

(19)



URZĄD  
PATENTOWY  
RZECZYPOSPOLITEJ  
POLSKIEJ

(10) **PL 242312 B1**

(12)

## Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **434613**

(22) Data zgłoszenia: **2020.07.09**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2021.03.22 BUP 06/2021**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2023.02.13 WUP 07/2023**

(51) MKP:

**G05B 19/404 (2006.01)**

(73) Uprawniony z patentu:

**UNIWERSYTET RZESZOWSKI, Rzeszów, PL  
PODKARPACKIE CENTRUM INNOWACJI  
SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ  
ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ, Rzeszów, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**BARBARA PEKALA, Rzeszów, PL  
EWA RAK, Rzeszów, PL  
BOGDAN KWIATKOWSKI, Ropczyce, PL  
ADAM SZCZUR, Zgłobień, PL**

(74) Pełnomocnik:

**Marta Bartula-Toch, Kraków, PL**

(54) Tytuł:

**Sposób optymalizacji czasu pracy obrabiarek sterowanych numerycznie**

**PL 242312 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób optymalizacji pracy urządzeń sterowanych numerycznie, w szczególności obrabiarek CNC.

Globalizacja światowa gospodarki rynkowej obejmująca wszystkie sfery produkcyjne wymusza na naukowcach i inżynierach działania zmierzające do osiągnięcia coraz to doskonalszych wytworów w coraz krótszym czasie. Wielozadaniowe maszyny sterowane numerycznie CNC (ang. Computerized Numerical Control) są obecnie podstawowymi narzędziami procesu wytwórczego w wielu gałęziach przemysłu. Najczęściej spotykanym typem maszyn CNC są maszyny 3-osiowe i 5-osiowe. Są to maszyny w układzie kartezjańskim tzn. osie mechaniczne maszyny realizujące ruch postępowy odpowiadają osiom kartezjańskiego układu współrzędnych. Dzięki pięciu osiom maszyna CNC działa w pięciu kierunkach, w których może się poruszać wrzeciono. W porównaniu do konwencjonalnych maszyn posiadających tylko trzy osie, narzędzie pozwala ustawić różne kąty względem powierzchni, dzięki czemu ta sama obróbka jest szybsza i dokładniejsza. Co więcej, żywotność maszyn jest przedłużona.

Urządzenia sterowane numerycznie wyposażono w mikrokomputer (sterownik), który można programować na różne sposoby. Informacje o aktywności, parametrach przetwarzania, geometrii lub sekwencji ruchów są kodowane alfanumerycznie. Zastosowanie tego typu rozwiązania umożliwi produkcję różnych kształtów w szybki i precyzyjny sposób.

Sterownik maszyny CNC ma za zadanie wygenerowanie w stałych odstępach czasu (np. co 1 ms) przemieszczeń zadawanych serwonapędem poszczególnych osi mechanicznych maszyny. Złożenie posuwów poszczególnych osi prowadzi do uzyskania przemieszczenia narzędzia wzdłuż zadanego toru ruchu, a w konsekwencji uzyskaniu pożądanego kształtu obrabianego przedmiotu.

Wyróżniamy trzy podstawowe typy systemu sterowania ruchem:

- Sterowanie z punktu do punktu (PTP) – do pozycjonowania narzędzia od jednego punktu do drugiego w układzie współrzędnych. Każda oś narzędzia jest kontrolowana niezależnie, a zatem; zaprogramowany ruch zawsze odbywa się szybko. Gdy narzędzie osiągnie pożądane miejsce, operacja obróbki jest wykonywana w tej pozycji (obróbka może odbyć się dopiero po zakończeniu pozycjonowania).
- Sterowanie cięcia prostego – zdolne do przesuwania narzędzia skrawającego równolegle do jednej z głównych osi z kontrolowaną prędkością odpowiednią do obróbki. Ta kontrola posuwu jest wspólna dla wszystkich programowalnych osi maszyny NC.
- Sterowanie kształtowe – najbardziej złożony i elastyczny, rodzaj sterowania obrabiarką. Jest w stanie wykonywać zarówno operacje PTP, jak i operacje cięcia prostego. Ponadto cechą wyróżniającą systemy kształtowe NC jest ich zdolność do jednoczesnego sterowania ruchem więcej niż jednej osi obrabiarki. System sterowania kształtowego generuje stale kontrolowaną trajektorię ruchu narzędzia poprzez możliwość obliczenia punktów trajektorii (interpolacja). Z tego powodu jest również nazywany systemem NC z ciągłą trajektorią ruchu.

