

Article citation info:

Radzyński B. Tests of prototypical efficiency of the variable-speed chain transmission of hybrid driving system for a car. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2018; 79: 53-64, <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL79.ART4>

Badania sprawności prototypowej bezstopniowej przekładni łańcuchowej hybrydowego układu napędowego samochodu osobowego

BARTOSZ RADZYMIŃSKI¹

KATEDRA POJAZDÓW I PODSTAW BUDOWY MASZYN
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono stanowisko badawcze, sposób prowadzenia oraz wyniki badań strat oraz sprawności prototypowej bezstopniowej przekładni łańcuchowej, która ma znaleźć zastosowanie w prototypowym hybrydowym układzie napędowym. Przekładnia ta ma służyć jako moduł bezstopniowy łączący wtórne źródło energii - koło zamachowe oraz silnik spalinowy z kołami pojazdu. Ponadto w artykule przedstawiono ideę prototypowego układu napędowego wraz z wyjaśnieniem działania.

W zaproponowanym rozwiązaniu układu napędowego kluczowa jest sprawność bezstopniowej przekładni zarówno podczas przenoszenia mocy do kół napędowych z silnika spalinowego i z akumulatora energii, jak i z kół do akumulatora energii.

Badania wykazały, że w obszarze przenoszenia małych obciążeń sprawność przekładni spada, mimo że ze wzrostem przenoszonego obciążenia straty rosną. Ponadto badana przekładnia charakteryzuje się większą sprawnością przy pracy w trybie reduktora niż multiplikatora prędkości obrotowej. Zauważono i wyjaśniono istnienie obszaru pracy przekładni, gdzie jej straty mechaniczne pokrywane są poprzez dopływ mocy z obu kierunków.

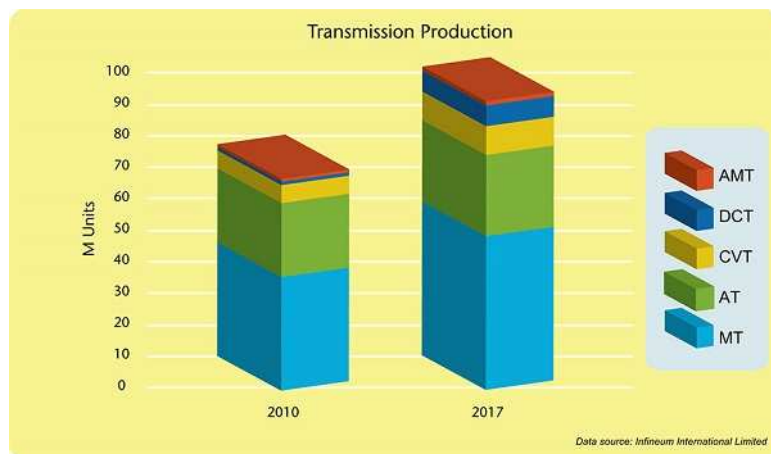
Słowa kluczowe: Przekładnia bezstopniowa, CVT, straty, sprawność

¹ Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, Poland; e-mail: bartosz.radzynski@p.lodz.pl

1. Wstęp

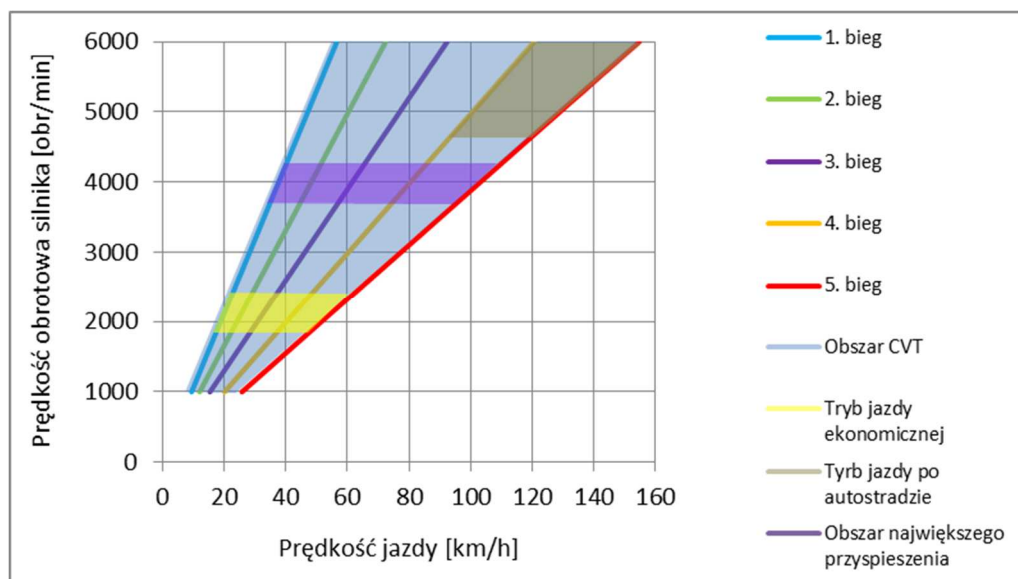
Wprowadzenie bezstopniowej przekładni w układzie napędowym samochodu miało miejsce ponad sto lat temu [3]. W 1958 za sprawą firmy DAF rozwiązanie takie zostało zastosowane w seryjnie produkowanym modelu 600 pod nazwą Variomatic.

