

Janusz Bidziński*

WPLYW WŁASNOŚCI PRZEKŁADNI PRZELĄCZANEJ POD OBCIĄŻENIEM NA PRZEBIEG AUTOMATYCZNEJ ZMIANY BIEGÓW W CIĄGNIKU ROLNICZYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zmiany biegów w ciągniku rolniczym realizowanej automatycznie za pomocą przekładni przełączanej pod obciążeniem. Określono warunki dla rozpoczęcia zmiany przełożenia w układzie napędowym, parametry opisujące własności przekładni oraz wskaźniki oceny przebiegu zmiany biegu. Przedstawiono wpływ własności przekładni na procesy przejściowe podczas automatycznej zmiany przełożenia i na wartości wskaźników oceny tej zmiany.

Słowa kluczowe: ciągnik rolniczy, układ napędowy, automatyzacja zmiany przełożenia, przekładnia przełączana po obciążeniem.

WSTĘP

Układy napędowe współczesnych ciągników rolniczych – zwłaszcza o dużej mocy silnika – są wyposażane w przekładnie przełączane pod obciążeniem, umożliwiające zmianę przełożenia bez przerwy w przekazywaniu napędu. Zazwyczaj jest to przekładnia stopniowa, o niewielkiej rozpiętości przełożenia między sąsiednimi biegami. Zmiana przełożenia jest realizowana za pomocą ciernych podzespołów sprzęgających – właściwych dla biegów, pomiędzy którymi następuje przełączenie. Jednoczesna praca rozłączanych i włączanych elementów ciernych zapewnia ciągłą transmisję momentu podczas zmiany przełożenia. Zapobiega to zatrzymywaniu się ciągnika w trakcie zmiany biegu przy dużych oporach ruchu, towarzyszących ciężkim pracom agrotechnicznym.

Przekładnie przełączane pod obciążeniem stwarzają dogodne warunki do automatyzacji procesu zmiany przełożenia. Jest ona pożądana nie tylko ze względu na zwolnienie kierowcy z konieczności podejmowania decyzji o wyborze biegu odpowiedniego do chwilowego obciążenia ciągnika. Podczas ciężkich prac agrotechnicznych zwiększa również ich efektywność, ponieważ zmiany przełożenia mogą być dokonywane w chwili najbardziej korzystnej ze względu na wydajność pracy.

Przebieg zmiany biegów pod obciążeniem zależy od warunków początkowych – obciążenia i prędkości jazdy ciągnika oraz punktu pracy silnika napędowego – i od własności przekładni. Powinien on charakteryzować się możliwie małym spadkiem prędko-

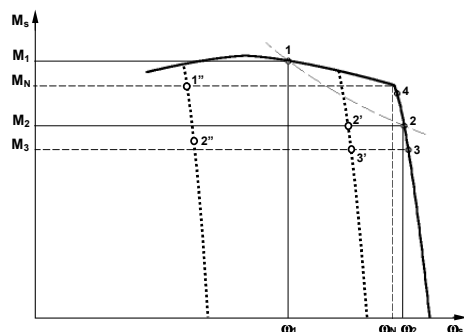
* Dr inż. Janusz Bidziński, Instytut Pojazdów Politechniki Warszawskiej

ści jazdy podczas zmiany przełożenia, niewielkimi wartościami bezwzględnymi przyspieszenia i jak najwolniejszymi jego zmianami – zwanymi szarpnięciami – szczególnie dotkliwie odczuwanymi przez kierowcę. Nie powinien przy tym powodować nadmiernych obciążeń mechanicznych i cieplnych elementów układu napędowego.

WARUNKI POCZĄTKOWE AUTOMATYCZNEJ ZMIANY PRZEŁOŻENIA

Wzrost oporów ruchu i związany z nim spadek prędkości jazdy ciągnika wymaga zwiększenia przełożenia w układzie napędowym dopiero wtedy, kiedy ta zmiana nie powoduje zmniejszenia prędkości jazdy – pod warunkiem, że wcześniej nie nastąpił spadek prędkości kątowej silnika do wartości odpowiadającej momentowi maksymalnemu. Nawet w przypadku wyposażenia ciągnika w przekładnię przełączaną pod obciążeniem jego kierowca – obawiając się zatrzymania silnika – zazwyczaj zbyt wcześnie podejmuje decyzję o zwiększeniu przełożenia (redukcji), a zbyt późno o jego zmniejszeniu (multiplikacji). Wydłuża to czas pracy na biegu zredukowanym z obniżoną prędkością jazdy. Poprawę efektywności pracy można uzyskać automatyzując proces zmiany przełożenia. Warunki odpowiednie dla rozpoczęcia automatycznej zmiany biegów zostały określone na podstawie analizy współpracy silnika z zapłonem samoczynnym i regulatorem wielozakresowym z przekładnią stopniową.