Obrabiarki wieloosiowe zapewniają doskonałą zdolność do osiągnięcia dobrej jakości obrabianej powierzchni i lepszą elastyczność ruchu narzędzia przy obróbce złożonych części. W odniesieniu do budowy urządzeń sterowanych numerycznie potrzeba dokonywania modyfikacji istniejących łańcuchów procesowych wynika z dążenia do uzyskiwania jeszcze bardziej korzystnych efektów techniczno-ekonomicznych w warunkach konkurencyjności. Wzrost optymalnej wydajności obróbki przy jednoczesnym spełnianiu innych wymagań odnośnie geometrii oraz jakości powierzchni końcowego produktu możliwy jest poprzez ciągły rozwój i udoskonalanie systemów sterowania dostępnych na rynku obrabiarek. Należy zaznaczyć, że pomysł numerycznego sterowania obrabiarek jest nowym rozwiązaniem, co daje naukowcom z różnych dziedzin ogromne możliwości badawczo-rozwojowe. Na podstawie pewnych funkcji matematycznych opisujących kształt przedmiotu opracowano sterowanie przetwarzające sformułowane binarnie i impulsowo wartości wejściowe połączeń oraz schematów na ruch elementów obrabiarki.

W sterowaniu kształtowym maszyn CNC bardzo istotnym problemem jest wybór optymalnej prędkości posuwu narzędzia. Posuw z dużymi prędkościami i przyspieszeniami umożliwia krótszy czas obróbki co przekłada się na zwiększenie wydajności procesu produkcyjnego. Z drugiej strony większe prędkości i przyspieszenia powodują zwiększenie błędów nadążania w poszczególnych osiach. W ostatniej dekadzie wielu badaczy skoncentrowało swoje badania na kinematyce i modelowaniu błędów geometrycznych, wydajnym generowaniu trajektorii ruchu narzędzia, szacowaniu błędu konturu w czasie rzeczywistym i ograniczeniach przy doborze prędkości posuwu. Spośród nich dobór prędkości posuwu, który determinuje wydajność obróbki i dokładność wymiarową, zyskuje ostatnio znaczną uwagę ze

strony branży producentów NC i środowiska naukowego. Przy doborze prędkości posuwu należy ograniczyć przyspieszenie na każdej osi maszyny, ponieważ możliwości momentu obrotowego napędów osi są ograniczone. Dlatego problem polega na tym, jak zidentyfikować posuw wzdłuż danej trajektorii, tak aby czas obróbki był minimalny bez przekraczania możliwości siłowników. Zaproponowano różne algorytmy określające minimalny czas ruchu automatycznego sterownika wzdłuż określonej trajektorii (co najmniej gładkiej krzywej) z granicznymi wartościami przyspieszenia na osiach X, Y, Z. Jednak profil przyspieszenia uzyskany powyższymi metodami ma nieciągłości, gdyż przyspieszenie może ulec zmianie z maksimum na minimum. Te nieciągłości odpowiadają skokowym zmianom mocy wyjściowej wymaganej od napędu, przyczynie wibracji i niektórym błędom odtwarzania toru ruchu. Jedną z metod minimalizacji drgań (wibracji, rezonansów mechanicznych) jest wprowadzenie ograniczeń pochodnej przyspieszenia, tj. Jerka (zrywu) wzdłuż każdej osi do pierwotnego problemu. Wadą uwzględnienia ograniczenia zrywu jest większa złożoność obliczeniowa algorytmów ze względu na konieczność stosowania rozwiązań iteracyjnych w odróżnieniu od metod uwzględniających jedynie ograniczenie przyspieszenia osi. Jednak dzięki temu uzyskamy prędkości posuwu z ciągłym przyspieszaniem. Właściwy Jerk zwiększa przyspieszenie i wygładza prędkość. Jako parametr należy do aspektu osiągnięcia lepszej wydajności poprawiając funkcje sterowania. Kilka technik, takich jak klasyczny algorytm przewidujący i jego modyfikacje zostały opracowane w celu wygenerowania prędkości posuwu ograniczonego przez Jerk. Jednak w metodach tych brakuje dostatecznego uwzględnienia „twardych limitów” możliwości fizycznych serwonapędów napędzających obrabiarki, zazwyczaj ze względu na nadmierne uproszczenie założeń w zakładanej obróbce. Może to prowadzić do wczesnego zużycia narzędzia lub nawet możliwego uszkodzenia struktury mechanicznej maszyny. Aby poradzić sobie z tym problemem, przedstawiono algorytm iteracji dychotomii, algorytm dwukierunkowego skanowania i algorytm ewolucji krzywej w celu rozwiązania problemów interpolacji prędkości posuwu za pomocą ograniczenia Jerka na osiach. Jednak takie rozwiązanie problemu nieliniowego jest na ogół intensywne obliczeniowo i czasochłonne. Różne metody, takie jak algorytm Sekwencyjnego Programowania Kwadratowego i algorytm Greedy'ego, zostały wykorzystane do osiągnięcia znacznie lepszej funkcjonalności – optymalności.

