

Bartosz Radzymiński, Jarosław Goszczak

Stanowisko symulujące masę samochodu do badania prototypowego hybrydowego układu napędowego pod kątem obsługi mechanicznego akumulatora energii

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.463

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule przedstawiono stanowisko badawcze służące do sprawdzenia możliwości wykorzystania seryjnie produkowanej przekładni bezstopniowej JATCO CVT7 pod kątem obsługi mechanicznego akumulatora energii będącego wtórnym źródłem energii prototypowego hybrydowego układu napędowego.

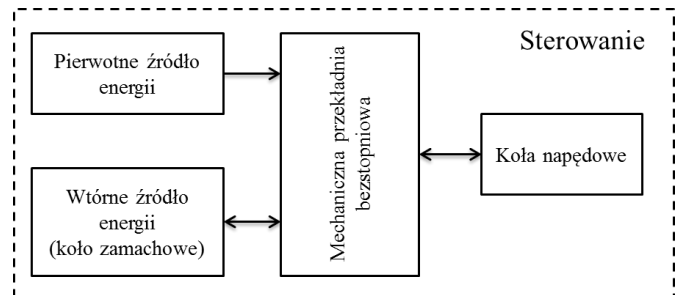
Wstęp

Nieustanne dążenie do zmniejszania emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach oraz zmniejszenia zużycia paliwa przez samochody osobowe przekłada się na stosowanie coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji silników spalinowych oraz układów przeniesienia napędu umożliwiających zwiększenie ich sprawności.

Pomysłem na zwiększenie ogólnej sprawności układu napędowego jest zastosowanie dodatkowego (wtórnego) źródła energii, które mogłoby zastąpić silnik spalinowy w obszarach jego najgorszej sprawności, i które byłoby w stanie gromadzić energię traconą podczas zmniejszania prędkości pojazdu w celu późniejszego oddania jej. Idee takie realizują hybrydowe układy napędowe łącząc w różnych konfiguracjach pierwotne źródło energii, którym najczęściej jest silnik spalinowy, z wtórnym źródłem energii. Najczęściej stosowanym przez producentów samochodów wtórnym źródłem energii są akumulatory magazynujące energię elektryczną współpracujące z silnikami i generatorami prądu – opisy takich układów znaleźć można w [1]. Obecnie zdecydowana większość producentów samochodów osobowych ma w swojej ofercie pojazdy wyposażone w taki układ [4].

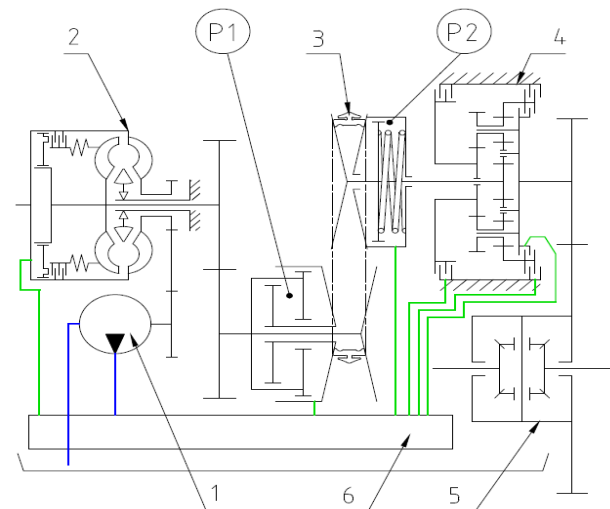
1. prototypowy hybrydowy układ napędowy

Zastosowanie wtórnego źródła energii w układzie napędowym samochodu osobowego ma umożliwić gromadzenie energii podczas hamowania samochodu w celu wykorzystania jej podczas przyspieszania. W przypadku wykorzystania mechanicznego akumulatora energii konieczne jest zwiększanie prędkości obrotowej zawartego w nim koła zamachowego podczas zwalniania samochodu (ładowanie akumulatora) oraz zmniejszania prędkości koła zamachowego podczas zwiększania prędkości samochodu (rozładowywanie akumulatora). Z tego powodu mechaniczne połączenie między kołami samochodu a akumulatorem energii powinno umożliwiać zmianę przełożenia w sposób ciągły.