Przebieg momentu silnika M_s w funkcji prędkości kątowej ω_s w stanie ustalonym, przy nastawie regulatora właściwej dla mocy nominalnej N_N , zawiera charakterystyczne punkty (1) i (2) określające współpracę z przekładnią stopniową – rys. 1.:



Rys. 1. Charakterystyka $M_s(\omega_s)$ silnika ZS

Fig. 1. The characteristics of $M_s(\omega_s)$ of a ZS engine

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{i_n}{i_{n+1}}, \quad \text{przy czym: } i_n > i_{n+1}, \quad (1)$$

gdzie: i_{n+1} ; i_n – przełożenia przekładni na biegu wyższym ($n+1$) i niższym (n).

Moment obrotowy M_p na wale wyjściowym przekładni (przy pominięciu strat mocy) i prędkość kątowa ω_p tego wału są w ustalonych warunkach ruchu takie same, jeżeli w przekładni jest włączony bieg wyższy ($n+1$) i silnik pracuje w punkcie (1) charakterystyki oraz kiedy jest włączony bieg niższy (n) i silnik pracuje w punkcie (2):

$$M_p = M_1 \cdot i_{n+1} = M_2 \cdot i_n; \quad (2)$$

$$\omega_p = \frac{\omega_1}{i_{n+1}} = \frac{\omega_2}{i_n}. \quad (3)$$

Przyjęto następujące zasady automatycznego sterowania przełączaniem biegów:

- zmiana biegu z wyższego (n+1) na niższy (n) – tzw. redukcja – rozpoczyna się, gdy:

$$M_s > M_N \quad \wedge \quad \omega_s \leq k_r \cdot \omega_1 \Rightarrow i_{n+1} \rightarrow i_n; \quad (4)$$

gdzie: $k_r \geq 1$ – współczynnik korekcyjny dla redukcji,

- zmiana biegu z niższego (n) na wyższy (n+1) – tzw. multiplikacja – rozpoczyna się, gdy:

$$M_s \leq k_m \cdot M_3 \Rightarrow i_n \rightarrow i_{n+1}, \quad (5)$$

$$\text{gdzie: } M_3 = \frac{M_1 + M_2}{2} \cdot \frac{i_{n+1}}{i_n}; \quad (6)$$

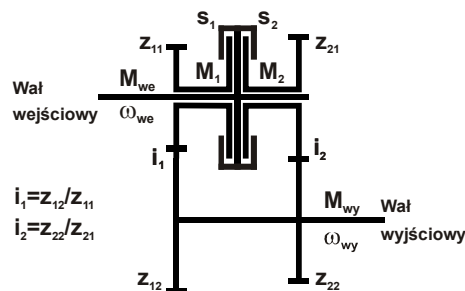
k_m – współczynnik korekcyjny dla multiplikacji.

W przypadku redukcji, jeżeli współczynnik $k_r = 1$, to dla nastaw regulatora odpowiadających prędkości kątowej z przedziału (ω_1 ω_n) sygnałem do zmiany biegu na niższy (o większym przełożeniu) jest osiągnięcie przez silnik napędowy stanu określonego na charakterystyce szybkościowej punktem 1. Jeżeli nastawa regulatora odpowiada nastawie mocy znamionowej, to po zakończeniu procesów przejściowych towarzyszących zmianie biegu silnik napędowy osiągnie stan określony punktem 2, natomiast prędkość jazdy ciągnika nie ulegnie zmianie. Przy innych nastawach regulatora z przedziału (ω_1 ω_n) moment napędowy silnika również zmniejszy się do wartości M_2 , natomiast prędkość jazdy obniży się stosownie do prędkości kątowej silnika wynikającej z nastawy regulatora (np. w punkcie 2' na rys. 5). Jeżeli nastawa regulatora odpowiada prędkości kątowej mniejszej od ω_1 , to sygnałem do zmiany biegu na niższy jest wzrost obciążenia silnika napędowego do wartości równej momentowi mocy znamionowej (np. punkt 1'' w obszarze obciążeń częściowych silnika). Po zmianie biegu i zakończeniu procesów przejściowych silnik osiągnie punkt pracy wynikający z nastawy regulatora (np. punkt 2'').

