

STEROWANIE PRĘDKOŚCIĄ W PROTOTYPOWEJ GILOTYNIE DO CIĘCIA PAKIETÓW BLACH

JAROSŁAW KACZMARCZYK

*Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska
e-mail: jaroslaw.kaczmarczyk@polsl.pl*

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest prototypowa gilotyna do cięcia pakietów blach. Opracowano metodę i algorytm sterowania prędkością noża gilotyny przy użyciu języka programowania obiektowego C++ oraz dokumentację techniczną gilotyny przy użyciu systemu komputerowego wspomagającego projektowanie CAD. Gilotyna umożliwia cięcie pod dowolnym kątem w zakresie od 30° do 90° mierzonym względem roboczej powierzchni poziomego stołu. Podstawowym zespołem gilotyny jest mechanizm korbowo-wodzikowy połączony z elektrycznym układem napędowym, którego zadaniem jest zapewnienie stałej prędkości liniowej ostrza noża podczas procesu cięcia.

1. WSTĘP

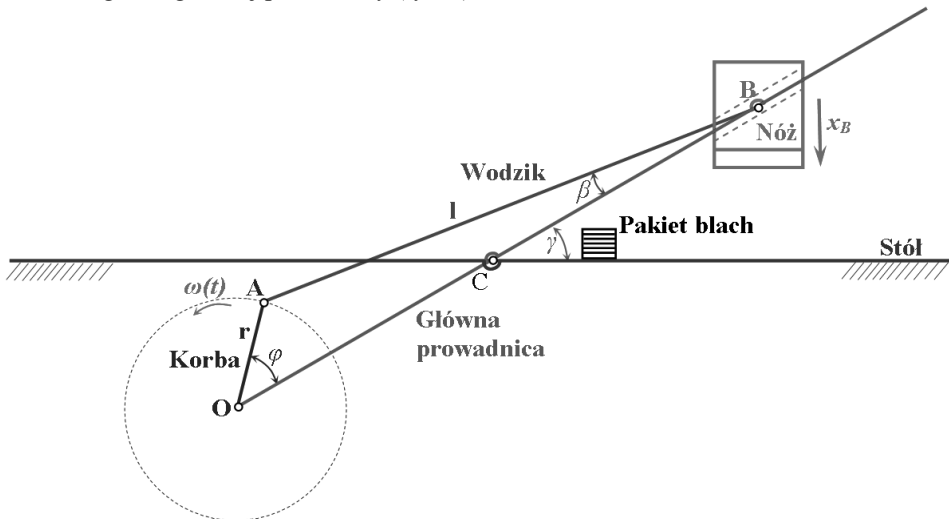
Obecnie w przemyśle stosuje się coraz częściej maszyny, jak i całe linie produkcyjne, które są w dużym stopniu zautomatyzowane. Ważnym zagadnieniem jest sterowanie urządzeniami, manipulatorami jak i robotami przemysłowymi [7]. Do ich napędu stosuje się serwomotory, które umożliwiają ruch z pożądanymi parametrami [1, 2, 6, 8] i taki serwomotor zastosowano do napędu prototypowej gilotyny. Opracowane własne stanowisko badawcze umożliwia zmianę szeregu parametrów przez zmianę specjalnie zaprojektowanych nastawów gilotyny. Możliwość zmiany nastawów ułatwia przeprowadzenie optymalizacji procesu cięcia, co z kolei prowadzi do poprawy jakości ciętych pakietów blach rozumianej w sensie zmniejszenia ilości defektów [4], jak i optymalizacji prędkości cięcia ze względu na dopuszczalne wartości temperatury [3, 5].