Rys. 1. Ogólny schemat prototypowego hybrydowego układu napędowego

Prototypowy hybrydowy układ napędowy zakłada połączenie seryjnie produkowanej przekładni bezstopniowej JATCO CVT7 z dodatkowym źródłem energii – mechanicznym akumulatorem energii.



Rys. 2. Schemat mechaniczny przekładni CVT JATCO CVT7: 1 – pompa zasilająca w olej; 2 – przekładnia hydrokinetyczna; 3 – pas pchający (pushbelt); 4 – przekładnia planetarna typu Ravigneaux; 5 – przekładnia główna; 6 – sterownik elektrohydrauliczny; P1 – Siłownik wejściowego koła pasowego; S2 – Siłownik wyjściowego koła pasowego

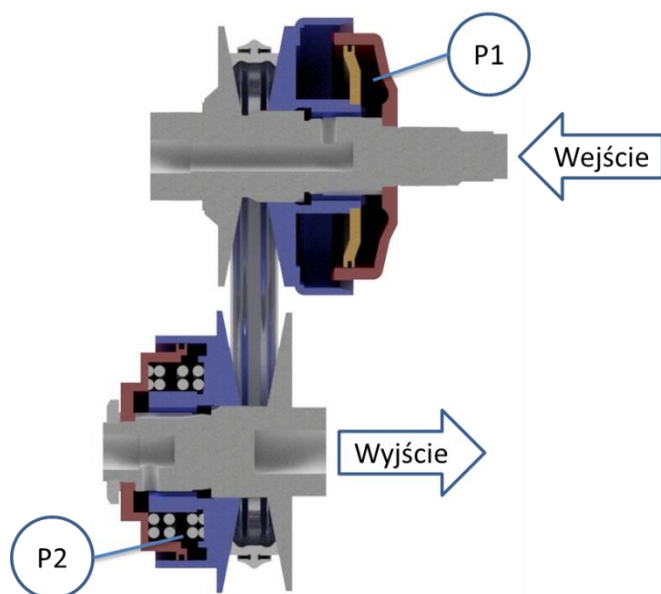
Za połączenie źródła napędu ze skrzynią biegów odpowiada przekładnia hydrokinetyczna (2), wyposażona w sprzęgło lock-up. W oryginalnym zastosowaniu w celu zapewnienia ciśnienia oleju w całym układzie, pompę (1) oleju sterującego i smarnego połączono z wałem wejściowym przez przekładnię łańcuchową. W związku z możliwością wystąpienia w hybrydowym układzie napędowym sytuacji, w których konieczne będzie zapewnienie możliwości zmiany przełożenia (wytworzenia ciśnienia) przy nieruchomej przekładni hydrokinetycznej, a więc i pompie oleju (sytuacja hamownia samochodu przy zatrzymanym mechanicznym akumulatorze energii),

konieczne jest zastosowanie niezależnego od warunków pracy skrzyni biegów źródła zasilania w olej. Za przekładnią hydrokinetyczną znajduje się przekładnia zębata, której zadaniem jest zmiana kierunku obrotów ($i_1=0,97$). Następnie napęd przekazywany jest na przekładnię bezstopniową (3).

Przełożenie przekładni bezstopniowej wyliczane było na podstawie wskazań czujników prędkości obrotowych kół pasowych jako iloraz prędkości obrotowej wyjściowego koła pasowego i wejściowego koła pasowego:

$$i_{cvt} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (1)$$

Przekładnia ta pozwala realizować przełożenia w zakresie $i_{cvt}=0,45-1,8$. Przekładnia planetarna typu Ravigneaux (4) umożliwia realizację trzech biegów: dwóch do jazdy wprzód o przełożeniach $i_{RAV1}=1$ oraz $i_{RAV2}=1,85$ i trzeci, do jazdy do tyłu o przełożeniu $i_{RAV R}=-1,71$. Z przekładni planetarnej napęd przekazywany jest do przekładni głównej (5) o przełożeniu $i_{PG}=3,88$.