Optymalność i wydajność obliczeniowa to dwa bardzo pożądane, ale także konkurencyjne atrybuty optymalnego doboru prędkości posuwu. Wprowadzenie innowacyjnej metody może znacznie zwiększyć wydajność obróbki, skracając czas pozycjonowania narzędzia w zależności od ograniczeń obrabiarki. Problem optymalizacji nieliniowej ma na celu osiągnięcie najwyższego możliwego posuwu wzdłuż trajektorii ruchu narzędzia, przy jednoczesnym ograniczeniu profili prędkości poziomu siłownika, przyspieszenia i Jerka (szybkości zmiany przyspieszenia). Metody proponowane w literaturze albo wykorzystują raczej złożone nieliniowe solvery optymalizacyjne, takie jak sekwencyjne programowanie kwadratowe, wykorzystują iteracyjną heurystykę, która wydłuża czas obliczeń, lub wykorzystują konwencjonalne założenia, które skracają czas obliczeń, ale prowadzą do spowolnienia ruchu narzędzia.

Z opisu wynalazku PL394004A1 znany jest sposób programowania maszyny CNC, zwłaszcza obrabiarki lub pomiarowej maszyny współrzędnościowej.

Sposób charakteryzuje się tym, że ręcznie przemieszcza się zespoły prowadnicowe maszyny przy pomocy układów sensorycznych w postaci manetek do pomiaru sił. Manetki te umieszczone są na końcowych elementach łańcuchów kinematycznych maszyny CNC i sprzężone poprzez interfejs sygnałowy z układem sterowania maszyny CNC. Informacje o poszczególnych położeniach zespołów prowadnicowych przekazuje się do pamięci układu sterowania maszyny CNC i zapisuje w postaci programu obróbkowego maszyny CNC. W opisie ujawniona została również maszyna CNC, charakteryzująca się tym, że wyposażona jest w układy sensoryczne w postaci manetek do pomiaru sił, umieszczone na końcowych elementach łańcuchów kinematycznych maszyny CNC i sprzężone poprzez interfejs sygnałowy z układem sterowania maszyny CNC.

W opisie wynalazku PL223848B1 ujawniony został sposób wyznaczania bazowego układu odniesienia dla programu obróbkowego lub pomiarowego detalu na maszynie CNC, zwłaszcza obrabiarce lub maszynie współrzędnościowej, który charakteryzuje się tym, że po wykonaniu kalibracji względem ściśle ulokowanego na maszynie co najmniej jednego punktu charakterystycznego i powiązaniu systemu skanowania wizyjnego z maszynowym układem współrzędnych oświetla się światłem strukturalnym i skanuje się trójwymiarowo przedmiot umieszczony na stole wraz z otoczeniem. Uzyskane dane przesyła się do jednostki obliczeniowej, gdzie wykonuje się, stosując translacje i rotacje macierzowe T, procedurę transformacji przyjętego w kodzie programu bazowego układu współrzędnych na nowy układ bazowy do obróbki lub pomiaru detalu. Maszyna CNC, charakteryzuje się tym, że ma układ do wyznaczania bazowego układu odniesienia dla programu obróbkowego lub pomiarowego detalu, składający

się z co najmniej jednej kamery oraz co najmniej jednego źródła oświetlenia strukturalnego i stołu obrotowego lub więcej niż dwóch kamer (K) oraz więcej niż dwóch źródeł oświetlenia.