Prototypowe stanowisko charakteryzuje się możliwością cięcia pod dowolnym kątem, w zakresie od 30° do 90° w odniesieniu do roboczej powierzchni poziomego stołu gilotyny. Do jej napędu zastosowano serwomotor z przekładnią walcową o zębach skośnych, falownikiem i oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie prędkością kątową na wyjściu z motoreduktora. Podstawowym zespołem gilotyny jest mechanizm korbowo-wodzikowy. Zastosowany serwomotor pozwala na pracę ze zmienną prędkością kątową na wyjściu z motoreduktora, w taki sposób, aby nóż gilotyny poruszał się ze stałą prędkością liniową. Umożliwia to porównywanie jakości ciętych powierzchni blach w pakiecie. Zwykły silnik nie zapewnia jednorodnych warunków procesu cięcia. Obraca się on ze stałą prędkością kątową, co powoduje, że nóż porusza się z prędkością sinusoidalnie zmienną. Późniejsze porównywanie jakości ciętych powierzchni blach byłoby utrudnione, ponieważ każda blacha w pakiecie przecinana byłaby z inną prędkością liniową. Serwomotor umożliwia sterowanie prędkością, a więc zapewnia stałą prędkość ostrza noża w trakcie procesu cięcia za pomocy

oprogramowania *L-force Engineer*. Program ten steruje prędkością na podstawie charakterystyk opisujących zależność drogi kątowej na wyjściu z motoreduktora w funkcji czasu. Do wyznaczania wcześniej wspomnianych charakterystyk opracowano własny program komputerowy przy użyciu języka programowania obiektowego C++. Otrzymane charakterystyki uwzględniają trzy fazy związane z cyklem procesu cięcia. Pierwsza faza związana jest z rozruchem maszyny; w tej fazie liniowa prędkość noża opisana została wielomianem piątego stopnia w celu złagodzenia sił dynamicznych. Druga faza związana jest z realizacją procesu cięcia przy stałej prędkości noża, a trzecia faza dotyczy hamowania serwowatoru. Prędkość noża w tej ostatniej fazie została opisana tak jak w przypadku rozruchu wielomianem piątego stopnia. Opisywany napęd elektryczny połączono z modułem mechanicznym prototypowej gilotyny. Na stanowisku tym prowadzone są badania eksperymentalne mające na celu oszacowanie jakości przecinanych powierzchni pakietów blach i pomiar sił występujących w trakcie procesu cięcia w zależności od nastawów gilotyny i zadawanych prędkości noża. Wyniki badań doświadczalnych zostaną następnie porównane z wynikami obliczeń numerycznych.

2. MODEL MATEMATYCZNY KINEMATYKI PROTOTYPOWEJ GILOTYNY

Wspomniany wcześniej serwowator napędza przekładnię walcową o zębach skośnych, a ta z kolei napędza mechanizm korbowy o regulowanej długości poprzez sztywne sprzęgło przeciążeniowe. Korbę połączono z wózkami o regulowanej długości, która zmienia się w zależności od pochylenia głównej prowadnicy względem roboczej powierzchni stołu. Wózek drugim końcem połączony jest z wózkiem, na którym zamocowano nóż poruszający się równoległe do głównej prowadnicy (rys. 1).



Rys. 1. Schemat kinematyczny prototypowej gilotyny

Położenie ostrza noża na kierunku pionowym można opisać za pomocą następującego równania:

$$x_B = (r + l - r \cdot \cos \varphi - l \cdot \cos \beta) \cdot \sin \gamma, \quad (1)$$

gdzie:

r – regulowana długość korby,

l – regulowana długość wodzika,

φ – kąt obrotu na wyjściu z motoreduktora zawarty między główną prowadnicą a korba,

β – kąt zawarty między główną prowadnicą a wodzikiem,

γ – regulowany kąt pochylenia głównej prowadnicy względem poziomej roboczej powierzchni stołu,

x_B – pionowa współrzędna położenia ostrza noża.

Po prostych przekształceniach, z uwzględnieniem podstawowych związków trygonometrycznych, zapisano:

$$x_B = \left(r + l - r \cdot \cos[\varphi(t)] - \sqrt{l^2 - r^2} \cdot \sin^2[\varphi(t)] \right) \cdot \sin \gamma, \quad (2)$$

gdzie:

$\varphi(t)$ – kąt obrotu w funkcji czasu na wyjściu z motoreduktora,

t – czas.

