

Hybrid engine startup

This paper presents problems related to hybrid engine start-up as well as possibilities of using electro-mechanical energy storage. Possibilities of energy storage in flywheel are described as well as problems related to the selection of its geometric dimensions for a typical spark-ignition engine operating in hybrid system.

Keywords: hybrid engine, flywheel

Rozruch silnika hybrydowego

W pracy przedstawiono problemy związane z rozruchem silnika hybrydowego oraz możliwości zastosowania elektromechanicznego magazynowania energii. Opisano możliwości magazynowania energii w kole zamachowym oraz problemy związane z doбором jego wymiarów geometrycznych dla typowego silnika o zapłonie iskrowym pracującego w układzie hybrydowym.

Słowa kluczowe: rozruch, silnik hybrydowy

1. Wprowadzenie

Poszukiwania nowych rodzajów paliw oraz możliwości obniżenia szkodliwego oddziaływania pojazdów na otoczenie, coraz częściej mają zastosowanie pojazdy hybrydowe. Powinny one spełniać trzy podstawowe wymagania eksploatacyjne [5]:

1. Małe zużycie paliwa.
2. Niska toksyczność spalin.
3. Dobre właściwości dynamiczne (duża elastyczność).

Spełnienie tych wymagań umożliwiają dotychczas eksploatowane pojazdy o napędzie hybrydowym. Układ taki składa się z silnika spalinowego oraz co najmniej jednego silnika elektrycznego. Napęd hybrydowy oznacza wszystkie stany ruchu pracy pojazdu, w których moment napędowy na kołach pojazdu pochodzi zarówno od silnika spalinowego, jak i elektrycznego [5]. Przy rozdziale momentu napędowego poza osiągnięciem jednego z celów eksploatacyjnych wymienionych wcześniej, układ sterujący pojazdu musi uwzględniać przede wszystkim stan naładowania akumulatora energii elektrycznej. Przy odłączonym silniku spalinowym pojazd może poruszać się bezgłośnie i bez lokalnej emisji toksycznych składników spalin do otoczenia. Stopień hybrydyzacji zależy od tego, w jakim stosunku rozdzielana jest siła napędowa pomiędzy silnik spalinowy i maszynę elektryczną [3,5], przy czym bardzo istotnym czynnikiem jest nadwyżka energii elektrycznej zmagazynowanej w akumulatorach. Napęd wyłącznie elektryczny jest możliwy tylko w przypadku jednoczesnego obracania wału korbowego silnika spalinowego. Ten układ napędowy nazywa się niepełnym napędem hybrydowym i jest możliwy do zrealizowania w przypadku gdy opory bezwładności elementów silnika spalinowego są nieduże.

W odróżnieniu do niepełnego napędu hybrydowego, pełny napęd hybrydowy daje możliwość elektrycznego napędu pojazdu na znacznie dłuższym odcinku drogi. W tym czasie silnik spalinowy jest odłączony od maszyny elektrycznej i jego wał korbowy nie obraca się (brak oporów ruchu i bezwładności). Pełny napęd hybrydowy może być realizowany jako jak napęd równoległy, szeregowy lub szeregowo-równoległy [2,3,5]. Równoległy przepływ energii można zrealizować jako napęd przez maszynę elektryczną. Zastosowanie tego napędu w stosunku do konwencjonalnych pojazdów może zmniejszyć zużycie paliwa do 30%.

2. Elektromechaniczne magazynowanie energii

Kryteria dotyczące eksploatacji silników spalinowych pojazdów samochodowych z punktu widzenia ochrony środowiska są coraz bardziej zastrzone. Rozwiązaniem pozwalającym na sprostanie tym kryteriom jest napęd elektryczny samochodu stosowany z powodzeniem w latach końcowych XIX wieku (samochód Jenatze'go), a później w latach 20 XX wieku. Nieestetyczna zbyt mała sprawność energetyczna baterii tradycyjnych akumulatorów nie pozwalała na jego szerokie zastosowanie w chwili obecnej.

