

OKREŚLENIE ZAPOTRZEBOWANIA NA MOC EFEKTYWNA TOPOROWEGO ZESPOŁU ROZDRABNIAJĄCEGO WYPOSAŻONEGO W DODATKOWE ELEMENTY ROBOCZE

Aleksander Lisowski

Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Opracowano model teoretyczny do określenia zapotrzebowania mocy efektywnej zespołu tnącego z dodatkowymi elementami roboczymi. Struktura modelu odzwierciedla zidentyfikowane zjawiska, związane z cięciem roślin, odrzuceniem odciętych roślin na powierzchnię obudowy zespołu, które było wspomagane przez listwy promieniowe, tarciami na tej powierzchni obudowy oraz na powierzchni karbowanych płytek dennych, ściskaniem cząstek roślin w szczelinie roboczej między płytką denną a łopatkami rzutnika oraz wyrzutem siewki do kanału wyrzutowego siewkarni polowej.

Słowa kluczowe: moc efektywna, zespół toporowy, elementy robocze

Wykaz oznaczeń

- a, m – pozioma, pionowa odległość początku gardzieli od osi obrotu tarczy tnącej [m],
- b, h – szerokość, wysokość gardzieli [m],
- b_k, l_d – szerokość karbu, długość części karbowanej płytki dennej [m],
- E_{rk} – energia kinetyczna odrzucenia cząstek przez noże i listwy promieniowe [J],
- f, k – współczynnik zmiany składowej stycznej i normalnej prędkości odrzutu cząstek,
- f_p, k_r – współczynnik zależny od rodzaju listwy promieniowej, łopatek rzutnika,
- F_f, F_{fd} – siła tarcia: na powierzchni gładkiej dna, na powierzchniach karbowanych [N],
- F_s – siła potrzebna do przesunięcia ściskanego materiału roślinnego [N],
- g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],
- h_m – wysokość wyrzutu siewki [m],
- i_k – liczba karbów na płytce dennej,
- L_c, L_s – praca przecinania warstwy materiału, ściskania w szczelinie roboczej [J],
- L_j – jednostkowa praca cięcia [$J \cdot m^{-2}$],
- l_r – rzeczywista długość siewki [m],
- m_c, m_p – masa materiału roślinnego: transportowanego, odcięta jednym nożem [kg],
- p – wielkość mimośrodowego ustawienia noża [m],
- $P_c, P_f, P_{fd}, P_p, P_r, P_s$ – zapotrzebowanie mocy na cięcie, do pokonania oporów tarcia podczas transportu cząstek po obudowie, do przecierania cząstek po płytce dennej, do wyrzucenia siewki do kanału wyrzutowego, do odrzucenia odciętych cząstek, do ściskania cząstek w szczelinie roboczej [W],
- q_m – strumień masy wilgotnego materiału roślinnego [$kg \cdot s^{-1}$],

- r, r_t – promień: wodzący noża, tarczy nożowej [m],
 s, s_m – szczelina robocza na wyjściu, wejściu (maksymalna) [m],
 S_g – powierzchnia przekroju poprzecznego warstwy materiału roślinnego w gardzieli [m²],
 t_f – czas ruchu materiału roślinnego po powierzchni obudowy zespołu rozdrabniającego [s],
 v_n, v_t – składowa normalna i styczna prędkości masy [m·s⁻¹],
 v_w – średnia prędkość obwodowa walców wciągająco-zgniatających [m·s⁻¹],
 z – liczba noży zainstalowanych na tarczy,
 α_k, τ – kąt pochylenia karbów na płycie dennej, cięcia ślizgowego [rad],
 $\beta_d, \beta_t, \beta_{td}$ – droga kąтова: czynnej powierzchni karbów, ruchu materiału roślinnego po dnie obudowy zespołu rozdrabniającego, występowania karbów [rad],
 δ_w – poślizg materiału między walcami,
 λ, λ_h, μ – współczynnik empiryczny charakteryzujący niejednorodność cząstek materiału roślinnego, korekcyjny prędkości wyrzutu sieczki, tarcia materiału roślinnego o stal,
 μ_d – różnica współczynników tarcia materiału roślinnego o łopatkę rzutnika i płytkę denną,
 μ_s – współczynnik ściskania materiału w obszarze szczeliny roboczej,
 ρ_m – gęstość materiału roślinnego znajdującego się w gardzieli [kg·m⁻³],
 ω – prędkość kąтова tarczy nożowej [rad·s⁻¹].