Różniczkując równanie ruchu (2) względem czasu, otrzymano wzór na prędkość noża na kierunku pionowym:

$$v_B(t) = r \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \sin[\varphi(t)] \cdot \left[1 + \frac{r \cdot \cos[\varphi(t)]}{\sqrt{l^2 - r^2} \cdot \sin^2[\varphi(t)]} \right] \cdot \sin \gamma. \quad (3)$$

Podstawiając $\varphi(t) = \varphi$ oraz $d\varphi(t)/dt = \omega(t)$ do równania (3), można wyznaczyć wartość prędkości kątowej ω na wyjściu z motoreduktora w funkcji kąta obrotu φ i takich parametrów jak: prędkości noża $v_B(\varphi)$ i kąta pochylenia głównej prowadnicy względem poziomej roboczej powierzchni stołu gilotyny γ w następującej formie:

$$\omega = \omega(\varphi) = \frac{v_B(\varphi)}{r \cdot \sin \varphi \cdot \left(1 + \frac{r \cdot \cos \varphi}{\sqrt{l^2 - r^2} \cdot \sin^2 \varphi} \right) \cdot \sin \gamma}. \quad (4)$$

Powyższy wzór (4) na chwilową wartość prędkości kątowej na wyjściu z motoreduktora stanowi podstawę do opisu sterowania prędkością ostrza noża na kierunku pionowym. Prędkość ta w funkcji kąta obrotu obejmuje trzy wcześniej rozważane fazy pracy maszyny.

3. MODEL MATEMATYCZNY KINEMATYKI STEROWANIA OSTRZEM NOŻA

Do napędu prototypowej gilotyny zastosowano serwowmotor, który wyposażony został w specjalistyczne oprogramowanie umożliwiające sterowanie prędkością kątową przy użyciu algorytmu krzywkowego. W celu zapewnienia właściwej pracy urządzenia należy wprowadzić zależność położenia korby w funkcji czasu w taki sposób, aby możliwe było zapewnienie stałej prędkości noża w trakcie cięcia. W związku z tym został opracowany typoszereg charakterystyk w zależności od zmieniających się nastawów gilotyny i zadanej stałej wartości prędkości noża. Ta ostatnia wielkość ma wpływ zarówno na wartość siły cięcia, jak i na jakość ciętych blach.

Proces cięcia podzielono myślowo na trzy fazy. Pierwsza faza związana jest z rozruchem maszyny. Założono, że w tej fazie prędkość noża będzie się zmieniać od zera do prędkości, przy której nastąpi cięcie, co odpowiada zakresowi kąta obrotu na wyjściu z motoreduktora

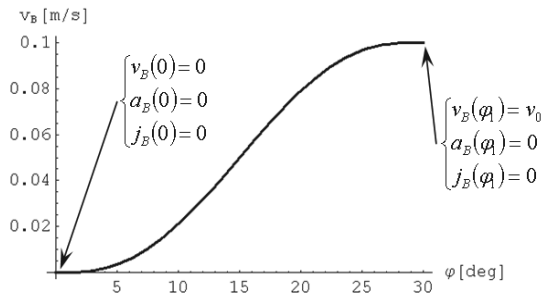
począwszy od zera do pewnej przyjętej granicznej wartości kąta φ_1 . Przyjęto, że prędkość noża $v_B(\varphi)$ we wzorze (4) będzie opisana wielomianem piątego stopnia w funkcji kąta φ :

$$v_B(\varphi) = b_0 + b_1 \cdot \varphi + b_2 \cdot \varphi^2 + b_3 \cdot \varphi^3 + b_4 \cdot \varphi^4 + b_5 \cdot \varphi^5, \quad (5)$$

gdzie:

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ – pewne stałe.