Z opisu wynalazku US10558193B2 znany jest sposób optymalizacji czasu pracy obrabiarki sterowanej numerycznie. Sposób według zastrzeżenia obejmuje połączenie obrabiarki sterowanej numerycznie ze sterownikiem obrabiarki; załadowanie programu sterującego do sterownika obrabiarki; określanie ścieżki ruchu wygenerowanej w sterowniku obrabiarki przez program sterujący; symulację obróbki przedmiotu przy pomocy programu sterującego; przyporządkowanie ścieżki ruchu do co najmniej jednego obszaru potencjalnej optymalizacji w którym nie zachodzi kontakt z obrabianym przedmiotem; przypisanie co najmniej jednemu obszarowi optymalizacji przestrzeni tolerancji w której wyznaczana jest poprzez symulację ścieżka ruchu. Na zakończenie procesu optymalizacji wyświetlana i oznaczana jest zoptymalizowana ścieżka ruchu, która po zaakceptowaniu parametrów przez użytkownika umożliwi zoptymalizowaną obróbkę przedmiotu.

Opis wynalazku US2005209712A1 ujawnia sposób sterowania numerycznego stosowany między innymi w obrabiarkach. Sposób obejmuje w szczególności przechowywanie w pamięci danych sterujących osi sterującej uzyskanych przez wykonanie rzeczywistej kontroli maszyny dla programu obrabiarki sterowanej numerycznie; przeprowadzanie z góry określonego procesu optymalizacji w celu usunięcia serii danych kontrolnych, gdy zawartość wszystkich elementów kontrolnych w tym samym czasie wynosi zero dla danych kontrolnych przechowywanych w wymienionej pamięci; przechowywanie zoptymalizowanych danych kontrolnych w pamięci; i wykonywanie sterowania numerycznego w oparciu o zoptymalizowane dane sterowania we wspomnianej pamięci. Sam proces optymalizacji obejmuje wprowadzenie i przetworzenie danych wejściowych w celu ustawienia zbieżności czasu zakończenia ruchu z zadanej osi sterującej z czasem zakończenia ruchu innej osi sterowania przez wskazanie na ekranie wyświetlacza z góry określonej lokalizacji wyświetlanego wzoru prędkości i przeniesienie pamięci położenie danych sterujących na z góry określonej osi sterującej w oparciu o wspomniane dane wejściowe, tak że czas końca ruchu z góry określonej osi sterującej może być zbieżny z czasem końca ruchu innej osi sterującej.

**Istota** rozwiązania według wynalazku polega na tym, że wskazuje się parę funkcji wypukłą i wklęsłą do modelowania parametru Jerk, wyznacza się współrzędne położenia punktu przegięcia – zmiany funkcji wypukłej czyli przyspieszenia na wklęsłą czyli hamowania wraz z ich dopuszczalnymi wartościami parametrów  $v$ ,  $a$ ,  $j$ , w szczególności dla każdej pary sąsiednich punktów geometrycznych  $p_{pocz}$ ,  $p_{konc}$  rozpoczynając od zadanej wartości parametru Jerk dla punktu  $p_{pocz}$  dobiera się wypukłą funkcję modelowania Jerku  $f(n)^{g(k)}$ , gdzie  $f$  i  $g$  są funkcjami liniowymi, a  $f(n)=n+a$  i  $g(k)=k+b$  przy ustalonych wartościach  $n$  i  $k$  dla  $a, b \in [0, \infty)$ , przy czym wartości  $a$  oraz  $b$  ulegają stałemu zwiększaniu wraz z przechodzeniem do kolejnych punktów pośrednich. Zwiększenie Jerku skutkuje przyspieszeniem i proces ten trwa do punktu pośredniego, w którym przy nowej wartości Jerku osiąga się maksymalną dopuszczalną prędkość albo przyspieszenie lub gdy dociera się do punktu  $p_k$  będącego w połowie drogi pomiędzy punktami  $p_{pocz}$  i  $p_{konc}$ , który oznacza się jako  $k$ -ty punkt pośredni. Wówczas ustala się Jerk na stałym/ostatnim poziomie lub rozpoczyna proces hamowania, czyli funkcja wypukła  $f(n)^{g(k)}$  zostaje zastąpiona przez funkcję do niej przeciwną, przy czym decyzję opiera się na teście, czyli symulacji, czy rozpoczynając hamowanie od punktu  $p_k$  osiąga się punkt  $p_{konc}$  zadaną dokładnością. Jeśli błąd jest mniejszy kontynuuje się proces przy stałym Jerk-u, a w przypadku większego błędu powtarza symulację dla punktu  $p_{k-1}$  przy oczekiwanej dokładności, następnie przekazuje się zoptymalizowane parametry dla punktów pośrednich pracy maszyny do sterownika.