Rys. 3. Półprzekrój modelu przekładni bezstopniowej zastosowanej w skrzyni biegów JATCO CVT7

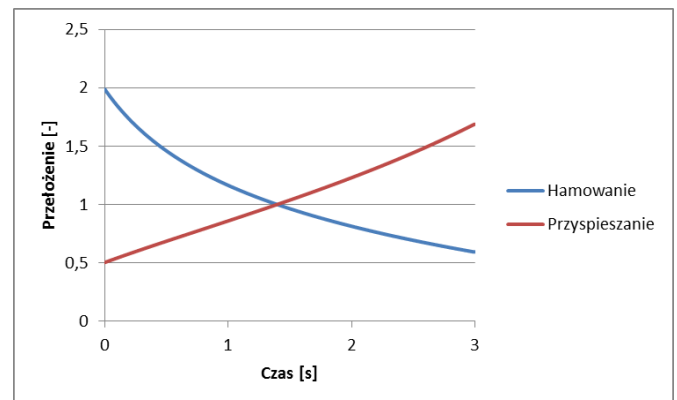
W sytuacji, w której ciśnienia P1 oraz P2 są stałe, przełożenie jest ustalone i nie występują makroślizgi, zmiana któregokolwiek z ciśnień spowoduje zmianę przełożenia oraz zmianę siły napinającej łańcuch. W omawianej przekładni, zderzaki mechanicznych ograniczników przesuwu kół stożkowych, umieszczone na kole pasowym znajdującym się po stronie źródła energii. Z tego powodu wtórne koło pasowe traktuje się jako odpowiedzialne za naciąg pasa ponieważ to koło nie oprze się o zderzak i będzie na nie działała siła wynikająca z ciśnienia oleju. Konsekwentnie koło pierwotne na ogół uważa się za odpowiedzialne za przełożenie. Z tego powodu w badaniach przekładni bezstopniowych najczęściej ustala się ciśnienie P2, zmieniając przełożenie ciśnieniem P1. Opis stosowanych obecnie rozwiązań bezstopniowych skrzyń biegów znaleźć można w [2]

2.obciążenie bezstopniowej przekładni

Moment obrotowy generowany w czasie zmiany prędkości obrotowej koła zamachowego obciąża przekładnię bezstopniową. W celu uniknięcia wystąpienia poślizgu pasa przekładni powinien zostać zapewniony wystarczający docisk pasa do kół stożkowych. Niemniej docisk ten nie powinien być zbyt duży ponieważ zwiększy-

ły on straty w przekładni i wymuszałby utrzymanie wysokiego ciśnienia oleju w siłownikach kół stożkowych.

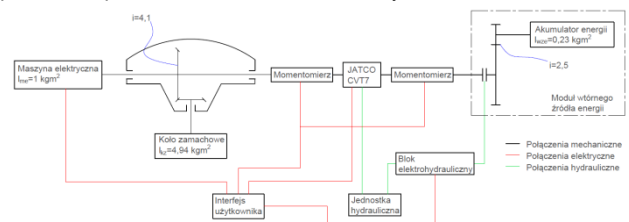
Zmiana prędkości samochodu podczas jego przyspieszania i hamowania przekłada się na zmianę prędkości obrotowej wtórnego źródła energii. Zmiana ta zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona powoduje powstanie momentu obrotowego przekazywanego między kołami napędowymi a wtórnym źródłem energii. Moment ten musi zostać przeniesiony przez bezstopniową przekładnię, znajdującą się pomiędzy wspomnianymi elementami, bez ryzyka wystąpienia poślizgu pasa. W celu uniknięcia tego powinien zostać zapewniony wystarczający docisk pasa do kół stożkowych. Docisk ten nie powinien być zbyt duży ponieważ zwiększyłby on straty w przekładni bezstopniowej i wymuszałby utrzymanie wysokiego ciśnienia oleju w siłownikach kół stożkowych.