Szybki rozwój inżynierii materiałowej, elektroniki oraz automatyki umożliwił rozwój tego typu przekładni. Jak widać na rysunku 1, zakładana liczba wyprodukowanych przekładni automatycznych w 2017 roku w porównaniu do 2010 wzrosła – w tym przekładni bezstopniowych.



Rys. 1. Zestawienie udziału poszczególnych rodzajów typów skrzyń biegów w latach 2010 oraz 2017 [7]; AMT – zautomatyzowane ręczne skrzynie biegów; DCT – dwusprzęgłowe skrzynie biegów; CVT – bezstopniowe skrzynie biegów; AT – klasyczna automatyczna skrzynia biegów; MT – ręczna skrzynia biegów

Rosnąca popularność bezstopniowych układów napędowych wynika z ich zalet takich jak elastyczność i możliwość realizowania różnych strategii sterowania, na przykład kryterium maksymalnego momentu obrotowego, mocy maksymalnej lub najmniejszego jednostkowego zużycia paliwa.



Rys. 2. Zakres przełożeń bezstopniowej przekładni w porównaniu z konwencjonalną pięciobiegową skrzynią biegów

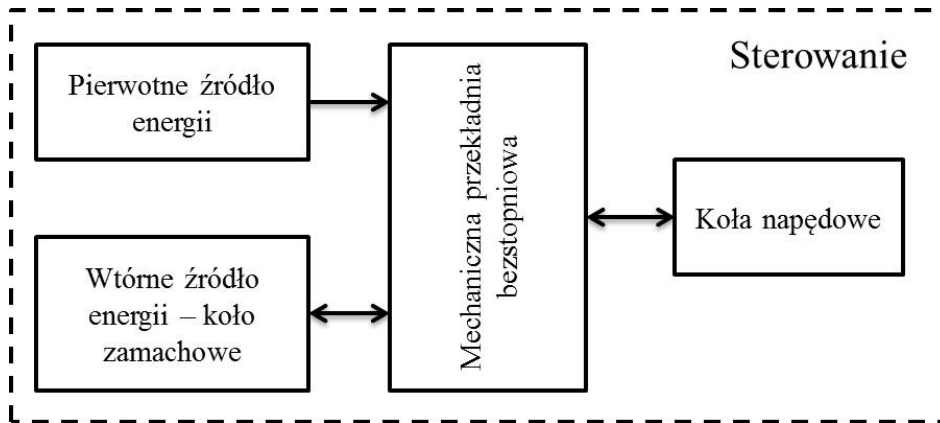
Kolejną zaletą stosowania takiej przekładni jest ciągłość w przekazywaniu momentu obrotowego z elementu wejściowego na wyjściowy.