Stałe od b_0 do b_5 można wyznaczyć z warunków brzegowych. Przyjęto, że w chwili rozruchu: prędkość noża $v_B(0)$, przyspieszenie noża $a_B(0)$, jak i efekt szarpnięcia zwany w literaturze jerkiem $j_B(0)$ są równe zero. Natomiast w chwili odpowiadającej końcowi procesu rozruchu maszyny założono, że: prędkość noża $v_B(\varphi_1)$ równa się stałej prędkości cięcia pakietów blach v_0 , natomiast przyspieszenie $a_B(\varphi_1)$ i jerek $j_B(\varphi_1)$ są równe zero (rys. 2).

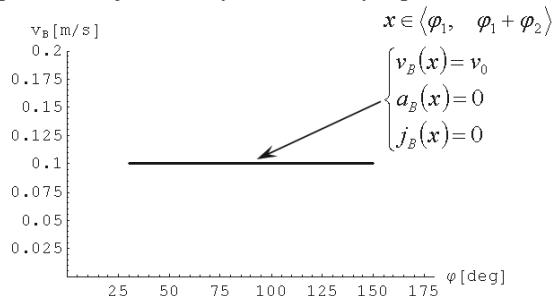


Rys. 2. Prędkość noża $v_B(\varphi)$ w funkcji kąta na wyjściu z motoreduktora odpowiadająca pierwszej fazie - rozruchowi

Druga faza związana jest z przecinaniem pakietów blach ze stałą prędkością równą prędkości v_0 w zakresie odpowiadającym położeniu kątowemu na wyjściu z motoreduktora od φ_1 do $\varphi_1 + \varphi_2$. Przyjęto, że prędkość noża $v_B(\varphi)$ będzie opisana wielomianem zerowego stopnia (rys. 3):

$$v_B(\varphi) = v_0. \quad (6)$$

Oznacza to, że przyspieszenie i jerek w całym rozważanym przedziale są równe zero.



Rys. 3. Prędkość noża $v_B(\varphi)$ w funkcji kąta na wyjściu z motoreduktora odpowiadająca drugiej fazie - cięciu ze stałą prędkością v_0

Trzecia faza związana jest z hamowaniem gilotyny. Założono w tej fazie, że prędkość noża $v_B(\varphi)$ będzie się zmieniać w zależności od prędkości, przy której realizowane jest cięcie v_0 , do prędkości, przy której nastąpi zatrzymanie maszyny, co odpowiada zakresowi kąta obrotu na

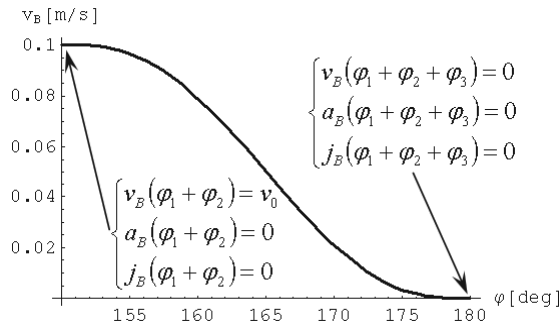
wyjściu z motoreduktora, począwszy od $\varphi_1 + \varphi_2$ do pewnej przyjętej granicznej wartości kąta $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$. Przyjęto, że prędkość noża $v_B(\varphi)$ będzie opisana, podobnie jak w przypadku rozruchu, wielomianem piątego stopnia w funkcji kąta φ :

$$v_B(\varphi) = b_6 + b_7 \cdot \varphi + b_8 \cdot \varphi^2 + b_9 \cdot \varphi^3 + b_{10} \cdot \varphi^4 + b_{11} \cdot \varphi^5, \quad (7)$$

gdzie:

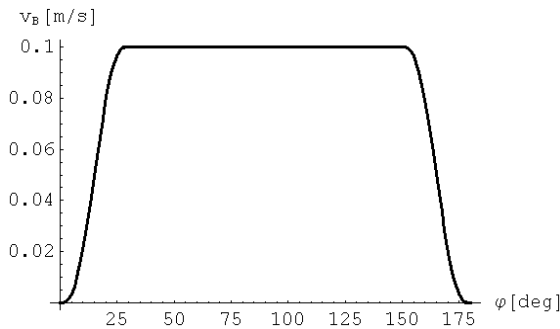
$b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}$ – pewne stałe.