Jednym z możliwych rozwiązań jest napęd hybrydowy pojazdu, który może być realizowany jako napęd elektryczny z kinematycznym zasobnikiem energii w postaci koła zamachowego. Istnieją też inne koncepcje samochodu hybrydowego z kinematycznym magazynowaniem energii [1] nad którymi pracuje się w kraju. Zakładają one kinematyczne magazynowanie energii (podobnie jak w żyrobusach) i wykorzystanie jej dla wspomaganie napędu akumulatorowego [1,7]. Jedną z nich ukierunkowana jest na rozwój strony elektrycznej zagadnienia i dość daleko zaawansowana, a inna z kolei preferuje stronę mechaniczną zagadnienia, przedstawiając model sterowania prędkości obro-

towej silnika elektrycznego z kołem zamachowym jako zasobnikiem energii oraz przetworzeniem energii kinetycznej koła zamachowego na energię elektryczną oraz wykorzystania jej do uruchomienia samochodu. W pojazdach o napędzie elektrycznym wykorzystuje się następujące zasobniki energii [1,2,7] :

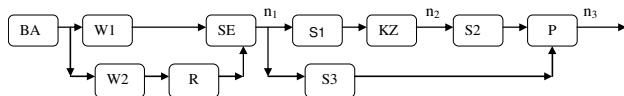
- elektromechaniczne akumulatory energii,
- hydropneumatyczne akumulatory energii,
- kinetyczne zasobniki energii, zgodnie z zasadą :

$$m_{kz} = \frac{\pi}{30} \cdot I \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

- m_{kz} – masa koła zamachowego,
- I – masowy moment bezwładności elementów rozpedzanych,
- n – prędkość obrotowa,
- t – czas rozpedzania.

Pojazd samochodowy zasilany bateriami akumulatorowymi może wykorzystywać kinematyczny zasobnik energii w postaci koła zamachowego. Zasobnik energii można użyć do uruchomienia i rozpedzania pojazdu. Ta forma magazynowania jest korzystna ze względu na prostotę konstrukcji i dużą gęstość zmagazynowanej energii. Model sterowania prędkością obrotową silnika elektrycznego z kołem zamachowym jako kinematycznym akumulatorem energii przedstawiono na rys.1 [7].



Rys.1. Model sterowania prędkością obrotową silnika elektrycznego z kołem zamachowym [7]

Fig.1. Model Speed control electric motor with flywheel [7]

gdzie:

- W1,W2 – wyłączniki energii elektrycznej,
- S1,S2,S3 – sprzęgła,
- BA – bateria akumulatorów,
- R – regulator prędkości silnika elektrycznego,
- SE – silnik elektryczny,
- KZ – koło zamachowe,
- n_1 – prędkość obrotowa silnika elektrycznego,
- n_2 – prędkość obrotowa koła zamachowego,
- n_3 – prędkość liniowa pojazdu,
- P – pojazd samochodowy o masie m .

Opis działania wg schematu przedstawionego na rys.1, podany przez Autorów opracowania [7] brzmi „ Po zamknięciu W1 silnik SE zostaje dołączony do BA. Po czasie t_1 gdy prędkość W1 osiągnie wartość maksymalną zostaje dołączone KZ poprzez sprzęgło S1. Po czasie t_2 gdy prędkość osiągnie wartość \max lub gdy $t_2 > t_{zad}$ zostaje

załączone sprzęgło S2 i rozpoczyna się ruch pojazdu P. Chcąc zwiększyć prędkość n_3 do żądanej wartości kierowca łączy sprzęgło S3 i regulatorem R ustala tę prędkość. Podczas rozruchu silnika elektrycznego pobór prądu z baterii akumulatorowych jest wysoki, co oddziałuje niekorzystnie na akumulatory oraz instalację elektryczną, w których wydziela się ciepło i w szybkim tempie się zużywa. Zadaniem układu napędowego z kołem zamachowym będzie zmniejszenie poboru prądu podczas rozpoczynania jazdy poprzez załączenie koła zamachowego, które będzie pełniło rolę urządzenia rozruchowego pojazdu”. Jak wynika z przedstawionego opisu systemu hybrydowego podstawowym problemem jest rozruch pojazdu przy pomocy koła zamachowego.