W związku z tym stosowanie skrzyni biegów z bezstopniową zmianą przełożenia wraz z poprawnym algorytmem sterującym powinno przenieść się na:

- Obniżenie zużycia paliwa i zmniejszenie emisji substancji szkodliwych w spalinach
- Poprawę własności dynamicznych pojazdu
- Wzrost komfortu prowadzenia pojazdu
- Możliwość stosowania mniej elastycznych, więc tańszych silników

2. Prototypowy hybrydowy układ napędowy z mechanicznym akumulatorem energii

W proponowanym rozwiązaniu do bezstopniowego układu napędowego dołączone zostało wtórne źródło energii - mechaniczny akumulator energii. W takim układzie podczas hamowania pojazdu jego energia kinetyczna zamieniana jest w energię kinetyczną koła zamachowego i odwrotnie - podczas ruszania energia kinetyczna koła zamachowego zamieniana jest w energię kinetyczną samochodu. W obu przypadkach konieczne jest zapewnienie wystąpienia przyspieszenia lub opóźnienia kątownego koła zamachowego, w celu wytworzenia momentu hamującego lub momentu napędowego dla pojazdu. Aby móc w taki sposób przekazywać energię, przełożenie między kołami samochodu a kołem zamachowym powinno zmieniać się w sposób ciągły. Umożliwia to łańcuchowa przekładnia bezstopniowa – ta sama która łączy pierwotne źródło energii z kołami.



Rys. 3. Idea prototypowego hybrydowego układu napędowego

Prototypowy układ umożliwia pracę w podobnych trybach, w jakich działają obecnie produkowane pojazdy hybrydowe [4]:

- Tryb wykorzystujący pierwotne źródło energii
- Tryb wykorzystujący wtórne źródło energii
- Tryb wykorzystujący dwa źródła energii
- Hamowanie z odzyskiem energii
- Tryb ładowania akumulatora energii z silnika spalinowego

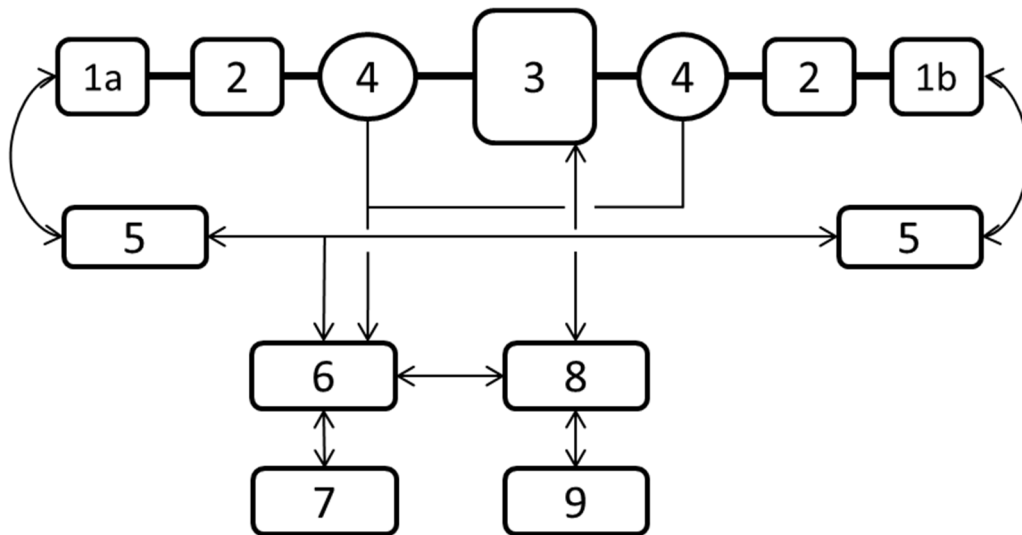
W takim rozwiązaniu wymagana jest duża szybkość i precyzja zmiany przełożenia przekładni bezstopniowej w całym jego zakresie.

Za zmianę przełożenia oraz naciąg łańcucha odpowiedzialne są hydrauliczne siłowniki.

Siły naporu w stożkowych kołach przekładni są generowane przez oddziaływanie ciśnienia (odpowiednio P1 oraz P2) na powierzchnie naporu - powierzchnie te są sobie równe. W tym układzie pierwotne koło pasowe odpowiedzialne jest za ustalenie przełożenia, a wtórne koło pasowe odpowiedzialne jest za naciągnięcie pasa w takim stopniu, aby był on w stanie bez poślizgu przenieść moment obrotowy. Podział ten wynika z faktu umieszczenia ograniczników osiowego przemieszczenia ruchomego koła stożkowego na wejściowym kole pasowym. Obszerniejszy opis układu zasilania bezstopniowej przekładni znaleźć można w [5] oraz [6].