Stałe od b_6 do b_{11} można wyznaczyć z warunków brzegowych. Przyjęto, że w chwili rozpoczęcia hamowania: prędkość noża $v_B(\varphi_1 + \varphi_2)$ równa jest prędkości v_0 , natomiast przyspieszenie noża $a_B(\varphi_1 + \varphi_2)$ i jerk $j_B(\varphi_1 + \varphi_2)$ są równe zero. Natomiast w chwili odpowiadającej zatrzymaniu maszyny założono, że: prędkość noża $v_B(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$, przyspieszenie $a_B(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$ i jerk $j_B(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$ są równe zero (rys. 4).



Rys. 4. Prędkość noża $v_B(\varphi)$ w funkcji kąta na wyjściu z motoreduktora odpowiadająca trzeciej fazie – hamowaniu

Wyznaczone wcześniej charakterystyki uwzględniające wszystkie trzy fazy związane z cyklem procesu cięcia (rys.: 2, 3 i 4) zestawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zmiana prędkości ruchu noża jako funkcja kąta obrotu

Przyrosty kąta obrotu na wyjściu z motoreduktora można obliczyć na podstawie poniższej zależności:

$$\Delta\varphi_i = \omega_{sr_i}(\varphi_i) \cdot \Delta t_i(\varphi_i), \quad (8)$$

gdzie:

$\Delta t_i(\varphi_i)$ - przyrost czasu w i -tej iteracji,

$\omega_{sr_i}(\varphi_i)$ – średnia wartość prędkości kątowej na wyjściu z motoreduktora w i -tej iteracji.

Równym przyrostom drogi kątovej odpowiadają różne wartości średnie prędkości kątowych i różne wartości odpowiadających im przyrostów czasowych. Średnie wartości prędkości kątowych można wyznaczyć na podstawie chwilowych prędkości kątowych (4) w i -tej i $i+1$ iteracji:

$$\omega_{sr i}(\varphi_i) = \frac{1}{2} \cdot [\omega_i(\varphi_i) + \omega_{i+1}(\varphi_{i+1})], \quad (9)$$

gdzie:

$\omega_i(\varphi_i)$ - chwilowa prędkość kątowa w i -tej iteracji,

$\omega_{i+1}(\varphi_{i+1})$ - chwilowa prędkość kątowa w $i+1$. iteracji.

Przyrosty czasowe można wyznaczyć na podstawie różnicy czasu w iteracji i -tej i $i+1$. według poniższej zależności:

$$\Delta t_i(\varphi_i) = t_{i+1}(\varphi_{i+1}) - t_i(\varphi_i), \quad (10)$$

gdzie:

$t_i(\varphi_i)$ - czas w i -tej iteracji,

$t_{i+1}(\varphi_{i+1})$ - czas w $i+1$. iteracji.

Przyrosty czasowe można również wyznaczyć przekształcając równanie (8):

$$\Delta t_i(\varphi_i) = \frac{\Delta \varphi_i}{\omega_{sr i}(\varphi_i)}. \quad (11)$$

Całkowity czas odpowiadający i -tej iteracji obliczono, sumując poszczególne przyrosty kolejnych kroków czasowych $\Delta t_i(\varphi_i)$ zgodnie z wzorem (12):

$$t_i(\varphi_i) = \sum_{j=1}^{j=i} \Delta t_j(\varphi_j). \quad (12)$$

Przyspieszenie kątove $\varepsilon_i(\varphi_i)$ wyznaczono metodą różnic centralnych:

$$\varepsilon_i(\varphi_i) = \frac{\omega_{i+1}(\varphi_{i+1}) - \omega_{i-1}(\varphi_{i-1})}{t_{i+1}(\varphi_{i+1}) - t_{i-1}(\varphi_{i-1})} = \frac{\omega_{i+1}(\varphi_{i+1}) - \omega_{i-1}(\varphi_{i-1})}{\Delta t_i(\varphi_i) + \Delta t_{i-1}(\varphi_{i-1})}. \quad (13)$$