Jeżeli współczynnik korekcyjny dla multiplikacji $k_m = 1$, to dla wszystkich nastaw regulatora sygnałem do zmiany biegu na wyższy (o mniejszym przełożeniu) jest spadek momentu efektywnego silnika do wartości M_3 . W przypadku nastawy regulatora odpowiadającej ω_n jest to punkt 3 na odcinku regulatorowym charakterystyki. Po zakończeniu procesów przejściowych moment napędowy silnika osiągnie wartość M_4 równą średniej arytmetycznej z momentów M_1 i M_2 . Stan silnika będzie określony punktem 4. Prędkość jazdy ciągnika wzrośnie odpowiednio do stosunku przełożeń biegów, pomiędzy którymi następuje przełączenie i spadku prędkości silnika spowodowanego zwiększeniem obciążenia.

WŁASNOŚCI PRZEKŁADNI PRZEŁĄCZANEJ POD OBCIĄŻENIEM

Zasadę pracy przekładni przełączanej pod obciążeniem można przedstawić za pomocą schematu dwubiegowej przekładni zębatej o osiach stałych, realizującej przełożenie i_1 lub i_2 w wyniku włączenia jednego z dwóch sprzęgieł ciernych S_1 lub S_2 (rys 2).



Rys. 2. Schemat przekładni przełączanej pod obciążeniem

Fig. 2. A draft of a gearbox switched under load

Do takiego zastępczego schematu można również sprowadzić przekładnię zbudowaną z zębatego szeregu planetarnego. Jeżeli podczas zmiany przełożenia oba sprzęgła jednocześnie przenoszą moment obrotowy – odpowiednio M_1 i M_2 , to w przekładni są realizowane dwa toru przepływu mocy i nie ma przerwy w przekazywaniu napędu. Taki stan pracy jest nazywany „przekryciem”.

Wartość bezwzględna momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło S_n nie może być większa od wartości M_{n0} wynikającej z chwilowej wartości siły zaciskającej tarcze i współczynnika tarcia właściwego dla materiałów, z których tarcze są wykonane. Największą wartość bezwzględną momentu M_{n0max} , jaki może przenieść sprzęgło całkowicie włączone, opisuje współczynnik nadmiaru momentu [Bidziński 1998]:

$$\beta_n = \frac{M_{n0max}}{M_N} ; \quad n = 1, 2, \quad (7)$$

Stan rozłączania lub włączania sprzęgła charakteryzuje prędkość zmiany wartości M_{n0} momentu możliwego do przeniesienia przez sprzęgło. Prędkość ta, przy odniesieniu momentu M_{n0} do momentu nominalnego silnika M_N , jest nazywana w dalszej części pracy prędkością rozłączania $\bar{v}_{Mnr}$ bądź włączania $\bar{v}_{Mnw}$ sprzęgła S_n :

$$\bar{v}_{Mnr(w)} = \frac{d\bar{M}_{n0}}{dt}, \quad \text{gdzie: } \bar{M}_{n0} = \frac{M_{n0}}{M_N}; \quad n = 1, 2. \quad (8)$$

Proces zmiany przełożenia zależy od przebiegu momentu możliwego do przeniesienia przez przekładnię podczas tej zmiany. Poza stanem przekrycia moment ten wynika z wartości momentu możliwego do przeniesienia przez sprzęgło rozłączane bądź włączane. W stanie przekrycia zależy od sumy wartości bezwzględnych momentów możliwych do przeniesienia przez oba sprzęgła, od prędkości rozłączania i włączania sprzęgieł oraz od czasu zwłoki Δt_z , jaki upłynął pomiędzy chwilami początku rozłączania jednego

sprzęgła i początku włączania drugiego. Stosunek sumy wartości bezwzględnych możliwych do przeniesienia przez sprzęgła w stanie przekrycia do momentu nominalnego silnika jest dalej nazywany współczynnikiem przekrycia p_M :

$$p_M = \frac{M_{10} + M_{20}}{M_N} = \overline{M}_{10} + \overline{M}_{20} . \quad (9)$$