3. Stanowisko badawcze

Na rysunku 4 przedstawiono schemat stanowiska znajdującego się w Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej, na którym prowadzone były badania.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego; 1 – Maszyny elektryczne; 2 – Przekładnie mechaniczne; 3 – Badana bezstopniowa przekładnia; 4 – Momentomierze; 5 – Falowniki; 6 – Sterownik z rozbudowanym systemem wejść/wyjść; 7 – Interfejs użytkownika; 8 – Bloki hydrauliczne (zespoły rozdzielaczy); 9 – Grupa hydrauliczna

Do napędu i hamowania badanej przekładni bezstopniowej (3) wykorzystano maszyny elektryczne (1). Dzięki zastosowaniu falowników (5) możliwe było płynne sterowanie tych maszyn w zakresach momentu $\pm 500\text{Nm}$ lub prędkości obrotowej $\pm 3000\text{obr/min}$. W celu dopasowania maksymalnych możliwych do uzyskania prędkości obrotowych, do badanego obiektu zastosowano przekładnie mechaniczne służące jako reduktor i multiplikator (2). W celu pomiaru momentu obrotowego na wejściu i wyjściu badanej przekładni użyto dwóch momentomierzy (4). Więcej informacji o zespole napędowym stanowiska, w którym w celu zmniejszenia poboru mocy wykorzystano zjawisko mocy krążącej znaleźć można w [1].

Konstrukcja prototypowej przekładni bezstopniowej zakłada sterowanie jej z zastosowaniem systemu elektro-hydraulicznego. Do zasilenia bloków hydraulicznych (8) umożliwiających płynną zmianę ciśnienia (a przez to zmianę przełożenia oraz siły napinającej łańcuch) użyto zewnętrznej grupy hydraulicznej (9).

Poprzez interfejs użytkownika (7), operator oddziałuje na sterownik (6). Dzięki temu możliwe jest nastawianie oraz odczytywanie danych związanych z pracą stanowiska oraz badanego obiektu.

4. Przeprowadzone badania

W przedstawionych wynikach momentem „od źródeł napędu” nazwany został moment od strony silnika spalinowego lub koła zamachowego działający na pierwotne koło pasowe. Znak tego momentu jest dodatni, gdy przepływ energii odbywa się od silnika (koła zamachowego) do kół pojazdu. Jest ujemny, gdy przepływ energii jest w kierunku odwrotnym.

Momentem „od kół” nazywamy moment działający od strony kół na wtórne koło pasowe. Ten moment jest dodatni, gdy moc przekazywana jest od źródeł do kół (czyli przeciwstawia się źródłom energii).

Na stanowisku, odpowiednikiem źródeł energii jest maszyna 1a, a odpowiednikiem kół pojazdu – maszyna 1b.

W przeprowadzonych badaniach przełożenie przekładni bezstopniowej zdefiniowane zostało jako:

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

gdzie:

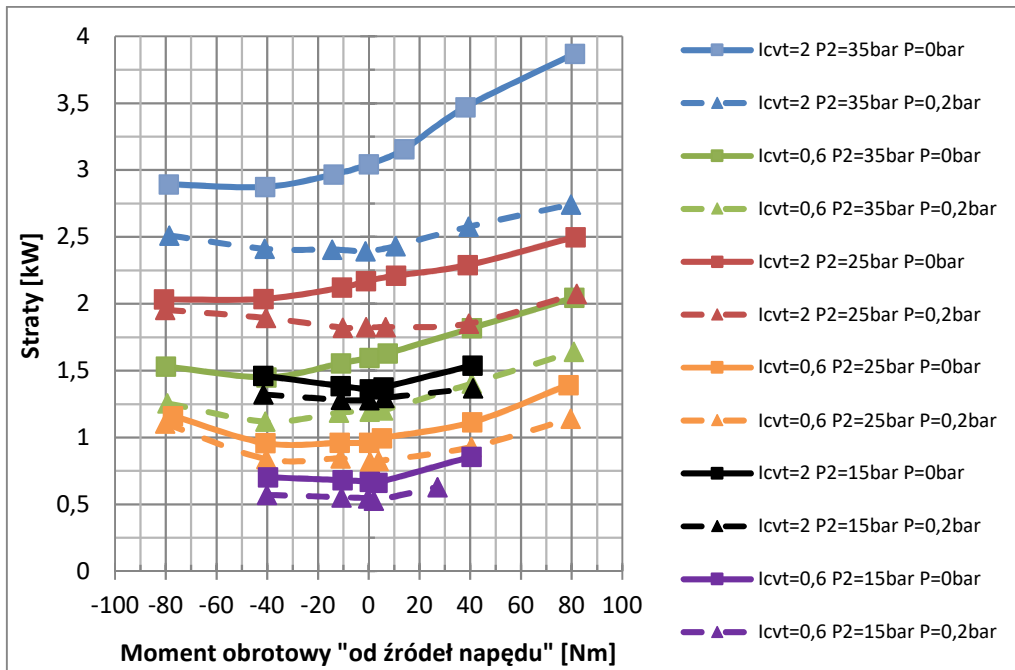
ω_2 – prędkość obrotowa wyjściowego elementu (obr/min),

