkcjonowania sprzęgła, z uwagi na zużycie jego powierzchni ciernych, można wyznaczyć z zależności:

$$R(L) = 1 - \int_0^L f(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

Aby rozwiązać powyższą zależność, należy funkcję gaussowską (8) scałkować w granicach od 0 do L. Funkcję pierwotną całki z wyrażenia (9) można wyrazić za pomocą funkcji błędu $erf(L)$ w następujący sposób [1]:

$$\int \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(L - L_0)^2}{2\sigma^2} \right] dL = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{L - L_0}{\sigma \sqrt{2}} \right] + C \quad (10)$$

A zatem zależność (9) przybierze postać:

$$R(L) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{L - L_0}{\sigma \sqrt{2}} \right] \quad (11)$$

4. PRZYKŁAD LICZBOWY

Dla pewnego modelu i typu pojazdu samochodowego, pozyskano z serwisu tych pojazdów następujące dane dotyczące ich przebiegów podczas których zużywają się powierzchnie cierne ich sprzęgieł

$$\begin{aligned} L_{min} &= 100000 \text{ km} \\ L_{max} &= 160000 \text{ km} \end{aligned}$$

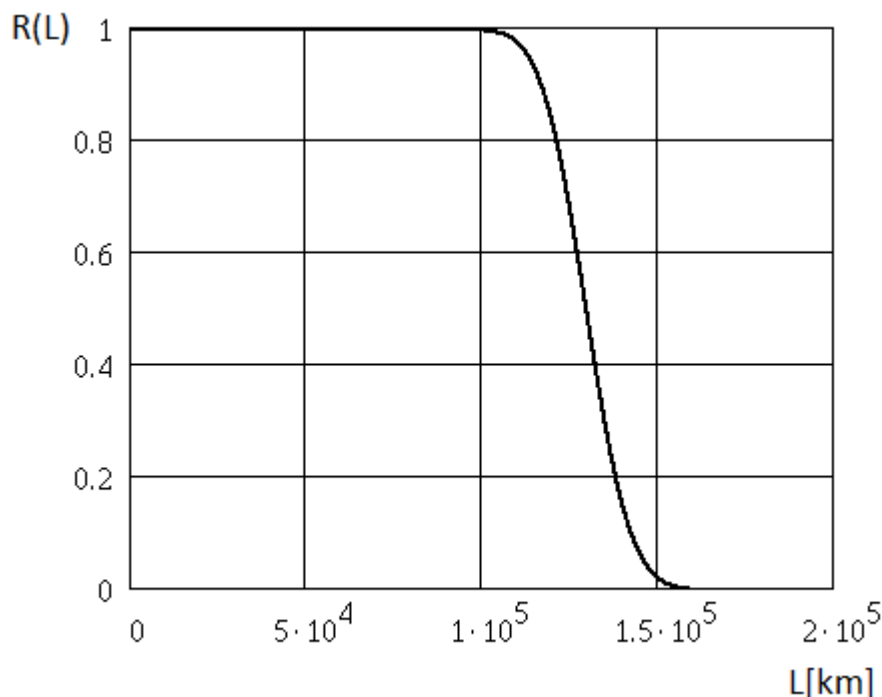
Stosując zależności (6) i (7) otrzymuje się parametry rozkładu gaussowskiego zmiennej losowej opisującej utratę własności ciernych przez sprzęgła w tych pojazdach. Wynoszą one:

$$\begin{aligned} L &= 130000 \text{ km} \\ \sigma &= 10000 \text{ km} \end{aligned}$$

Tak więc funkcja niezawodności poprawnego działania sprzęgieł analizowanych pojazdów opisana jest zależnością:

$$R(L) = \frac{1}{2} - \frac{1}{1} \operatorname{erf} \frac{L - 130000}{10000 \sqrt{2}}$$

a wykres tej zależności przedstawia poniższy rys. 2.