Jerk kątovy $j_{\varepsilon i}(\varphi_i)$, podobnie jak przyspieszenie kątove, obliczono metodą różnic centralnych:

$$j_{\varepsilon i}(\varphi_i) = \frac{\varepsilon_{i+1}(\varphi_{i+1}) - \varepsilon_{i-1}(\varphi_{i-1})}{t_{i+1}(\varphi_{i+1}) - t_{i-1}(\varphi_{i-1})} = \frac{\varepsilon_{i+1}(\varphi_{i+1}) - \varepsilon_{i-1}(\varphi_{i-1})}{\Delta t_i(\varphi_i) + \Delta t_{i-1}(\varphi_{i-1})}. \quad (14)$$

Kąt obrotu w i -tej iteracji wyznaczono, całkując numerycznie wykres prędkości kątovej:

$$\Delta \varphi_i = \frac{1}{2} \cdot [\omega_{i+1}(\varphi_{i+1}) + \omega_i(\varphi_i)] \cdot \Delta t_i(\varphi_i). \quad (15)$$

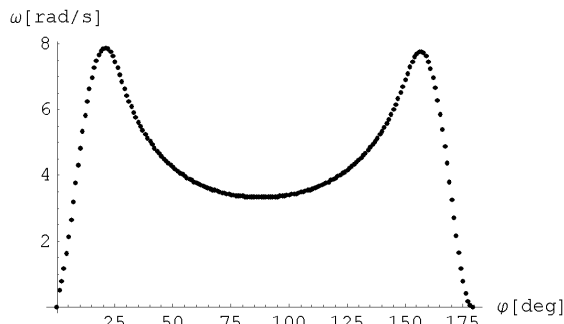
Sumaryczny kąt obrotu odpowiadający i -tej iteracji otrzymano, sumując poszczególne przyrosty cząstkowych kątów obrotu:

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{j=i} \Delta\varphi_j . \quad (16)$$

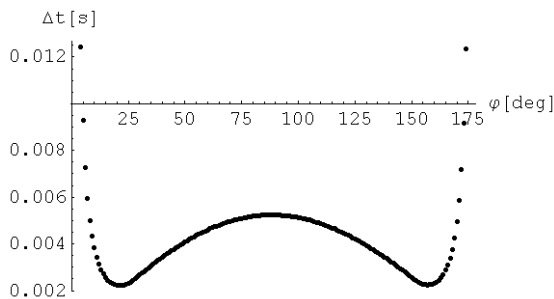
Powyższy wzór traktowano jako sprawdzenie poprawności obliczeń, porównując obliczone wartości kąta z wartościami danymi.

4. OBLICZENIA NUMERYCZNE I WYNIKI

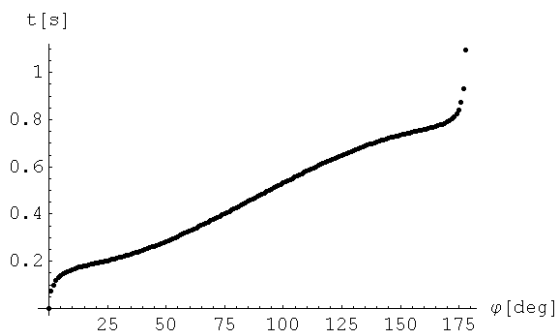
Obliczenia numeryczne prowadzono z zastosowaniem autorskiego programu komputerowego opracowanego w języku programowania obiektowego C++. Pozwala on na wprowadzenie danych o pożądanej prędkości cięcia, zakresie kątowym rozruchu, zakresie kątowym procesu cięcia ze stałą prędkością v_0 i zakresie kątowym hamowania. Ponadto należy wprowadzić informacje o nastawach maszyny (długości korby, długości wodzika i kąt pochylenia głównej prowadnicy względem roboczej powierzchni stołu). Program pozwala na przygotowanie pliku tekstowego z informacjami o kącie obrotu na wyjściu z motoreduktora w funkcji czasu. Tak przygotowany plik jest eksportowany do pamięci serwomotoru. Następnie serwomotor realizuje proces cięcia zgodnie z zaimportowaną charakterystyką. Możliwe jest więc przecinanie pakietów blach przy użyciu prototypowej gilotyny ze stałą prędkością liniową noża. Serwomotor obraca się wtedy ze zmienną prędkością kątową, której przykładowe wartości na wyjściu z motoreduktora w funkcji kąta obrotu zaprezentowano na rys. 6. Na kolejnych rysunkach (rys.: 7÷10) przedstawiono wybrane przebiegi pewnych wielkości kinematycznych w trakcie procesu cięcia.