ω_1 – prędkość obrotowa wejściowego elementu (obr/min).

4.1. Wpływ oporów brodenia na straty

Podczas prowadzenia badań zauważono niedostateczne odprowadzanie oleju z korpusu badanej przekładni. Wytworzenie nadciśnienia (oznaczanego dalej jako P) przez doprowadzenie powietrza do wewnątrz korpusu poprzez zwiększenie prędkości wypływu oleju obniżyło jego poziom. Wpłynęło to na zmniejszenie strat wynikających z oporów brodenia. Wykres zamieszczony na rysunku 5 przedstawia to zjawisko podczas próby wykonanej przy następujących warunkach:

- Temperatura oleju: 80°C
- Wejściowa prędkość obrotowa: 2000 obr/min



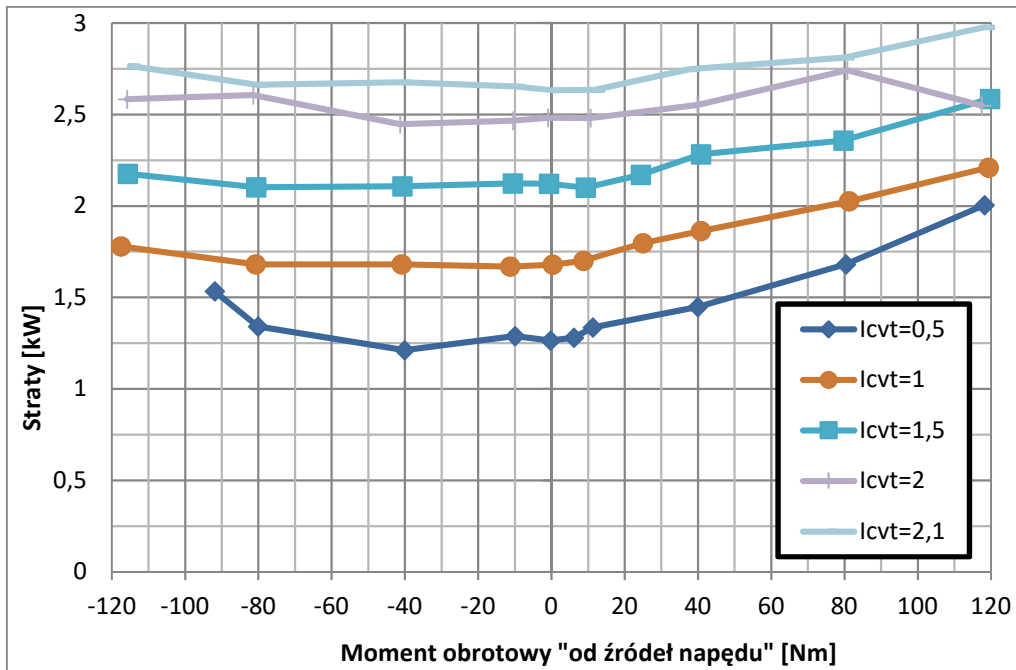
Rys. 5. Wpływ obniżenia poziomu oleju na straty

Względnie duża wartość wpływu strat brodzenia wskazuje na konieczność poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych, umożliwiających zmniejszenie tych strat. W celu obniżenia tych strat w czasie badań w dalszej części artykułu przedstawiane będą tylko przypadki z nadciśnieniem $P=0,2\text{bar}$.

