

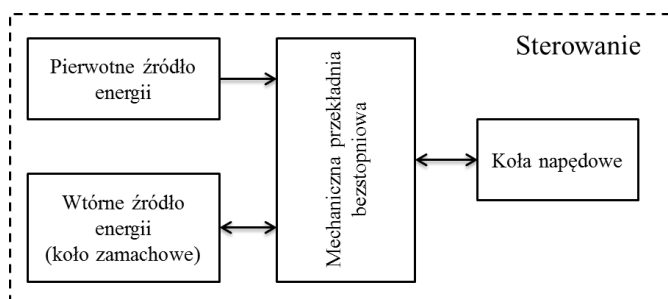
WPROWADZENIE NIELINIOWEGO REGULATORA W CELU POPRAWIENIA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH PROTOTYPOWEGO UKŁADU STEROWANIA PRZEKŁADNIĄ BEZSTOPNIOWĄ

W artykule omówiony został sposób implementacji zmiennych zastaw członu proporcjonalnego regulatora przełożenia hybrydowego układu sterowania bezstopniową przekładnią.

WSTĘP

Układy napędowe samochodów osobowych wyposażone w bezstopniowe przekładnie stają się coraz bardziej popularne. Za korzystaniem z takiego rozwiązania przemawia wiele zalet takich jak zwiększenie dynamiki pojazdu wraz ze zmniejszeniem zużycia paliwa spowodowanym możliwością utrzymania silnika w danym obszarze pracy. Z punktu widzenia sterowania samochodem, bezstopniowe przekładnie służą do zmiany przełożenia a więc do dopasowania momentu obrotowego za skrzynią biegów do momentu oporów ruchu samochodu.

Rosnąca popularność hybrydowych układów napędowych skłania do poszukiwania coraz to nowszych i bardziej zaawansowanych rozwiązań magazynowania i oddawania energii kinetycznej zwalniającego samochodu. O ile w układach napędowych wykorzystujących maszyny elektryczne moduł ten stanowić może odpowiednio połączona i sterowana przekładnia planetarna (e-CVT), o tyle w układzie napędowym z mechanicznym akumulatorem energii najbardziej racjonalnym wydają się być wykorzystanie mechanicznej przekładni bezstopniowej. Najlepiej tej samej, która w trybie pracy wykorzystującym tylko silnik spalinowy mogłaby pełnić rolę skrzyni biegów. Schemat takiego prototypowego hybrydowego układu napędowego przedstawiono na rysunku 1.



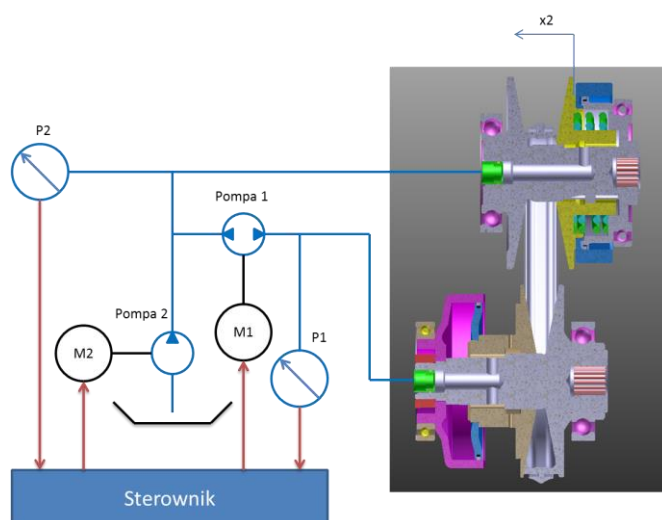
Rys. 1. Schemat prototypowego hybrydowego układu napędowego

W takim hybrydowym układzie napędowym kluczowa jest szybkość zmiany przełożenia, która bezpośrednio przekłada się na wytworzenie momentu hamującego oraz napędzającego zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona.

1. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU

1.1. Prototypowy układ sterowania

Prototypowy układ sterowania hydraulicznego bezstopniowej przekładni przedstawiony został na rysunku 2. Składa się z dwóch pomp hydraulicznych. Pompa druga (Pompa 2) odpowiedzialna jest za wytworzenie siły dociskającej pas do kół stożkowych zapewniającej przy danym przełożeniu i momencie obrotowym pracę bez poślizgu pasa (pośrednio sprawdzane przez czujnik ciśnienia P2), napełnienie układu hydraulicznego olejem i pokrycie przecieków. Pompa pierwsza (Pompa 1) odpowiada za przepompowywanie oleju między siłownikami kół pasowych, co powoduje zmianę położenia siłowników a w efekcie zmianę przełożenia przekładni. Każda z pomp napędzana jest silnikiem elektrycznym, z czego silnik pompy pierwszej może pracować w dwóch kierunkach. Powierzchnie robocze tłoków kół pasowych są jednakowe.



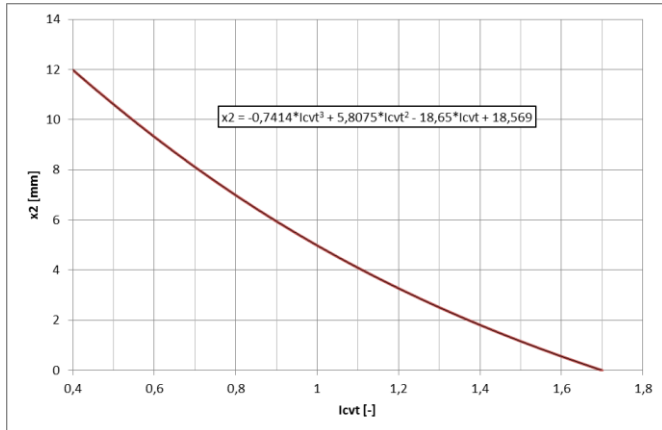
Rys. 2. Schemat prototypowego układu hydraulicznego sterowania bezstopniową przekładnią pasową

1.2. Nieliniowość sterowanego obiektu

W niniejszej pracy przełożenie bezstopniowej przekładni zdefiniowane zostało jako stosunek prędkości obrotowej koła wyjściowego do prędkości obrotowej koła wejściowego:

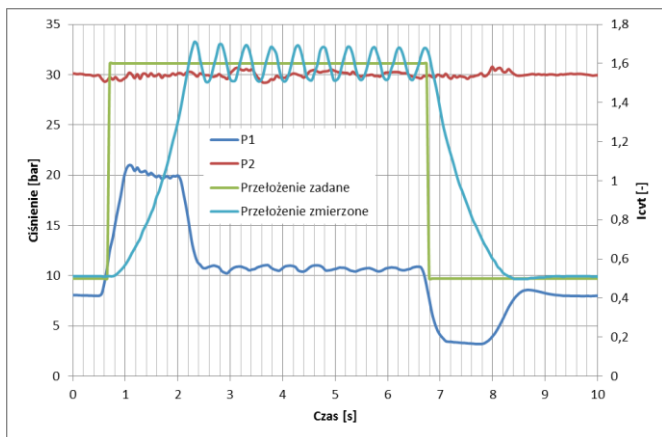
$$I_{cvt} = \frac{\omega_{wyj}}{\omega_{wej}} \quad (1)$$

Nieliniowość badanego obiektu polega na tym, że jednostkowa zmiana przesunięcia kół stożkowych nie przenosi się na stałą zmianę przełożenia w całym zakresie pracy. Opisane zjawisko przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Położenie wyjściowego koła stożkowego w funkcji przełożenia przekładni bezstopniowej