Jego wartość początkowa p_{Mp} jest równa wartości bezwzględnej momentu M_{n0} sprzęgła rozłączanego. Wynika ona z wartości współczynnika nadmiaru β_n sprzęgła rozłączanego, prędkości jego rozłączania $\overline{v}_{Mnr}$ i czasu zwłoki Δt_z . Wartość końcowa p_{Mk} wynika z wartości początkowej p_{Mp} i prędkości rozłączania i włączania sprzęgieł. Szczególny przypadek ma miejsce, kiedy prędkości rozłączania i włączania są stałe. Wówczas:

$$p_{Mp} = \beta_n - \overline{v}_{Mnr} \cdot \Delta t_z ; \quad (10);$$

$$p_{Mk} = p_{Mp} \cdot \frac{\overline{v}_{M1(2)w}}{|\overline{v}_{M2(1)r}|} ; \quad (11);$$

$$\overline{v}_{Mnr(w)} = \frac{\beta_n}{\Delta t_{nr(w)}} , \quad (12)$$

gdzie: Δt_z – czas zwłoki,

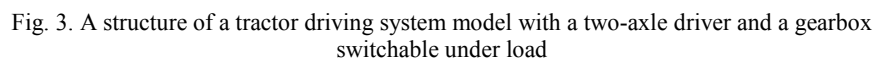
$\Delta t_{nr(w)}$ – czas rozłączania lub włączania sprzęgła S_n .

Własności przekładni opisuje w tym przypadku osiem wielkości: współczynniki nadmiaru momentu β_n oraz prędkości rozłączania $\overline{v}_{Mnr}$ i włączania $\overline{v}_{Mnw}$ obu sprzęgieł oraz czasy zwłoki $\Delta t_{zr(m)}$ dla redukcji i multiplikacji.

Badanie wpływu wartości parametrów określających własności przekładni na przebieg zmiany przełożenia w różnych warunkach ruchu ciągnika oraz analizę i interpretację wyników wygodniej jest prowadzić zastępując czasy zwłoki wartościami początkowymi współczynników przekrycia dla redukcji i multiplikacji p_{Mpr} , p_{Mpm} zgodnie z zależnością (10).

WPLYW WLASNOŚCI PRZEKŁADNI NA PRZEBIEG ZMIANY BIEGÓW

Wpływ parametrów określających własności przekładni przełączanej pod obciążeniem na przebieg automatycznej zmiany biegów był badany metodą symulacji komputerowej. Wykorzystano modele ciągnika, współpracy koła z podłożem oraz układu napędowego ciągnika z napędem na obie osie przedstawione w pracach Bidzińskiego [1998, 1999a i b]. Struktura modelu układu napędowego jest pokazana na rys 3.



- względny spadek prędkości jazdy ciągnika podczas zmiany biegu:

gdzie: v_{pz} – prędkość jazdy w chwili rozpoczęcia zmiany przełożenia;
 v_{min} – najmniejsza prędkość jazdy podczas zmiany przełożenia,

- ekstremalne wartości przyspieszenia odniesione do przyspieszenia ziemskiego:

- ekstremalne wartości „szarpnięć”, jako zmian przyspieszenia odniesionego do przyspieszenia ziemskiego:

gdzie: v – prędkość jazdy ciągnika;