4.2. Straty generowane przez przekładnię

W procesie przekazywania energii, bardzo ważnym czynnikiem warunkującym wybór przetwornika energii jest poziom generowanych przez niego strat. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań, mających na celu ich określenie wykonane przy następujących warunkach:

- Temperatura oleju: 80°C
- Ciśnienie w siłowniku wtórnego koła pasowego (P2): 35bar (minimalne ryzyko wystąpienia poślizgu łańcucha)
- Wejściowa prędkość obrotowa: 2000 obr/min

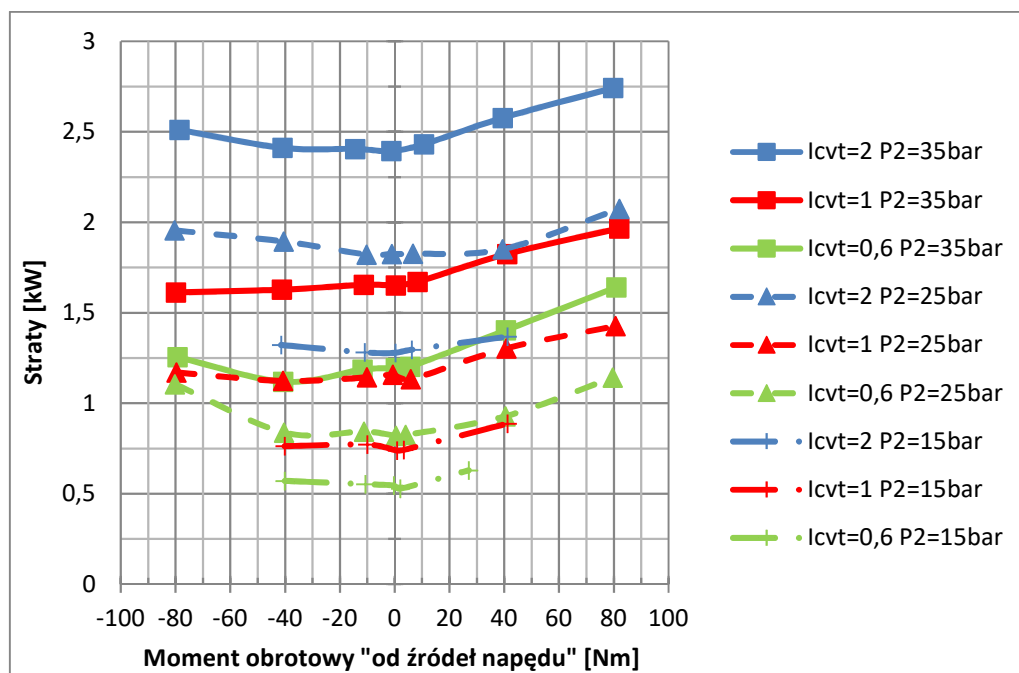


Rys. 6. Straty generowane przez bezstopniową przekładnię

Generowane straty są tym większe, im większe jest przełożenie i im większy (zarówno dodatni jak i ujemny) jest przenoszony moment obrotowy. Jednak decydującą częścią strat jest część niezależna od przenieszonego momentu.

4.3. Wpływ ciśnienia w siłowniku wtórnego koła pasowego na straty

Znany jest fakt, że straty zwiększają się wraz ze wzrostem napięcia pasa, uzyskiwanym przez zwiększenie ciśnienia w siłowniku wtórnego koła pasowego. Ważna jest ocena tego wpływu. Wyniki podane są na wykresie zamieszczonym na rysunku 7.