Korzystnie pożądaną minimalną dokładność określa się na poziomie 0,01 mm.

Zaletą wynalazku jest rozwiązanie problemu optymalnego doboru prędkości posuwu wzdłuż nieregularnej trajektorii ruchu narzędzia dla wieloosiowych maszyn CNC z ograniczeniem parametru Jerk dla każdej osi. Innowacja polega na modyfikacji tego parametru, poprzez zastosowanie pary funkcji wypukłych i wklęsłych. Rozwiązanie opiera się na uruchomieniu odpowiedniej pary funkcji przeciwnych, wypukłej i wklęsłej, konstruowanych na węzłach pomocniczych pomiędzy zadanymi dwoma węzłami bazowymi opisującymi geometrię zadanego obiektu.

Wdrożenie rozwiązania w obrabiarkach i sterownikach podniesie ich konkurencyjność i rentowność na rynku światowym ze względu na zwiększenie precyzji i wydłużenie żywotności komponentów maszyn CNC, przy zachowaniu dobrej i porównywalnej z innymi metodami prędkości wykonania procesu produkcji.

Rozwiązanie według wynalazku zostało zilustrowane przykładem wykonania przedstawionym na rysunku, gdzie Fig. 1 stanowi graf przedstawiający ogólny proces obróbczy maszyny CNC, a Fig. 2 stanowi graf przedstawiający kolejne etapy realizacji sposobu.

Szczegóły rozwiązania omówione są poniżej według punktów w grafie Fig. 2:

- I. **Dane wejściowe maszyny.** Każda maszyna CNC ma określone parametry pracy, czyli maksymalne możliwe wartości takie jak: prędkość ( $v$ ), przyspieszenie ( $a$ ), Jerk ( $j$ ).
- II. **Dane obiektu.** Dane charakteryzujące wytwarzany obiekt, czyli współrzędne położenia punktów geometrycznych i pośrednich wraz z ich dopuszczalnymi wartościami parametrów  $v$ ,  $a$ ,  $j$ .
- III. **OPTIMALIZACJA, czyli proces uczący.** Dla każdej pary sąsiednich punktów geometrycznych ( $p_{pocz}$ ,  $p_{konc}$ ), rozpoczynając od zadanej wartości parametru Jerk dla punktu  $p_{pocz}$ , dobiera się funkcję modelowania Jerku, funkcję wypukłą:

$$f(n)g(k),$$

gdzie  $f$  i  $g$  są funkcjami liniowymi:

$$f(n)=n+a, g(k)=k+b$$

przy ustalonych wartościach  $n$  i  $k$  dla  $a, b \in [0, \infty)$  wartości  $a$  oraz  $b$  ulegają stałemu zwiększaniu wraz z przechodzeniem do kolejnych punktów pośrednich.

Zatem zwiększając Jerk przyspiesza się. Proces ten trwa do punktu pośredniego, w którym przy nowej wartości Jerku osiąga się maksymalną dopuszczalną prędkość albo przyspieszenie lub dociera się do punktu będącego w połowie drogi pomiędzy punktami  $p_{pocz}$  i  $p_{konc}$ . Punkt ten oznacza się  $p_k$  jako  $k$ -ty punkt pośredni.

Wówczas ustala się Jerk na stałym/ostatnim poziomie lub rozpoczyna się proces hamowania, czyli funkcję wypukłą  $f(n)g(k)$  zastępuje się przez funkcję do niej przeciwną.

Decyzję opiera się na teście, czyli symulacji, czy rozpoczyna się hamowanie od punktu  $p_k$  osiąga się punkt  $p_{konc}$  z zadaną dokładnością (przyjęto jako pożądaną minimalną dokładność 0,01 mm) oraz prędkością.

Jeśli błąd jest mniejszy jedzie się dalej przy stałym Jerk-u, natomiast dla większego błędu powtarza się symulację dla punktu  $p_{k-1}$  i przy oczekiwanej dokładności.