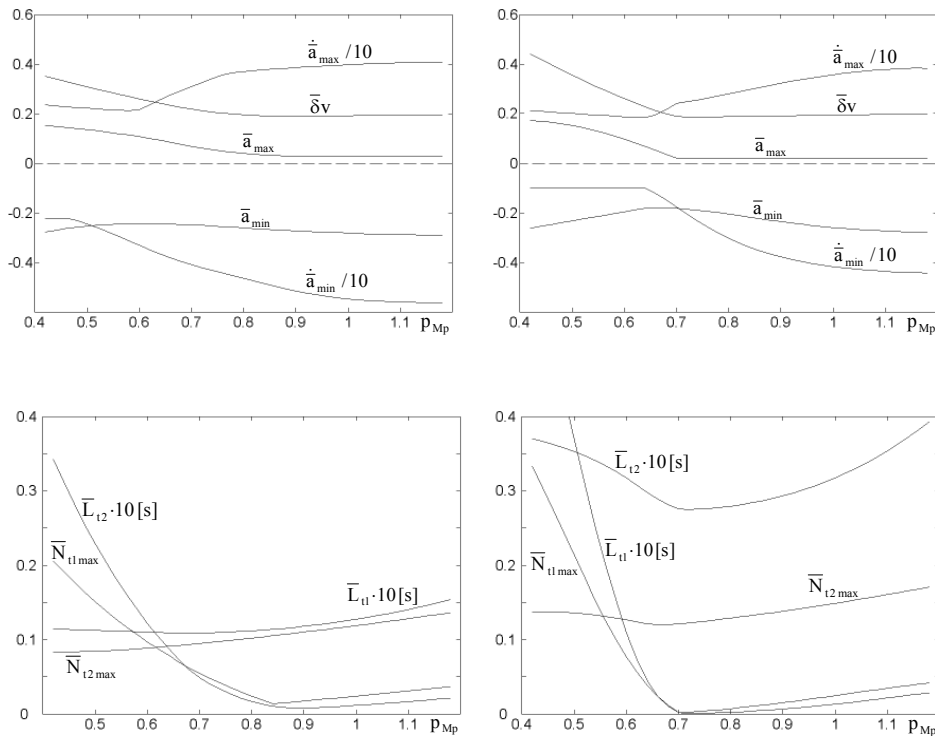
- szczytowe wartości mocy tarcia sprzęgieł odniesione do mocy nominalnej silnika:

- praca tarcia sprzęgieł przekładni w postaci ich stosunku do mocy nominalnej silnika:

$$\bar{L}_{tn} = \frac{L_{tn}}{N_N} = \sum_{j_n=1}^{k_n} \int_{t_{in-1}}^{t_{jn2}} \bar{N}_{tn} \cdot dt [s]; \quad n = 1, 2, \quad (17)$$

gdzie: $\bar{N}_{tn} = \frac{N_{tn}}{N_N}$;

k_n – liczba przedziałów czasu, w których sprzęgło S_n pracuje z poślizgiem,
 t_{jn1} ; t_{jn2} – chwila rozpoczęcia i zakończenia poślizgu sprzęgła S_n w przedziale
 czasu j_n .



a) $\bar{v}_{M2r} = \bar{v}_{M1w} = 5 [1/s]$.

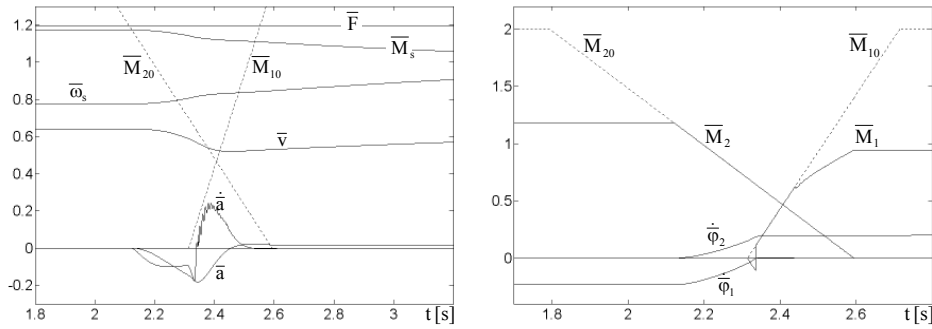
b) $\bar{v}_{M2r} = 2,5 [1/s]$; $\bar{v}_{M1w} = 5 [1/s]$.

Rys. 4. Przebiegi wartości wskaźników oceny przy redukcji biegu w zależności od wartości początkowej współczynnika przekrycia p_{Mpr} . Przełożenia przekładni: $i_1 = 1,3$; $i_2 = 1$

Fig. 4. Courses of evaluation coefficients values at gear reduction depending on the starting value of the cover coefficient p_{Mpr} . Gearbox switches: $i_1 = 1,3$; $i_2 = 1$

Na rys. 4 do 7 przedstawiono wybrane wyniki symulacji. Współczynniki korekcyjne k_r i k_m dla inicjacji automatycznej zmiany przełożenia przyjęto równe jedności. Założono, że prędkości rozłączania i włączania sprzęgieł przekładni przełączanej pod obciążeniem są stałe.