Rys. 7. Wpływ zmniejszenia ciśnienia P2 na straty

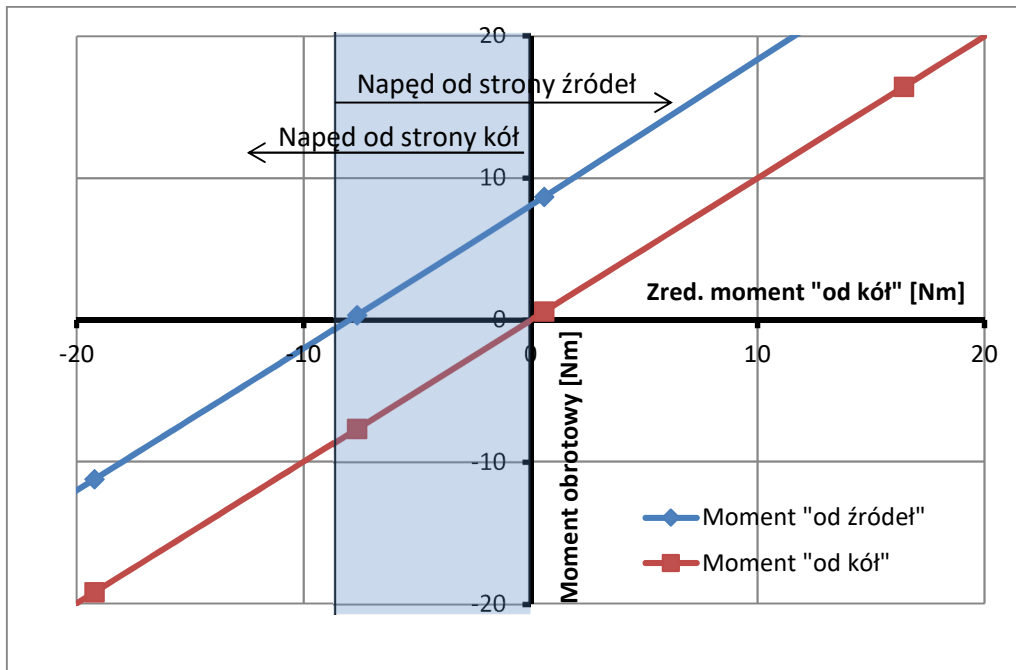
Uzyskane wyniki wyraźnie wskazują, że im mniejsze P2 tym mniejsze straty. Nie można jednak obniżyć tego ciśnienia poniżej granicy wystąpienia trwałego poślizgu łańcucha. Z tego powodu zrozumiałe jest sterowanie przekładnią w obszarze mikro poślizgów, co zostało szerzej opisane w [2].

4.4. Obszar braku możliwości określenia sprawności

Rysunek 8 porównuje zredukowany (uwzględniający przełożenie) moment „od kół” i moment „od źródeł energii”. Gdyby nie było strat przekładni, obie proste nałożyłyby się na siebie. Dodatni moment obrotowy od źródeł oznacza, że przekładnia otrzymuje moc od tej strony. Podobnie ujemny moment od kół oznacza otrzymywanie mocy od strony kół. Zauważa się ciekawy, zacieniony na rysunku obszar, w którym straty przekładni pokrywane są przez dostawy mocy z obu stron. Moc dostarczana od źródeł nie wystarcza do pokonania strat i te częściowo muszą być pokryte przez napęd od strony kół.

Z definicji, sprawność przekładni jest stosunkiem mocy wychodzącej do mocy wchodzącej w procesie przenoszenia mocy. Gdyby chcieć zastosować tę definicję do wspomnianego obszaru, trudno określić, co jest właściwie wejściem, a co wyjściem, a w obu przypadkach wartość sprawności byłaby ujemna. Dlatego proponuje się jej nie obliczać w tym obszarze.

- Przełożenie przekładni: 1
- Temperatura oleju: 60°C
- Ciśnienie w siłowniku wtórnego koła pasowego (P2): 35bar (minimalne ryzyko wystąpienia poślizgu łańcucha)
- Wejściowa prędkość obrotowa: 2000 obr/min