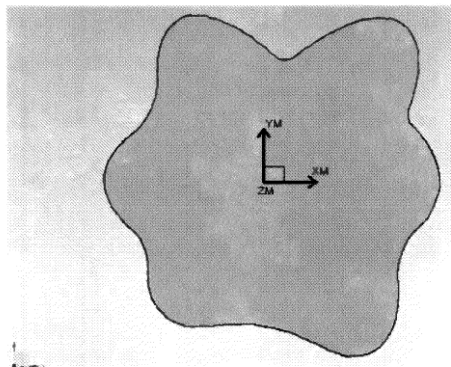
Przekazuje się zoptymalizowane parametry dla punktów pośrednich/pracy maszyny do sterownika.

W procesie uczącym parametrów przy szukaniu odpowiednich punktów rozpoczynających hamowanie kluczowe jest także testowanie różnych wartości dla zmiany  $a$  i  $b$ . Optymalne rezultaty uzyskuje się dla kroku 0.05, przy najmniejszym błędzie metody.

Natomiast zmiany wartości  $n$  i  $k$  nie mają wpływu na efektywność sposobu optymalizacji pracy obrabiarki CNC.

Zastosowanie sposobu według wynalazku jest przedstawione w odniesieniu do przykładowej figury testowej przy różnym doborze funkcji wypukłych i im przeciwnych, wklęsłych oraz dla wybranej pary ww. punktów geometrycznych:

	x_geom	y_geom
$p_{pocz}$	61,76487	172,88918
$p_{konc}$	65,23753	174,61331



W tabelach tab. 1 i tab. 2 zamieszczono wykaz punktów pośrednich na odcinku pomiędzy pierwszym i drugim punktem geometrycznym figury pokazanej na rysunku, uzyskanych za pomocą opisanego sposobu optymalizacji pracy obrabiarki, opartej na modelowaniu wartości Jerku, czyli metody w której za pomocą rosnącej funkcji wypukłej przyspieszamy do pewnego – optymalnego, wyznaczonego podczas wykonywania algorytmu, punktu zaznaczonego w tabelach na czerwono, a od którego rozpoczyna się hamowanie za pomocą wklęsłej funkcji do wskazanych parametrów wymaganych w kolejnym punkcie geometrycznym. W przypadku prezentowanych danych do modelowania wartości Jerku użyto funkcji  $f(n)^{g(k)}$ , gdzie dla rezultatów z tab. 1 przyjęto  $n=2$  i  $k=7$ , zaś dla tab. 2  $n=14$  i  $k=2$ .

Jerk	x	y	x_geom	y_geom
0	61,76487	172,88918	61,76487	172,88918
128	61,764871	172,889181		
137,187003	61,764875	172,889183		
147,033389	61,764883	172,889187		
157,586485	61,764897	172,889193		
168,897013	61,764918	172,889204		
181,019336	61,764948	172,889219		
194,011721	61,764989	172,889239		
207,936613	61,765043	172,889266		
222,860944	61,765112	172,8893		
238,856446	61,765199	172,889343		
256	61,765306	172,889396		
274,374006	61,765436	172,889461		
294,066779	61,765592	172,889538		
315,17297	61,765776	172,88963		
...	...	...		
14014,1356	62,908336	173,456896		
14004,9486	62,948021	173,476599		
13995,10221	62,987703	173,496301		
13984,54912	63,027379	173,515999		
13973,23859	63,067048	173,535694		
13961,11626	63,106708	173,555385		
13948,12388	63,146357	173,57507		
13934,19899	63,185992	173,594749		
13919,27466	63,225613	173,61442		
13903,27915	63,265216	173,634082		
13886,1356	63,304798	173,653734		
13867,76159	63,344358	173,673375		
13848,06882	63,383892	173,693003		
13826,96263	63,423397	173,712617		
13804,34158	63,46287	173,732215		
13780,09693	63,502307	173,751795		
...	...	...		
834,1923	65,237878	174,608965	65,23753	174,61331

Tab. 1. Wykaz punktów pośrednich nowej metody opartej na modelowaniu Jerku [ $f(n)^{g(k)}$ ,  $n=2$ ,  $k=7$ ]