Rys. 4. Przykładowy przebieg zmiany przełożenia przekładni bezstopniowej potrzebnej do naładowania oraz rozładowania mechanicznego akumulatora energii

3.stanowisko badawcze

Zadaniem zbudowanego stanowiska jest sprawdzenie możliwości akumulowania i oddawania energii do pojazdu przez wtórne źródło energii w określonym przez proces hamowania i przyspieszania czasie (zachowanie odpowiedniego di_{cvt}/dt), bez ryzyka wystąpienia poślizgu pasa. Kluczowe jest również określenie sprawności procesu ładowania i rozładowywania akumulatora.



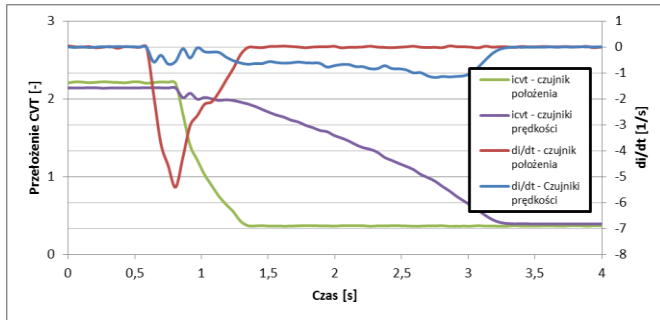
Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

W celu zapewnienia możliwości sterowania przekładnią bezstopniową w opisanym wcześniej przypadku, stanowisko badawcze wyposażono w zewnętrzną jednostkę hydrauliczną posiadającą zbiornik oleju i pompę objętościową z możliwością regulacji prędkości obrotowej. Wyjście tej jednostki hydraulicznej wprowadzono w miejsce odłączonej uprzednio oryginalnej pompy oleju będącej na wyposażeniu skrzyni biegów JATCO CVT7. Dzięki temu wszystkie możliwości sterowania skrzynią biegów są dostępne niezależnie od napędu ze źródła głównego, ponieważ sterownik elektrohydrauliczny jest ciągle zasilany w olej i poprzez interfejs użytkownika może realizować wszystkie funkcje.

Dokładniejszy opis użytych na stanowisku maszyn elektrycznych znaleźć można w [3].

Do zweryfikowania czy wystąpił poślizg pasa, służy dodatkowy czujnik przemieszczenia ruchomego koła stożkowego po stronie

wtórnej. Położenie tego koła związane jest jednoznacznie z przełożeniem gdy nie ma poślizgu. Porównanie go z rzeczywistym przełożeniem obliczonym ze stosunku prędkości obrotowych kół stożkowych pozwala wnioskować o obecności lub nie poślizgu.



Rys. 6. Przykładowe zestawienie próby podczas której wystąpił poślizg pasa

Analiza wskazań tych czujników pozwala na określenie szybkości zmiany przełożenia.

Do określenia sprawności przekładni podczas ładowania i rozładowywania mechanicznego akumulatora energii potrzebne jest obliczenie mocy na wejściu i wyjściu przekładni. Służą do tego momentomierze wyposażone w mierniki obrotów.