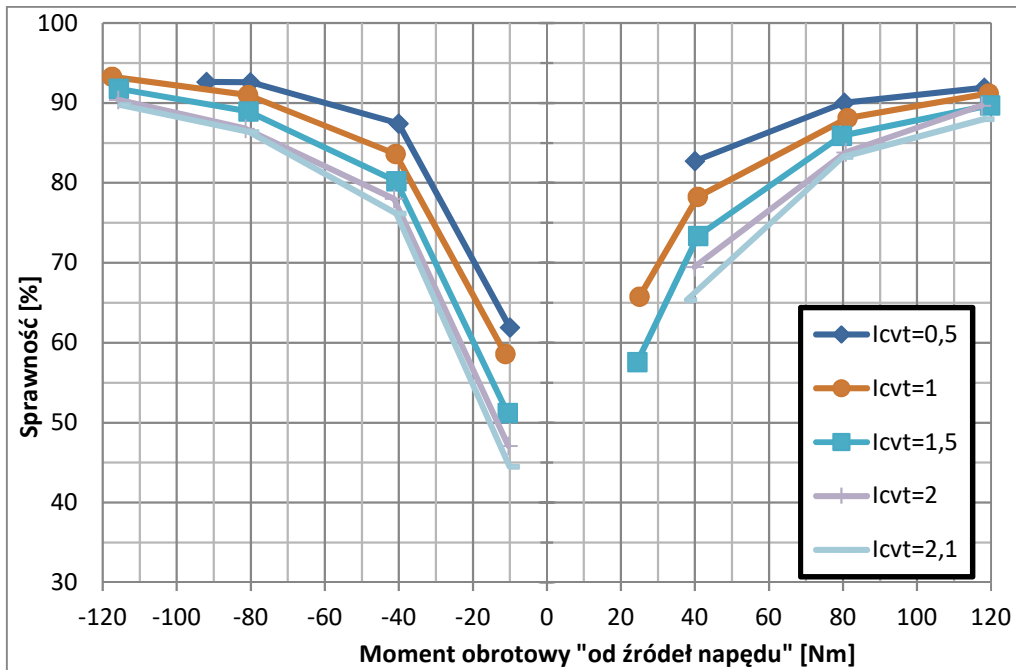


Rys. 8. Porównanie momentów po obu stronach przekładni

4.5. Sprawność przekazywania mocy badanej przekładni bezstopniowej

Na rysunku 9 przedstawiono wykresy sprawności przekładni w funkcji przenoszonego momentu. Jak można się było spodziewać z przebiegu strat, sprawność wzrasta ze wzrostem wartości bezwzględnej momentu. Dla obszaru bardzo małych obciążeń, zgodnie z analizą podaną w p. 4.4, sprawności nie policzono. Charakterystyki sprawności wyznaczono przy następujących warunkach :

- Temperatura oleju: 80°C
- Ciśnienie w siłowniku wtórnego koła pasowego (P2): 35bar
- Wejściowa prędkość obrotowa: 2000 obr/min



Rys. 9. Sprawność badanej bezstopniowej przekładni

5. Wnioski

- Warto szukać rozwiązań konstrukcyjnych zmniejszających wpływ strat brodzenia ze względu na ich duży udział w całości strat.
- Im mniejsze ciśnienie powodujące naciąg łańcucha, tym mniejsze starty. Niemniej jednak zbyt małe ciśnienie, a więc siła naciągająca łańcuch stanowi większe ryzyko powstania poślizgu. Warto zatem szukać rozwiązań w układach sterowania, które umożliwią pracę niewiele ponad bezpiecznym marginesem, zapobiegającym zniszczeniu przekładni.
- Uzyskane podczas badań wartości strat oraz sprawności przekładni nie wykluczają jej jako bezstopniowego modułu hybrydowego układu napędowego. Niemniej jednak warto szukać rozwiązań zapewniających zmniejszenie strat.

Podziękowania

Autor niniejszego artykułu pragnie podziękować Panu prof. Zbigniewowi Pawelskiemu oraz Panu dr Andrzejowi Wernerowi za ich pomoc w trakcie badań i przygotowanie tego artykułu.

Literatura

- [1] Pawelski Z.: Falowniki ABB + moc krążąca = oszczędność energii na stanowisku badawczym. Napędy i sterowanie, nr 4, 2005. s.14-16.

- [2] Bonsen B. Efficiency optimization of the push-belt CVT by variator slip control. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven; 2006.
- [3] Grzegozek W.: Przekładnie o ciągłej zmianie przełożenia (CVT) w układach napędowych pojazdów. Kraków: Politechnika Krakowska; 2011.
- [4] Bosch. Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne. WKŁ. 2010.
- [5] Jantos J. Zintegrowane sterowanie samochodowym, spalinowym układem napędowym o przełożeniu zmiennym w sposób ciągły. Opole: Politechnika Opolska; 2003
- [6] Radzymiński B., Goszczak J. Wypracowanie ciśnień do sterowania przełożeniem bezstopniowej przekładni samochodowej. Archiwum Motoryzacji. 2016; Nr 4/2016: s.95-104. DOI: 10.14669/AM.VOL74.ART9.
- [7] Infineum International Limited. Dostęp 10.07.2017:
<http://www.infineuminsight.com/insight/dec-2012/gearing-up>