Wstęp

Dotychczas przy określaniu zapotrzebowania na moc efektywną toporowego zespołu rozdrabniającego wyróżniano jej trzy składniki: na cięcie, do odrzucenia cząstek i na przemieszczanie cząstek roślin po obudowie [Dmitrewski 1978; Gach i in. 1991], bez uwzględnienia dodatkowych elementów roboczych wspomagających pracę tego zespołu: płytek dennych i łopatek rzutnika, a także z pominięciem kształtu szczeliny, jaka tworzy się między nimi.

Szeroki przegląd prac badawczych dotyczących rozdrabniania, przeprowadzony przez O'Dogherty'ego [1982], zawiera również podobne informacje o strukturze modelu energetycznego pracy zespołu rozdrabniającego.

Wszystkie te prace wyróżniają również składniki mocy biegu jałowego, które odnoszą się do oporów tarcia w węzłach kinematycznych elementów roboczych i oporów ruchu mechanizmów napędowych oraz opory powietrza na biegu jałowym sieczkarni.

Jeden z najnowszych modeli matematyczny, rozwinięty przez Čepuranoja i Belova [2004] zawiera cztery składniki mocy: na cięcie, do odrzucenia cząstek, na przemieszczanie cząstek po obudowie i na pokonanie oporów powietrza. Ten ostatni składnik mocy odnosi się jednak do oporów biegu jałowego.

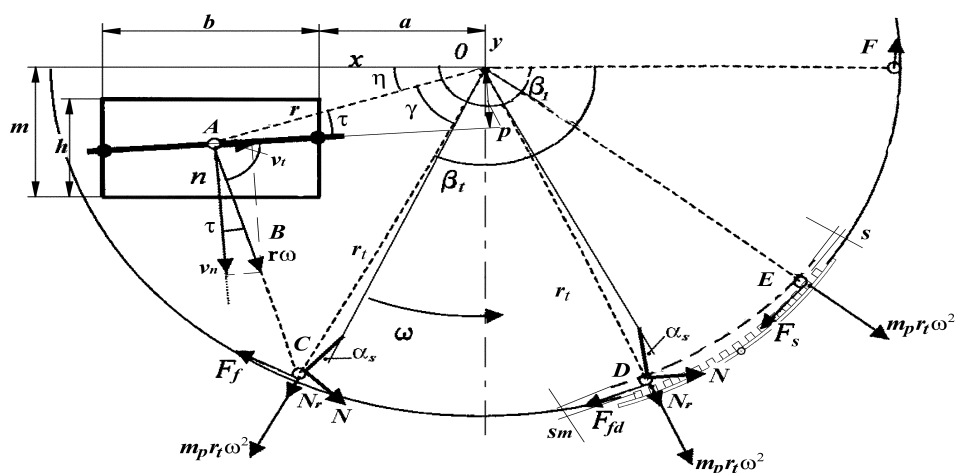
Dodatkowe elementy robocze działając na cząstki roślin kukurydzy przyczyniają się do rozcierania ich ziaren i rozrywania źdźbeł łodyg. Te dodatkowe wymuszenia zwiększają opory ruchu, których pokonanie wymaga poniesienia nakładów energetycznych, a których w dotychczasowych rozważaniach teoretycznych nie uwzględniono.