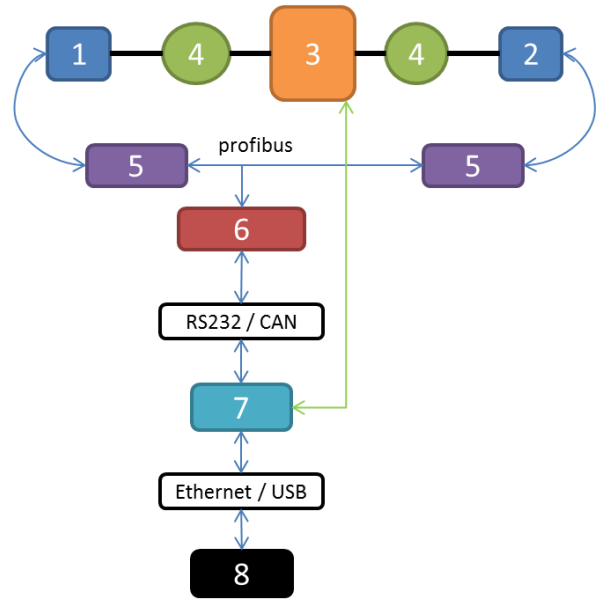
Ustawienie stałych nastaw regulatora PID zapewniających stabilną pracę dla przełożeń przyspieszających powoduje zmniejszenie szybkości działania regulatora dla przełożeń zwalniających. Z kolei zaimplementowanie nastaw zmniejszających czas reakcji dla przełożeń zwalniających sprzyja powstawaniu niestabilności przy przełożeniach przyspieszających. Drugie z opisanych zjawisk przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wypadek przejścia układu regulacji przełożenia z pracy stabilnej przy małym przełożeniu do pracy niestabilnej przy dużym przełożeniu

2. STANOWISKO BADAWCZE

Na rysunku 5 przedstawiono schemat połączeń mechanicznych oraz elektrycznych znajdujących się na stanowisku badawczym.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

Do napędu i hamowania skrzyni biegów (3) wykorzystano silniki elektryczne (1, 2). Pomiędzy maszynami elektrycznymi a skrzynią biegów zamontowano momentomierze (4). Regulacja prędkości lub momentów obrotowych maszyn elektrycznych, realizowana jest poprzez falowniki (5) połączone siecią profibus ze sterownikiem PLC - programowalnym sterownikiem logicznym (6). Wchodzący i wychodzący z PLC, portem szeregowym RS-232 sygnał, po przejściu przez konwerter trafia do/z platformy sterującej (7) przez szeregową magistralę komunikacyjną CAN. Ostatecznie sygnały przesyłane są pomiędzy platformą sterującą a interfejsem operatora (8). Umożliwia to sterowanie elektrozaworami odpowiedzialnymi za ciśnienia na kołach pasowych, sprzęgłami przekładni planetarnej, sprzęgłem blokującym przekładni hydrokinetycznej i odczyt potrzebnych do tego sterowania danych z czujników ciśnienia i prędkości obrotowych kół pasowych. Wprowadzanie i odczyt wartości odbywa się w interfejsie operatora.



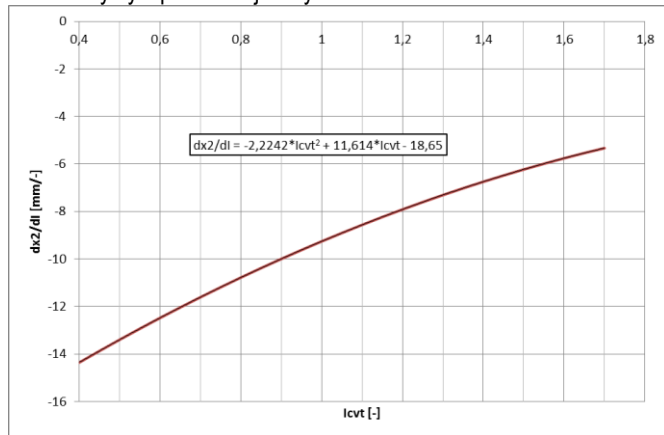
Rys. 6. Stanowisko badawcze bezstopniowej przekładni z prototypowym układem hydraulicznym