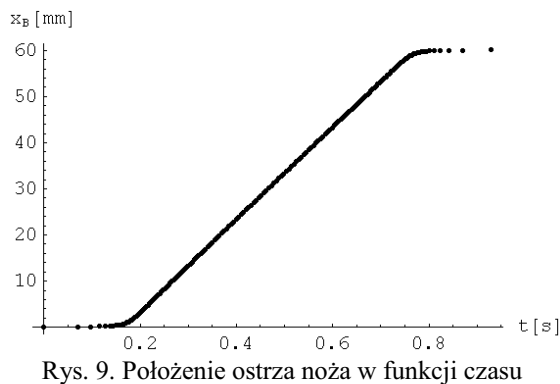
Rys. 6. Prędkość kątowa w funkcji kąta obrotu na wyjściu z motoreduktora



Rys. 7. Przyrosty czasu w funkcji kąta obrotu na wyjściu z motoreduktora

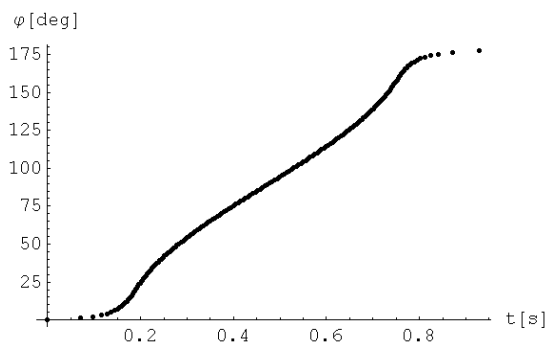


Rys. 8. Wykres przebiegu czasu w funkcji kąta obrotu na wyjściu z motoreduktora



Rys. 9. Położenie ostrza noża w funkcji czasu

Sterowanie prędkością ostrza noża przy użyciu serwomotoru opiera się na szeregu opracowanych charakterystyk przedstawiających zależność drogi kątowej na wyjściu z motoreduktora w funkcji czasu. Przykładową charakterystykę przedstawiono na rys. 10. Należy podkreślić, że prezentowana charakterystyka zawiera informacje o: rozruchu (rys. 2), pożądanej stałej prędkości w procesie cięcia (rys. 3) jak również hamowaniu (rys. 4) w zależności od pożądanych nastawów maszyny, takich jak: długość korby, długość wóznika i pochylenie głównej prowadnicy względem roboczej powierzchni stołu. Charakterystyka zawiera również informacje o: prędkości kątowej na wyjściu z motoreduktora (rys. 6), przyrostach czasowych (rys. 7), czasie cięcia (rys. 8) i położeniu ostrza noża w funkcji czasu (rys. 9).



Rys. 10. Wykres drogi kątowej na wyjściu z motoreduktora w funkcji czasu

Wymagania stawiane nowoczesnym maszynom i urządzeniom są związane z dążeniem do: wzrostu wydajności, komfortu użytkownika i niezawodności eksploatacyjnej. Powoduje to konieczność poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Prototyp gilotyny jest przykładem jednego z takich rozwiązań. Projekt ten opracowano, stosując profesjonalny program komputerowy *Catia*. Jest to system wielomodułowy wspomagający projektowanie części mechanicznych. Umożliwia przygotowanie szkiców, rysunków detali, jak również definiowanie podzespołów i zespołów.