Cel pracy

Celem opracowania jest przedstawienie modelu matematycznego zapotrzebowania mocy na moc efektywną toporowego zespołu rozdrabniającego stosowanego w siewkarniach polowych, w którym uwzględniono zjawiska fizyczne, będące efektem działania tego zespoły wyposażonego w elementy wspomagające rozcieranie ziaren i rozrywanie łodyg roślin.

Określenie zapotrzebowania na moc efektywną

Przyjęto, że głównymi składnikami mocy efektywnej są: moc związana z cięciem warstwy materiału roślinnego, odrzuceniem pociętych cząstek, przemieszczaniem cząstek po dnie obudowy zespołu rozdrabniającego, przecieraniem cząstek po płytce dennej, ściskaniem cząstek w szczelinie roboczej oraz z wyrzuceniem ich poza zespół rozdrabniający do kanału wyrzutowego siewkarni (rys. 1).



Źródło: opracowanie własne

Rys. 1. Przebieg procesu rozdrabniania według etapów: A – cięcie, B – odrzucenie cząstek, C – tarcie po obudowie, D – przecieranie na płytce dennej, E – ściskanie w obszarze szczeliny roboczej, F – wyrzucanie poza zespół rozdrabniający (pozostałe objaśnienia w tekście)

Fig. 1. The shredding process in stages: A – cutting, B – throwing away the parts, C – friction on the surface, D – friction on the bottom plate, E – squeezing in the working gap, F – ejecting outside the shredding unit

Pracę cięcia obliczono na podstawie jednostkowej pracy cięcia i powierzchni przekroju poprzecznego warstwy materiału roślinnego w gardzieli:

$$L_c = L_j S_g = L_j b h \quad (1)$$

Ponieważ w trakcie jednego obrotu wykonywane jest z cięcie, a czas jednego obrotu tarczy nożowej wynosi $2\pi/\omega$ to średnie zapotrzebowanie mocy na cięcie można obliczyć z zależności:

$$P_c = L_j \frac{bh\omega z}{2\pi} \quad (2)$$

Moc potrzebną na odrzucenie odciętej porcji materiału można przedstawić jako iloczyn średniej energii kinetycznej, którą uzyskuje ta porcja i liczby noży przez czas jednego obrotu:

$$P_r = \frac{E_{rk}z}{2\pi} = m_p \frac{v_n^2 + v_t^2}{2} \frac{\omega z}{\omega} \quad (3)$$

Ponieważ ruch cząstek następuje ze środka przekroju poprzecznego warstwy materiału w gardzieli, dlatego też obie składowe prędkości można wyznaczyć na podstawie wartości promienia wodzącego noża r , prędkości kątowej tarczy ω i kąta cięcia ślizgowego τ (B, rys. 1):

$$v_n = (1+k)\omega r \cos \tau, \quad v_t = f\omega r \sin \tau \quad (4)$$

W tych zależnościach uwzględniono częściowy wpływ tarcia cząstek po powierzchni listew promieniowych i bezwładność cząstek, wprowadzając współczynniki k i f .

Masę odciętej porcji materiału obliczono na podstawie jego gęstości, znajdującego się w gardzieli, powierzchni gardzieli oraz rzeczywistej długości sieczki: $m_p = \rho_m S_g l_r$.

Korzystając z prawa zachowania masy i przyjmując poślizg materiału między wałcami, zależny od nacisku sprężyn na wałce wciągająco-zgniatające, gęstość materiału znajdującego się w gardzieli można określić ze wzoru:

$$\rho_m = \frac{q_m}{v_w(1-\delta_w)S_g} \quad (5)$$

Rzeczywistą długość sieczki wyznaczono na podstawie zależności:

$$l_r = \frac{2\pi v_w(1-\delta_w)}{\omega z} \quad (6)$$

Uwzględniając powyższe zależności cząstkowe, zapotrzebowanie mocy do odrzucenia odciętego przez noże materiału i nadania cząstkom energii kinetycznej można określić ze wzoru:

$$P_r = \lambda \frac{(1+k)^2 \cos^2 \tau + f^2 \sin^2 \tau}{2} q_m \omega^2 r^2 \quad (7)$$

Niejednorodność materiału roślinnego wyrażono współczynnikiem empirycznym λ .