W związku z koniecznością wykonania badań w laboratorium oraz niezachęcającym doświadczeniem z symulowaniem bezwładności na drodze elektrycznej, zdecydowano się na użycie koła zamachowego mającego za zadanie zastąpienie masy samochodu. Moment bezwładności tejże masy został tak dobrany aby wraz z momentem bezwładności wirnika silnika elektrycznego był równy zredukowanej do osi kół bezwładności masy całego samochodu:

$$I_{sam} = m_{sam} \cdot r_d^2 = 1000 \cdot 0,29^2 = 84,1 \text{ kgm}^2 \quad (2)$$

Ten moment bezwładności będzie zastąpiony sumą momentu bezwładności wirnika maszyny elektrycznej i połączonego przekładnią o przełożeniu 4,1 koła zamachowego.

$$I_{me} + I_{kz} \cdot i^2 = I_{sam} \rightarrow I_{kz} = \frac{I_{sam} - I_{me}}{i^2} = \frac{84,1 - 1}{4,1^2} = 4,94 \text{ kgm}^2 \quad (3)$$

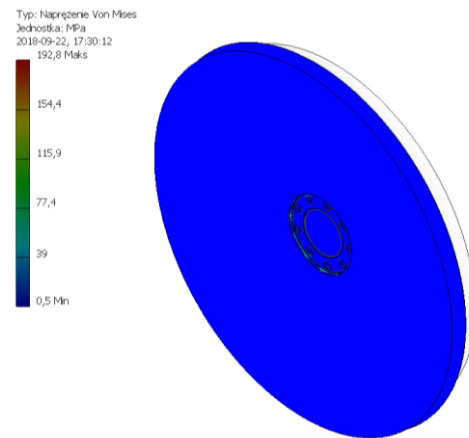
Koło zamachowe zaprojektowano używając oprogramowania Autodesk Inventor 2017. Ograniczenie średnicy zewnętrznej i szerokości wynikało z wykorzystania istniejącej obudowy koła zamachowego, która używana była podczas badań innego prototypu zakładającego gromadzenie energii w kole zamachowym.



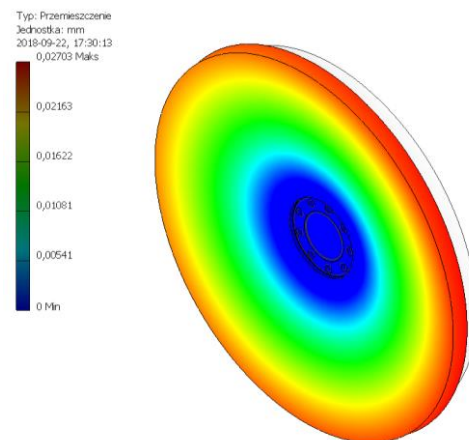
Rys. 7. Przekrój modelu koła zamachowego symulującego masę samochodu

W następnej kolejności model poddano analizie wytrzymałościowej przy użyciu metody elementów skończonych.

a)



b)



Rys. 8. Wyniki analizy koła zamachowego przy użyciu metody elementów skończonych a) Naprężenia zredukowane b) Przemieszczenia