3. SPOSÓB WPROWADZANIA ZMIENNYCH NASTAW CZŁONU PROPORCJONALNEGO REGULATORA PRZEŁOŻENIA

Charakterystyka sterowanego obiektu przedstawiona została na rysunku 2 w postaci $x_2=f(l)$. Wielomian ją opisujący ma postać:

$$x_2 = -0,7414 \cdot l^3 + 5,8075 \cdot l^2 - 18,65 \cdot l + 18,569 \quad (2)$$

Z wykresu widać, że stała zmiana przesunięcia tłoka x_2 powoduje różne zmiany przełożenia w zależności od aktualnego przełożenia. Cechę tę widać na rysunku 7 przedstawiającym pochodną charakterystyki pokazanej na rysunku 3.

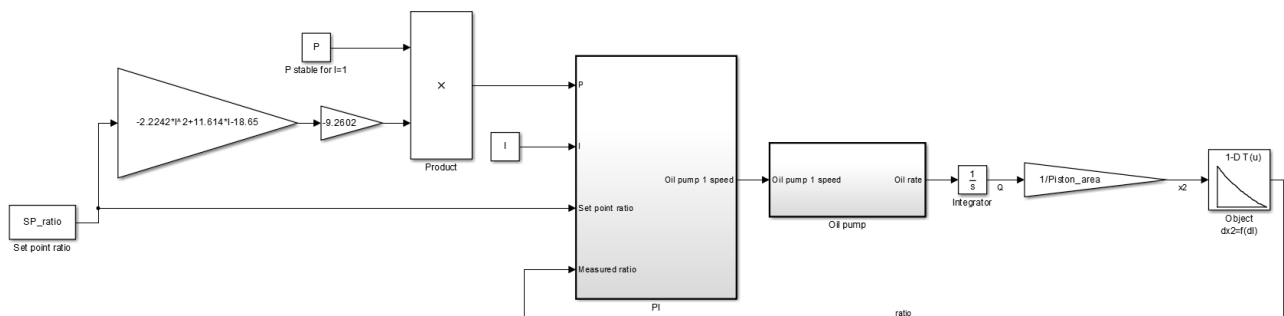


Rys. 7. Jednostkowa zmiana przełożenia przy jednostkowej zmianie położenia wyjściowego koła stożkowego

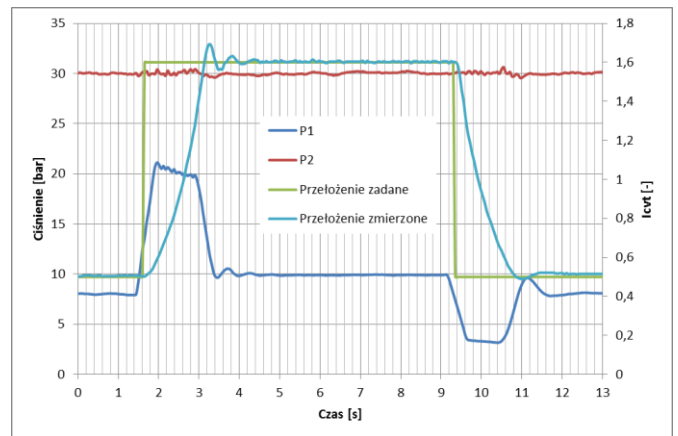
Otrzymane równanie krzywej posłużyło jako wielomian zmieniający nastawę K_p członu proporcjonalnego regulatora PID. Podczas projektowania algorytmu sterowania zdecydowano, że punktem wyjściowym będzie przełożenie równe 1 – dla tego przełożenia zmienny mnożnik K_p powinien być równy 1. Aby to uzyskać wielomian podzielono przez jego wartość dla argumentu równego 1. Dzięki temu mnożnik jest niemianowany. Schemat blokowy przedstawiający realizację algorytmu przedstawiono na rysunku 8.

4. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 9 pokazano wykres przedstawiający przebieg zmiany przełożenia przy skokowej zmianie wartości zadanej – zarówno przełożenie niskie jak i wysokie nie są wartościami skrajnymi. Dzięki temu uniknięto dojścia koła stożkowego do mechanicznego ogranicznika ruchu.

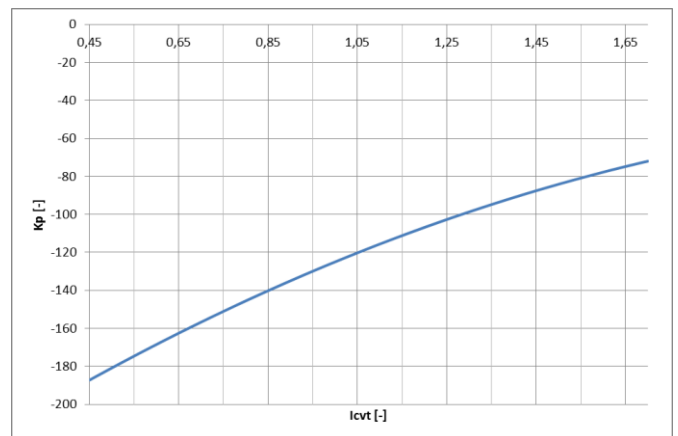


Rys. 8. Schemat blokowy przedstawiający realizację algorytmu oraz działania na obiekt



Rys. 9. Wypadek przejścia układu regulacji przełożenia z niskiego przełożenia do wysokiego przełożenia przy zastosowaniu zmiennego współczynnika K_p

Wykres przedstawiający wpływ zmiany wartości przełożenia zadanego na nastawę członu proporcjonalnego regulatora przełożenia zamieszczono na rysunku 10.



Rys. 10. Zmiana wartości nastawy członu proporcjonalnego regulatora przełożenia w funkcji zmiany przełożenia zadanego

PODSUMOWANIE

Badania dotyczyły prototypowego układu sterowania niemniej jednak nieliniowość obiektu jakim jest bezstopniowa przekładnia nie zależy od systemu jego sterowania. Przyjęta koncepcja uzależnienia nastaw członu proporcjonalnego od zadanej wartości przełożenia doprowadziła do pozytywnych wyników - podobnego zachowania dynamicznego systemu (regulatora oraz obiektu) w całym zakresie przełożeń. Wszystkie cytowane tu badania wykonywane były przez wprowadzenie nieliniowości na wzmocnienie proporcjonalne

regulatora PI przy czym zmienna niezależna (wejście na wielomian) była wartość zadana przełożenia. W dalszym etapie należy sprawdzić wpływ oddziaływania wielomianu na cały regulator oraz zachowanie regulatora w przypadku uzależnienia wielomianu od przełożenia zmierzonego.

BIBLIOGRAFIA

1. BOSCH, *Elektroniczne sterowanie skrzynką biegów EGS*, WKiŁ, Warszawa 2005.
2. BOSCH, *Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne*, WKiŁ, Warszawa 2010.
3. Radzyński B., Pawełski Z. *Wpływ parametrów zakłócających na pracę skrzyni biegów wyposażonej w przekładnię CVT*, „Problemy rozwoju maszyn roboczych” 2015.

PODZIĘKOWANIA

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

Introduction of a non-linear controller to improve dynamic properties of the prototype control system of continuously variable transmission

The subject of the study was a continuously variable belt transmission with a prototype control system which will be used in a hybrid passenger car. The research was designed to create an algorithm that makes settings of the ratio regulator settings dependent on the operating point because of non-linear nature of the control object. The results of the study showed that the transient functions of the whole range of work were similar.

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