Opory tarcia, powstające w trakcie przemieszczania materiału po powierzchni gładkiej dna (odcinki CD i EF, rys. 1), zależą od współczynnika tarcia roślin o stal, nacisków wywołanych przez siłę odśrodkową, proporcjonalną do masy m , działającą na odciętą, zwartą porcję materiału, kwadratu prędkości kątowej oraz współczynników charakteryzujących dodatkowe elementy robocze. Średnie opory tarcia można wyznaczyć z zależności:

$$F_f = \mu k_r f_p m_c \omega^2 r_t \quad (8)$$

Masa transportowanego materiału zależy od strumienia masowego roślin i czasu trwania ruchu na odcinkach łukowych CD i EF: $m_c = q_m t_f$.

Moc potrzebna do pokonania występującego tarcia na gładkiej powierzchni obudowy jest równa ilorazowi włożonej pracy na jego pokonanie i czasu trwania ruchu t_f :

$$P_f = \frac{F_f r_t (\beta_t - \beta_{td})}{t_f} = \mu k_r f_p q_m \omega^2 r_t^2 (\beta_t - \beta_{td}) \quad (9)$$

Kąt β_t określający całkowitą drogę kątową przemieszczania cząstek po obudowie wyznaczono ze związku geometrycznego: $\beta_t = \beta_1 - \eta - \gamma$, a pozostałe kąty z zależności trygonometrycznych: $\eta = \arcsin \frac{m - 0,5h}{r}$, $\gamma = \arccos \frac{r}{r_t}$.

Promień wodzący środka długości roboczej noża obliczono ze wzoru:

$$r = \sqrt{a + \frac{b^2}{2} + m - \frac{h^2}{2}} \quad (10)$$

Do wyznaczenia mocy potrzebnej na przecieranie cząstek po płytce dennej wykorzystano teorię pracy cepowego zespołu młócacego [Żuk 1983], którą zmodyfikowano, z uwzględnieniem specyfiki konstrukcji i charakteru współpracy elementów roboczych.

Podczas przecierania roślin powstaje opór tarcia na powierzchniach roboczych korbów:

$$F_{fd} = \mu_d k_r f_p m_p \omega^2 r_t \quad (11)$$

Masa materiału roślinnego odcięta jednym nożem zależy od strumienia masy podawanego do zespołu tnącego oraz czasu cyklu cięcia: $m_p = q_m t_c$.

Droga kątowa obejmująca czynną powierzchnię korbów jest równa iloczynowi ilości spotkań krawędzi łopatek rzutnika z korbami na płytce dennej i szerokości kątowej karbu:

$$\beta_d = z i_k \frac{b_k}{r_t \cos \alpha_k} \quad (12)$$

Zapotrzebowanie mocy do przecierania materiału na płytce dennej wyznaczono z wyrażenia:

$$P_{fd} = \mu_d k_r f_p q_m \omega^2 r_t z i_k \frac{b_k}{\cos \alpha_k} \quad (13)$$

Praca potrzebna do ściskania materiału w obszarze płytki dennej zależy od siły $F_s = \mu_s m_p \omega^2 r_t^2$, wymaganej do przesunięcia tego materiału przez szczelinę roboczą o długości l_d oraz ściskania jednostkowego $\frac{s_m - s}{s_m}$ i wynosi:

$$L_s = F_s l_d \frac{s_m - s}{s_m} \quad (14)$$

Zapotrzebowanie mocy do pokonania oporów związanych ze ściskaniem materiału w szczelinie roboczej między płytką denną a łopatkami rzutnika wyznaczono z zależności:

$$P_s = \mu_s q_m \omega^2 r_t l_d \frac{s_m - s}{s_m} \quad (15)$$

Zapotrzebowanie na moc do wyrzucenia sieczki na wysokość $h_m = 0,5 \lambda_h u_m^2 / g$ przez łopatkę rzutnika do kanału wyrzutowego sieczkarni obliczono z zależności:

$$P_p = \lambda_h \frac{q_m \omega^2 r_t^2}{2} \quad (16)$$

Całkowite zapotrzebowanie na moc efektywną do pracy zespołu określa zależność:

$$P_t = L_j \frac{b h \omega z}{2\pi} + \lambda \frac{(1+k)^2 \cos^2 \tau + f^2 \sin^2 \tau}{2} q_m \omega^2 r^2 + \mu k_r f_p q_m \omega^2 r_t^2 (\beta_t - \beta_{td}) + \mu_d k_r f_p q_m \omega^2 r_t i_k \frac{b_k}{\cos \alpha_k} + \mu_s q_m \omega^2 r_t l_d \frac{s_m - s}{s_m} + \lambda_h \frac{q_m \omega^2 r_t^2}{2} \quad (17)$$

Nieznane w tej zależności wartości współczynników L_j , λ , μ , μ_d , μ_s , λ_h wyznaczono na podstawie danych doświadczalnych uzyskanych w badaniach stacjonarnych stosując metodę statystyczną z wykorzystaniem programu komputerowego Statgraphics v.4.1. Stwierdzono, że wszystkie wartości współczynników są statystycznie istotne na poziomie istotności nie większym niż 0,0001, a współczynnik determinacji dla mocy efektywnej wynosił 94,38%.

Podsumowanie

Analizując otrzymaną zależność można zauważyć, że zapotrzebowanie na moc efektywną do pracy zespołu rozdrabniającego, wyposażonego w dodatkowe elementy wspomagające proces rozdrabniania ziarna i rozrywania źdźbeł roślin, zależy od właściwości materiału roślinnego, parametrów konstrukcyjnych i technicznych elementów roboczych maszyny. Analiza logiczna tej zależności pozwala stwierdzić, że zawiera ona większość najistotniejszych parametrów decydujących o działaniu zespołu i najlepiej odzwierciedla rzeczywisty proces jego pracy. Uwzględniono w nim efekty wymuszeń pochodzące od

zastosowanych zespołów roboczych na materiał roślinny, zwłaszcza dodatkowych elementów, które dotychczas nie były prezentowane w literaturze.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007-2010 jako projekt badawczy N502 006 32/0677.

Bibliografia

- Čepurnoj A.I., Belov M.I. 2004. Rasčet diskovo izmiel'čajušče-švyrjajuščego apparata. Trakt. Selchozmaš. Nr 11. s. 33-42.
- Dmitrewski J. 1978. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. T. 3. PWRiL. Warszawa. s. 428.
- O'Dogherty M.J. 1982. A review of research on forage chopping. *J. Agric. Engng. Res.*, (27). s. 267-289.
- Żuk D. 1983. Ćwiczenia projektowe z maszyn rolniczych. Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa. s. 122.

DETERMINATION OF THE DEMAND FOR EFFECTIVE POWER OF A FLYWHEEL SHREDDING UNIT EQUIPPED WITH EXTRA WORKING ELEMENTS

Abstract. The research allowed to develop a theoretical model for determination of effective power demand of a cutting unit with extra working elements. The structure of the model reflects identified phenomena involved in plant cutting by throwing away cut off plants onto the surface of the unit housing, which was supported by radial bars, friction on this housing surface and on the surface of corrugated bottom plates, by squeezing small pieces of plants in a working gap between bottom plate and feeder beater vanes, and chaff ejection into chaff cutter ejection channel.

Key words: effective power, flywheel chopping unit, working elements

Adres do korespondencji:

Aleksander Lisowski; e-mail: aleksander_lisowski@sggw.pl
Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 164
02-787 Warszawa