3.Problem rozruchu

W trakcie rozruchu konwencjonalnego silnika spalinowego będącego źródłem napędu samochodu osobowego następuje znaczne zużycie energii zawartej w akumulatorze [3,6]. W samochodzie hybrydowym z kinetycznym zasobnikiem energii w postaci koła zamachowego istotnymi parametrami są masa i wymiary tego koła. Po odpowiednim rozpedzeniu koła zamachowego przez akumulator powinno ono posłużyć do uzyskania rozruchu pojazdu i ruszenia z miejsca. Rozpedzanie koła do odpowiedniej prędkości obrotowej odbywać się będzie w warunkach znacznie mniejszego obciążenia akumulatora niż ma to miejsce podczas rozruchu silnika spalinowego. Rozruch silnika spalinowego wymaga dostarczenia dużej ilości energii zmagazynowanej w paliwie. Z tego powodu współczynnik nadmiaru powietrza podczas rozruchu wynosi około 0,6 , co powoduje niepełne spalanie i znaczne zanieczyszczenie spalin. Skrócenie czasu rozruchu i nagrzewania silnika jest ciągle problemem istotnym z punktu widzenia skażenia środowiska naturalnego. Dotyczy to również ruszania pojazdu z pod świateł lub w wyniku wymuszonego zatrzymania ruchu, gdy silnik pracuje na biegu jałowym i wymagane jest gwałtowne zwiększenie dawki paliwa przez urządzenie zasilające [3,6]. Możliwość zastosowania koła zamachowego rozpedzonego wcześniej za pomocą energii czerpanej z akumulatora jest próbą rozwiązania tego problemu.

Po uzyskaniu rozruchu i przejściu pojazdu na pracę w warunkach gdy silnik elektryczny napędzany jest tylko z akumulatora, rozpedzone koło zamachowe może przekazywać swój nadmiar energii, doładowując akumulator. Dlatego kluczowym zadaniem jest wyznaczenie bezwładności (masy) koła zamachowego tak , by zapewniało ono skuteczny rozruch pojazdu bez udziału akumulatora, co będzie zapasem bezpieczeństwa dla ruchu pojazdu. Koło zamachowe podczas eksploatacji pojazdu będzie cały czas w ruchu ładując akumulator lub wspomagając go w pokonaniu oporów

ruchu pojazdu. Podczas ruszania z miejsca energia kine-tyczna zmagazynowana w kole zamachowym jest wykorzystywana na pokonanie oporów ruchu oraz na zwiększenie prędkości pojazdu. Powoduje to spadek prędkości obrotowej koła zamachowego, przy czym w dalszych rozważaniach przyjęto, że jest to prędkość przy której silnik powinien pracować jeszcze stabilnie, bez obawy zatrzymania się. Silniki spalinowe wykonują największą pracę przy prędkości obrotowej odpowiadającej maksymalnej wartości momentu obrotowego (w przypadku silnika Fiat Punto 55 S/55 jest to 3500 min⁻¹). Taką wartość prędkości obrotowej przyjęto do obliczeń parametrów koła zamachowego. Dla silników spalinowych o zapłonie iskrowym prędkość rozruchu przy której powinien jeszcze nastąpić rozruch wynosi 40 do 70 min⁻¹ [4,6], co wynika z badań przeprowadzonych przez autorów cytowanych prac.