Wszystkie wielkości opisujące stan ciągnika i jego układu napędowego zostały przedstawione w sposób bezwymiarowy w postaci ich stosunków do wielkości odniesienia. Te ostatnie przyjęto jako odpowiadające pracy ciągnika z nominalną mocą silnika $N_N = 60$ kW, prędkością jazdy 1,94 m/s, poślizgiem względnym kół napędzanych $s = 0,11$, współczynnikiem przyczepności $\mu = 0,53$ i współczynnikiem oporów toczenia $f = 0,1$.

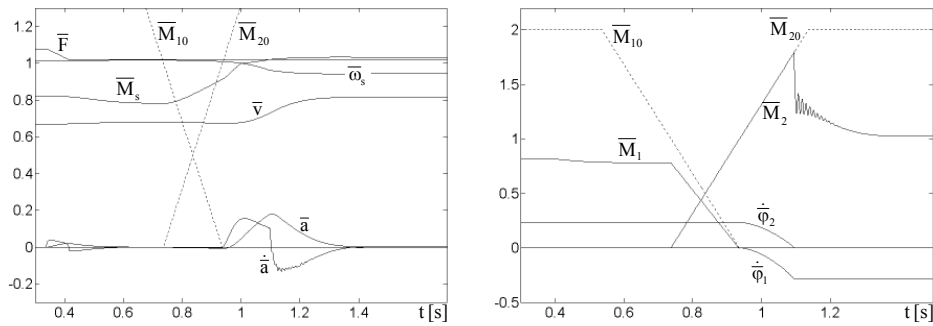


Rys. 5. Przebieg redukcji dla wybranych wartości parametrów sterowania sprzęgłami przekładni:

$$\bar{v}_{M2r} = 2,5 \text{ 1/s} \quad \bar{v}_{M1w} = 5 \text{ 1/s}, \quad p_{Mpr} = 0,7. \quad \text{Przełożenia przekładni: } i_1 = 1,3; \quad i_2 = 1$$

Fig. 5. A course of reduction for the selected gearbox clutches steering parameters values:

$$\bar{v}_{M2r} = 2,5 \text{ 1/s} \quad \bar{v}_{M1w} = 5 \text{ 1/s}; \quad p_{Mpr} = 0,7. \quad \text{Gearbox switches: } i_1 = 1,3; \quad i_2 = 1$$

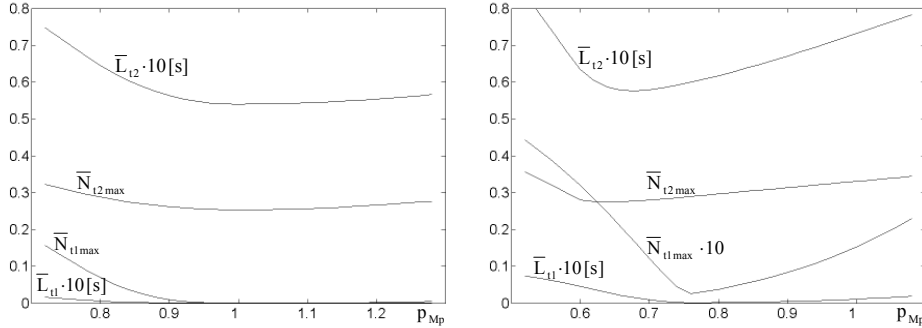


$$\bar{v}_{M1r} = \bar{v}_{M2w} = 5 \text{ [1/s]}.$$

$$b) \bar{v}_{M1r} = 2,5 \text{ [1/s]}; \quad \bar{v}_{M2w} = 5 \text{ [1/s]}.$$

Rys. 6. Przebiegi wartości wskaźników oceny dla multiplikacji biegu w zależności od wartości początkowej współczynnika przekrycia p_{Mpm} . Przełożenia przekładni: $i_1 = 1,3$; $i_2 = 1$.

Fig. 6. Courses of evaluation indicators values for a gear multiplication depending on the starting value of the cover coefficient p_{Mpm} . Gearbox switches: $i_1 = 1,3$; $i_2 = 1$.