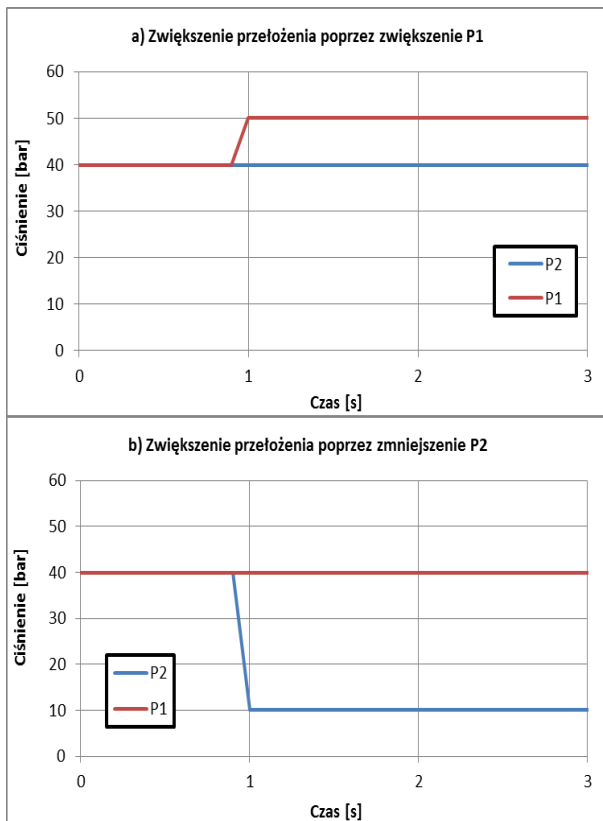


Rys. 8. Stanowisko badawcze znajdujące się w Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej

4. Plan badań

Przy ładowaniu oraz rozładowywaniu mechanicznego akumulatora energii, podczas przebiegu zmiany przełożenia w czasie, konieczne jest sprawdzanie obecności poślizgu oraz strat mechanicznych. Podczas prowadzenia badań na opisanym stanowisku badawczym wymagane jest sprawdzenie na ile wystarczające jest tradycyjne traktowanie ciśnienia P2 działającego na powierzchnię tłoczyska A2 jako siły napinającej pas, pozostawiając zmiennemu P1 rolę zmiany przełożenia, czy też przez jednoczesną zmianę ciśnień P2 oraz P1 zapewniać odpowiednie napięcie pasa oraz wymagane przełożenie.

W sytuacji ruszenia od ustalonych warunków pracy, aby zmienić przełożenie przy stałym ciśnieniu P2, należy zmienić ciśnienie P1. Im ta zmiana będzie większa tym większa będzie prędkość zmiany przełożenia. Mechanizm przechodzenia łańcucha na inne promienie kontaktu z kołami, wymaga przyłożenia siły tym większej im większa ma być prędkość zmiany przełożenia. Problematiczna jest sytuacja gdy ciśnienie P1 znajduje się blisko skrajnych możliwych do uzyskania ciśnień, to napędzająca zmianę przełożenia różnica ciśnień początkowego i zadanego, jest ograniczona. W takim wypadku można zrezygnować ze stałości ciśnienia P2 i to ciśnienie wykorzystać do zmiany przełożenia. Sytuacje takie przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Zwiększenie przełożenia poprzez a) zwiększenie P1; b) zmniejszenie P1

W sytuacji przedstawionej na wykresie 3b), możliwa do uzyskania różnica ciśnień w odniesieniu do stanu ustalonego, powodującego zwiększenie przełożenia jest znacznie większa (30bar) niż w sytuacji przedstawionej na wykresie 3a), gdzie różnica ciśnień w odniesieniu do stanu ustalonego jest znacznie mniejsza (10bar).

Bibliografia

1. BOSCH, *Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne*, WKiŁ, Warszawa 2010.
2. BOSCH, *Elektroniczne sterowanie skrzynką biegów EGS*, WKiŁ, Warszawa 2005
3. Pawelski Z. *Falowniki ABB + moc krążąca = oszczędność energii na stanowisku badawczym*. *Napędy i Sterowanie*, nr 4, 2005. s.14-16
4. <http://www.motonews.pl/auta-nowe/hybrydowe/> Dostęp: 7.5.2018

Podziękowania

Autorzy niniejszego artykułu pragną podziękować panu prof. Zbigniewowi Pawelskiemu oraz panu dr Andrzejowi Wernerowi za ich pomoc w trakcie badań i przygotowaniu tego artykułu.

Verifying the methodology for speed of ratio changes of continuously variable transmission of a hybrid drivetrain

The article presents a test stand used to check the possibility of using a series-produced JATCO CVT7 continuously variable transmission for operating a mechanical energy accumulator which is a secondary energy source of a prototype hybrid drive system.

Autorzy:

mgr inż. **Bartosz Radzyński** – Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, bartosz.radzynski@p.lodz.pl

mgr inż. **Jarosław Goszczak** - Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, jaroslaw.goszczak@p.lodz.pl