4. Wyznaczenie masy koła zamachowego

Badania laboratoryjne zdecydowano przeprowadzić na silniku samochodu FIAT Punto 55 S/55 Speed 1,1i ,dla którego konieczne było wyznaczenie masy koła zamachowego jako akumulatora energii. Dane silnika zaczerpnięto z dostępnej literatury [9]. Silnik: o zapłonie iskrowym, czterosuwowy, czterocylin-drowy, rzędowy, chłodzony cieczą,

Średnica cylindra 70 mm
 Skok tłoka 72 mm
 Pojemność skokowa 1108 cm³
 Stopień sprężania 9,6
 Moc maksymalna 40 kW (55 KM) / 5500 1/min
 Moment maksymalny 85 Nm / 3500 1/min

Zasadniczy wpływ na zużycie energii podczas rozruchu ma suma momentów oporowych silnika. Tłokowy silnik spalinowy jest maszyną cieplną, która zamienia energię chemiczną na pracę mechaniczną. Dla spełnienia tej funkcji silnik musi zawierać urządzenia pomocnicze warunkujące jego prawidłowe i niezawodne działanie. Do urządzeń pomocniczych silnika zalicza się : układ zasilania paliwem, układ rozruchowy, układ smarowania, układ chłodzenia, prądnicę prądu przemiennego oraz sprężarkę powietrza. Dla skutecznego funkcjonowania silnika, trzeba dostarczyć do nich odpowiednią ilość energii. W czasie rozruchu musi być do-starczona ona przez układ rozruchowy, który musi ją zrównoważyć , a nadwyżka energii wytwarzanej przez ten układ ma spowodować skuteczny rozruch. Opory ruchu osprzętu oraz niektórych węzłów tarcia można wyznaczyć w przybliżeniu na podstawie badań stanowisko- wych. Można je też wyznaczyć na drodze obliczeniowej na podstawie wzorów empirycznych, przy czym są one obarczone różnym błędem gdyż odnoszą się najczęściej do warunków pracy ustalonych , a nie rozruchu silnika. Wyniki te będą przydatne w dal-szej części badań ekspe-rymentalnych.

Na podstawie dotychczasowych badań dotyczą- cych rozruchu silników spalinowych udziały mo-

mentów oporowych typowego silnika czterocylin- drowego przedstawiają się nastę-pująco [4,6] :

- koło zamachowe 65 %
- wał korbowy 15 %
- sprzęgło 10 %
- części w ruchu posuwisto – zwrotnym 5 %
- napęd osprzętu 5 %

Przekrój koła zamachowego silnika samo- chodu osobowego FIAT Punto 55 S/56 6 Speed 1,1i w wersji uproszczonej przedstawiono na rys.2. Jako wyróżnik charakteryzujący koło za-machowe przyjęto moment zamachowy oznaczany w literaturze wyrażeniem $G D_s^2$ lub ($m_k \cdot D_s^2$) [3,8] który opisa- ny on jest wyrażeniem :

$$m_{kz} \cdot D_s^2 = \frac{E}{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \delta} \quad (2)$$

gdzie:

π – stała,

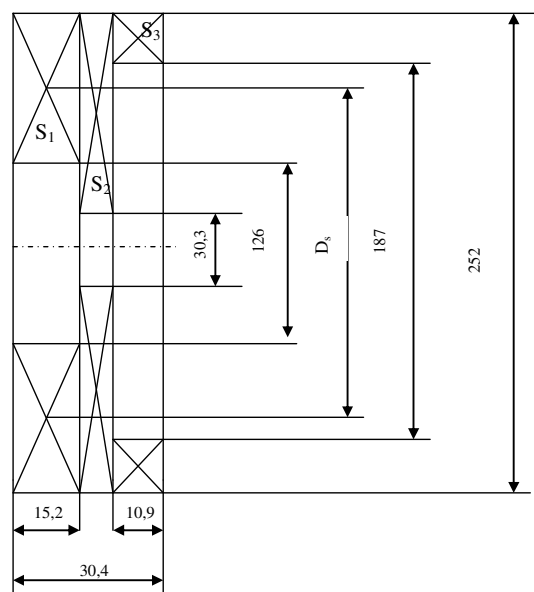
m_k – masa koła zamachowego, kg

D_s – średnica odpowiadająca środkowi ciężkości przekroju wieńca, m

E – nadwyżka pracy, Nm

n – częstotliwość obrotów wału korbowego silnika, s⁻¹

δ – stopień nierównomierności biegu silnika,



Rys.2. Uproszczony schemat koła zamachowego silnika 176 A6.000 (FIRE 1.1 SPI)

Fig.2. Simplified diagram of the engine 176 A6.000 (FIRE 1.1 SPI) flywheel

Dla koła zamachowego wspomnianego silnika wyznaczono moment zamachowy w sposób przed- stawiony niżej. Po przekształceniu wzoru (2) moż- na wyliczyć masę każdego z 3 segmentów koła zamachowego:

$$m_{kz} = \frac{E}{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \delta \cdot D_s^2} \quad (3)$$

gdzie:

$E = 85 \text{ Nm}$ – przyjęto na podstawie charakterystyki zewnętrznej silnika, maksymalna wartość momentu obrotowego silnika, tj zdolność do wykonania największej pracy przez silnik,

$\delta = 1/300$ – przyjęto jak dla silnika prądu przemiennego,

$n = 58,33 \text{ 1/s}$ wartość prędkości odpowiadająca maksymalnemu momentowi obrotowemu,

Średnia wartość środka masy koła zamachowego D_s wynosi :

$D_s = (D_{s1} + D_{s2} + D_{s3}) : 3 = 137,9 \text{ mm}$

stąd

$$m_{kz} = \frac{85}{3,14^2 \cdot 58,33^2 \cdot 0,0033 \cdot 0,019} = 40,42 \text{ kg}$$

Wyliczona masa koła zamachowego rzeczywistego silnika 176 A6.000 stanowi podstawę do wyznaczenia mocy akumulatora zapewniającej skuteczny rozruch silnika spalinowego o zapłonie iskrowym tj. uzyskanie prędkości obrotowej przez silnik w granicach 70 – 100 min^{-1} [4,6]. Podobnie jest w odniesieniu do opisanych wcześniej klasycznych silników hybrydowych. Wyznaczono ją w oparciu o wymaganą wartość maksymalnego momentu obrotowego silnika, gdyż jest on wskaźnikiem maksymalnej pracy jaką może wykonać silnik. Wykorzystują wzór określający zależności geometryczne w kole zamachowym [8], można wyznaczyć szerokość jego wieńca gdyż średnica zewnętrzna (252 mm) jest narzucona wymiarami konstrukcyjnymi samochodu FIAT Punto:

$$m_{kz} = \frac{\pi \cdot b \cdot \rho}{4} (D_z^2 - D_w^2) \quad (4)$$

gdzie :

D_z – średnica zewnętrzna wieńca,

D_w – średnica wewnętrzna wieńca,

b – szerokość wieńca,

ρ – gęstość tworzywa wieńca.

W przypadku silnika hybrydowego zasilanego jedynie akumulatorem ze wspomaganie kołem zamachowym, masa tego koła powinna być znacznie większa. Wynika to z konieczności przystosowania się samochodu do zmiennych obciążeń i prędkości obrotowych, co w tradycyjnych silnikach spalinowych wyrażane jest współczynnikiem elastyczności. Dla silnika FIAT Punto 55 S/56 6 Speed