Rys. 7. Przebieg multiplikacji dla wybranych wartości parametrów sterowania sprzęgłami przekładni: $\bar{v}_{M1r} = \bar{v}_{M2w} = 5$ 1/s; $p_{Mpm} = 1,0$. Przełożenia przekładni: $i_1 = 1,3$; $i_2 = 1$

Fig. 7. The multiplication course for the selected values of the gearbox clutches steering parameters values ... $\bar{v}_{M1r} = \bar{v}_{M2w} = 5$ 1/s; $p_{Mpm} = 1,0$. Gearbox switches: $i_1 = 1,3$; $i_2 = 1$

PODSUMOWANIE

Przebieg redukcji jest bardziej korzystny, kiedy prędkość rozłączania sprzęgła S_2 jest mniejsza od prędkości włączania sprzęgła S_1 . Występują wtedy mniejsze szarpnięcia w porównaniu z przypadkiem, kiedy prędkości rozłączania i włączania sprzęgieł są takie same. Wzrasta co prawda obciążenie cieplne rozłączanego sprzęgła S_2 wynikające z pracy i szczytowej wartości mocy tarcia, jednakże jest ono znacznie mniejsze od obciążenia tego sprzęgła podczas multiplikacji (wówczas włączanym). Obciążenie cieplne sprzęgła włączanego S_1 przy początkowej wartości współczynnika przekrycia $p_{Mpr} > 0,6$ jest znikome.

Podczas multiplikacji jest wskazane, aby prędkości rozłączania i włączania sprzęgieł przekładni były zbliżone. Szarpnięcia dodatnie są wtedy mniejsze w porównaniu z przypadkiem, kiedy prędkość rozłączania jest mniejsza od prędkości włączania, mimo że maksymalna wartość przyspieszenia nieco wzrasta. Obciążenie cieplne włączanego sprzęgła S_2 w obu przypadkach jest duże. Można je zmniejszyć zwiększając prędkość włączania. Wzrastają jednak wtedy szarpnięcia towarzyszące zmianie przełożenia.

Optymalne własności przekładni przełączanej pod obciążeniem dla warunków ruchu odpowiadających różnym pracom ciągnika może być poszukiwane na drodze wyznaczania minimum funkcji celu $F_{r(m)}$ utworzonych dla redukcji i multiplikacji ze wskaźników przyjętych do oceny procesu zmiany przełożenia. W przypadku stałych wartości prędkości rozłączania i włączania sprzęgieł wskaźniki te są funkcjami trzech parametrów: $\bar{v}_{M2(1)r}$, $\bar{v}_{M1(2)w}$, $p_{Mpr(m)}$:

$$\min_x F_{r(m)}(\mathbf{x}), \quad (18)$$

$$\text{gdzie: } \mathbf{x}(p_{r(m)}) = [\bar{\delta}v, \bar{a}_p, \bar{a}_o, \dot{a}_{\max}, \dot{a}_{\min}, \bar{N}_{t1\max}, \bar{N}_{t2\max}, \bar{L}_{t1}, \bar{L}_{t2}],$$

$$p_{r(m)} = [\bar{v}_{M2(1)r}, \bar{v}_{M1(2)w}, p_{Mpr(m)}].$$

PIŚMIENNICTWO

1. **Bidziński J., 1998:** Modelowanie i symulacja procesów przejściowych w układzie napędowym ciągnika rolniczego. Prace X Sympozjum SPD – 10. Symulacja procesów dynamicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s. 31–38.
2. **Bidziński J., 1999a:** Modelowanie i symulacja komputerowa zmian przełożenia pod obciążeniem w układzie napędowym ciągnika rolniczego. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa – cz. I. Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie, s. 61–68.
3. **Bidziński J., 1999b:** Model współdziałania koła z gruntem dla komputerowych badań symulacyjnych procesów przejściowych w układzie napędowym ciągnika rolniczego. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa – cz. I. Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie, s. 69–78.
4. **Dajniak H., 1985:** Ciągniki. Teoria ruchu i konstruowanie. WKŁ, Warszawa.

AN EFFECT OF THE GEARBOX SWITCHABLE UNDER LOAD PROPERTIES
ON AN AUTOMATIC CHANGE OF THE TRANSMISSION RATIO PROCESS
IN AN AGRICULTURAL TRACTOR

Summary. Results of a computer simulation of an automatic change of the transmission ratio by a gearbox switchable under load in an agricultural tractor are presented in the paper. Conditions to start a change of the transmission ratio, parameters describing gearbox properties and quality coefficients of the gear shifting process are stated. An effect of the gearbox properties on the transition processes taking places during an automatic gear shifting and the values of the quality coefficients are presented.

Key words: agricultural tractor, driving system, transmission, automatic gear change, gearbox switchable under load.

Recenzent: prof. dr hab. Kazimierz Lejda