5. WNIOSKI

Opracowane metody i algorytmy wyznaczania zależności drogi kątowej na wyjściu z motoreduktora w funkcji czasu stanowią podstawę do sterowania prędkością procesu cięcia w prototypowej gilotynie przy użyciu serwomotoru.

Opracowany program komputerowy w języku programowania obiektowego C++ ułatwia generowanie krzywych niezbędnych do sterowania serwowotorem w zależności od nastawów gilotyny i pożądaných prędkości cięcia.

Aproksymacja prędkości ostrza noża w trakcie rozruchu i hamowania wielomianem piątego stopnia w porównaniu z aproksymacją wielomianem stopnia pierwszego pozwala złagodzić cykl rozruchu i hamowania oraz zdecydowanie zmniejszyć wartości przyspieszeń i jerku szczególnie w miejscach, w których następuje przejście między poszczególnymi fazami.

Przedstawiony model matematyczny kinematyki cięcia gilotyną będzie pomocny w optymalizacji prędkości z uwagi na jakość cięcia i minimalną siłę cięcia. Wartość tej siły ma wpływ na częstość ostrzenia noża; im mniejsza siła cięcia, tym rzadziej należy ostrzyć nóż. Mniejsza częstotliwość ostrzenia noża powoduje obniżenie kosztów produkcji ciętych pakietów blach. Ponadto uzyskanie stałej prędkości noża w procesie cięcia ułatwia porównywanie wyników dotyczących jakości ciętych blach.

Autor dziękuje Panu Dyrektorowi ds. Systemów Napędowych mgr. inż. Romanowi Nowakowi z firmy Lenze Polska Sp. z o.o. z Katowic za pomoc przy doborze układu napędowego do prototypowej gilotyny, cenne wskazówki przy opracowywaniu typoszeregu charakterystyk niezbędnych do sterowania prędkością w prototypowej gilotynie, jak również za okazaną życzliwość.

LITERATURA

- [1] Bishop R. H.: *Mechatronic system control, logic, and data acquisition*. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC 2008.
- [2] Isermann R.: *Mechatronic systems fundamentals*. London: Springer-Verlag, 2005.
- [3] Kaczmarczyk J.: Optimisation of cutting velocity of bundles of various metal sheets on a guillotine with respect to heating process. "Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering" 2010, Vol. 43, Issue 2, p. 657-666.
- [4] Kaczmarczyk J.: Modelowanie uszkodzeń pojawiających się na nożu podczas cięcia na gilotynie. „Modelowanie Inżynierskie” 2010, nr 40, t. 9, s 117-124.
- [5] Kaczmarczyk J.: Optymalizacja procesu nagrzewania pakietów blach stalowych w trakcie cięcia na gilotynie. „Modelowanie Inżynierskie” 2009, nr 37, t. 6, s. 161-168.

-
- [6] Kosmol J., Brzoska W., Klarecki K., Kolka A., Metlak B., Śliwka J.: Laboratorium z napędu i sterowania elektrycznego obrabiarek. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2000.
- [7] Kost G. G.: Układy sterowania robotów przemysłowych. Gliwice: Wyd. Pol. Śl., 2000.
- [8] Ogata K.: Discrete-time control systems. London: Prentice-Hall International, 1995.

VELOCITY CONTROL IN A PROTOTYPICAL GUILLOTINE USED FOR CUTTING BUNDLES OF SHEETS

Summary. The aim of the paper was preparation of methods and algorithms for the velocity control of a prototypical guillotine used for cutting bundles of sheets applying an object oriented language C++ and elaboration of technical documentation of the guillotine using a computer aided design system CAD. The guillotine allows for cutting at an arbitrary chosen angle within a range from 30° to 90° measured relatively to the work-top of a horizontal table. The functioning of the guillotine is based on a slider-crank mechanism combined with an electrical power transmission system whose task is to guarantee a constant value of a linear velocity of the blade of a cutting tool in the process.

Badania realizowano w ramach projektu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2008-2011, grant nr N N503 326435.