Rys. 2. Wykres funkcji niezawodności $R(L)$ dla przykładowego liczbowego

Z wykresu widać, że sprzęgła pojazdów samochodowych są elementami bezawaryjnymi dla pewnego przebiegu pojazdu L_0 , a dla przedstawionego w przykładzie przypadku przebieg ten wynosi ok. 100000 km.

5. APROKSYMACJA ROZKŁADU GAUSSOWSKIEGO PRZEZ TRÓJPARAMETROWY ROZKŁAD WEIBULLA

Dla prostego wyznaczenia bezawaryjnego przebiegu pojazdu L_0 , z uwagi na pracę jego sprzęgła, korzystnie jest rozkład gaussowski aproksymować trójparametrowym rozkładem Weibulla.

Aproksymacja ta zostaje dokonana w ten sposób, że parametr kształtu rozkładu $\beta = 4$ natomiast pozostałe parametry: skali η i przesunięcia L_0 , zostają wyznaczone przez przyrównanie odpowiednich wyrażeń obu rozkładów na ich niezawodnościowe charakterystyki liczbowe.

I tak, parametr skali rozkładu Weibulla zostaje wyznaczony z zależności:

$$\eta = \frac{\sigma}{\Gamma(2\beta^{-1}+1) - \Gamma^2(\beta^{-1}+1)} \quad (12)$$

gdzie Γ jest funkcją gamma.

Parametr przesunięcia rozkładu Weibulla zostaje wyznaczony z zależności:

$$L_0 = L - \eta \cdot \Gamma(\beta^{-1}) + 1 \quad (13)$$

W związku z powyższym, parametry dla trójparametrowego rozkładu Weibulla, opisującego niezawodność sprzęgieł ciernych pojazdów z przykładu liczbowego, wynoszą odpowiednio:

- parametr skali

$$\eta = \frac{10000}{\Gamma(1,5) - \Gamma^2(1,25)} = 39330 \text{ km} \quad (14)$$

- parametr przesunięcia

$$L_0 = 130000 - 39330 \cdot \Gamma(1,25) = 94360 \text{ km} \quad (15)$$

Funkcja niezawodności rozważanych sprzęgieł, przy trójparametrowym rozkładzie Weibulla, ma postać:

$$R(L) = 1 \text{ dla } 0 \leq L \leq L_0 \text{ oraz}$$

$$R(L) = \exp\left(-\frac{L-L_0}{\eta}^\beta\right) = \exp\left(-\frac{L-94360}{39330}^4\right) \text{ dla } L > L_0 \quad (16)$$

Jak można łatwo sprawdzić, wykres funkcji niezawodności wyrażonej powyższą zależnością, dokładnie pokrywa się z przebiegiem przedstawiony na rys. 2.

6. WNIOSKI

Sprzęgło cierne jest elementem układu niezawodnościowego.

Trwałość elementów ciernych sprzęgła opisana jest rozkładem Gaussa.

Sposób wyznaczania parametrów tego rozkładu przedstawiono w aspekcie inżynierskim.

Zaproponowano metodę aproksymacji rozkładu gaussowskiego, trójparametrowym rozkładem Weibulla, z wyznaczeniem jego parametrów.

Trójparametrowy rozkład Weibulla dokładnie odwzorowuje rozkład Gaussa.

Parametr przesunięcia trójparametrowego rozkładu Weibulla określa przebieg pojazdu, po którym sprzęgło traci swoje własności.

Określenie przebiegu, po którym sprzęgło wykaże dysfunkcję, pozwala na zaplanowanie z wyprzedzeniem odpowiedniej dystrybucji środków finansowych na zakup części zamiennych oraz niezbędną naprawę.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Osiński Z., *Sprzęgła i hamulce*, PWN, Warszawa 1988.
- [2] Shigley J. E., Mischke C. R., Brown T. H., *Stangard Handbook of Machine Design*.
McGraw-Hill, 2004
- [3] Papoulis A., Pillai S. U.: *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*.
McGraw-Hill, 2002