1,1i wynosi on 1,92 [4]. O tyle też trzeba powiększyć masę koła zamachowego w przypadku gdy ma ono być akumulatorem energii mechanicznej. Masa ta wyniesie 77,6 kg po przekształceniu wzoru (4)

$$b = \frac{4 \cdot m_{kz}}{\pi \cdot \rho \cdot D_s} \quad (5)$$

$$b = \frac{4 \cdot 77,6}{3,14 \cdot 7280 \cdot 0,019} = 0,0714 \text{ m} = 71,4 \text{ mm}$$

Porównując szerokość wieńca koła zamachowego w wersji oryginalnej o wymiarach (D_z -252mm i D_s – 137,9 mm) z wyliczoną nasuwa się wniosek, że należy powiększyć szerokość wieńca koła zamachowego o różnicę szerokości wynoszącą 0,0714 – 0,0304 = 0,041 m. Najłatwiej jest dodać różnicę do wymiaru pierścienia 10,86 mm, uzyskując w wyniku 51,86 mm. Nie zmienia to wartości średnicy położenia środka masy D_{s3} . Takie rozwiązanie ułatwia przeprowadzenie planowanych badań przy niewielkiej rekonstrukcji koła zamachowego.

5. Zakończenie

Przedstawiony tok rozumowania dotyczy jednego z licznych problemów, które należałoby rozwiązać przy zastosowaniu napędu hybrydowego z wykorzystaniem elektromechanicznego magazynowania energii. Jest to problem niezbyt skomplikowany jak widać z przytoczonego przykładu, choć Autorzy pracy [7] chcieli powiększyć szerokość wieńca do 150 mm nie podejmując próby wyliczenia jej. Z drugiej zaś strony koło zamachowe o tak dużej masie stwarzałyby problemy czysto mechaniczne jak np. sprawa ułożyskowania go. Wydaje się, że bardziej perspektywicznym z punktu widzenia realizacji samochodu hybrydowego jest układ innej koncepcji magazynowania energii skierowany nie na aspekty mechaniczne (masa koła zamachowego), a raczej powiększenia prędkości obrotowej urządzeń magazynujących jak to sugeruje praca [1] dając w sumie ten sam efekt. W opisanym przykładzie dla którego liczone masę koła zamachowego należy zastosować elektromechaniczny układ napędowy z mechaniczną akumulacją energii, pracującym w systemie pracy równoległej z elektrycznym silnikiem napędowym i opracować układ elektronicznego sterowania układem hybrydowym.

Bibliography/Literatura

- [1] Bernhardt M. i inni : Silniki samochodowe. Wyd. II WK II Warszawa 1969.
- [2] Kamiński G., Szczypior J., Biernat A., Smak A., Rowiński A.: Konstrukcja modelu maszyny do elektromechanicznego magazynowania energii. Przegląd Elektrotechniczny Nr6/2008.

- [3] Merkisz J., Pilecha I.: Alternatywne napędy pojazdów. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [4] Mysłowski J.: Rozruch silników samochodowych z zapłonem samoczynnym. WNT Warszawa 1996.
- [5] Napędy hybrydowe. Poradnik BOSCH. WKIŁ Warszawa 2010.

-
- [6] Pszczółkowski J.: Analiza i modelowanie procesu rozruchu silników o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwo WAT, Warszawa 2009.
- [7] Smyczek J., Łyskojć D.: Model sygnałowy układu optymalizacji ruchu samochodu elektrycznego z efektywnym kołem zamachowym. XIII Słupskie Forum Motoryzacyjne. PAN–Komisja Budowy Maszyn, Oddział w Poznaniu, Politechnika Koszalińska. Słupsk 2010.
- [8] Wajand J.A., Wajand J.T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio – i szybkoobrotowe. WNT Warszawa 2000
- [9] Wiśniewski K.: Samochody osobowe. Opisy techniczne i dane regulacyjne. WKiŁ Warszawa 2007, wersja elektroniczna

Prof. Janusz Mysłowski, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Szczecin University of Technology.



Prof. dr hab. inż. Janusz Mysłowski – profesor na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Politechniki Szczecińskiej.