Jerk	x	y	x_geom	y_geom
0	61,76487	172,88918	61,76487	172,88918
196	61,764872	172,889181		
225	61,764878	172,889184		
256	61,764891	172,88919		
289	61,764913	172,889201		
324	61,764948	172,889219		
361	61,765	172,889244		
400	61,765071	172,88928		
441	61,765168	172,889328		
484	61,765293	172,88939		
529	61,765454	172,88947		
576	61,765654	172,889569		
625	61,765901	172,889692		
676	61,766202	172,889841		
729	61,766563	172,89002		
...	...	...		
6693	63,098057	173,55109		
6664	63,138446	173,571142		
6633	63,178828	173,591192		
6600	63,219201	173,611236		
6565	63,259562	173,631275		
6528	63,299906	173,651305		
6489	63,340229	173,671325		
6448	63,380528	173,691333		
6405	63,420798	173,711326		
6360	63,461033	173,731303		
6313	63,501228	173,751259		
6264	63,541376	173,771192		
6213	63,581471	173,791098		
6160	63,621505	173,810975		
6105	63,661472	173,830818		
...	...	...		
328	65,228474	174,603919	65,23753	174,61331

Tab. 1. Wykaz punktów pośrednich nowej metody opartej na modelowaniu Jerku  $[f(n)^{g(k)}, n=14, k=2]$

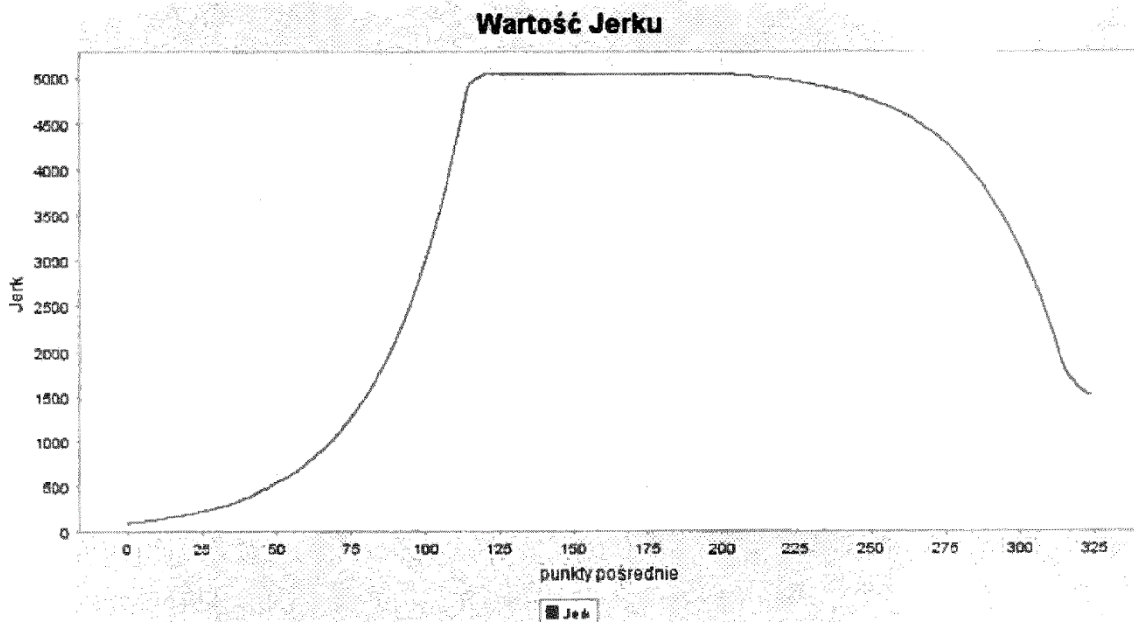
Na podsumowanie, w tabeli tab. 3 zamieszczono zestawienie czasu pracy i błędów przy osiągnięciu punktów geometrycznych dla standardowej pracy maszyny przy wykonywaniu modelu figury pokazanej na rysunku oraz dla nowej metody optymalizacji pracy obrabiarki.

	Standardowa praca maszyny	Nowa metoda optymalizacji pracy maszyny wykorzystująca funkcję modelowania Jerku: $f(n)^{g(k)}$	
		n=2, k=7	n=14, k=2
Czas pracy maszyny	82,112 sek.	82,078 sek.	77,868 sek.
Średni błąd	0,008925815 mm	0,009967 mm	0,009345 mm
Odchylenie standardowe średniego błędu	0,019171518 mm	0,008326 mm	0,008157 mm

Tab. 3. Zestawienie czasu pracy i błędów dla standardowej pracy maszyny i nowej metody optymalizacji

Nowy sposób optymalizacji pracy maszyn CNC poprawił precyzję wykonania danego obiektu (wg odchylenia standardowego błędu) oraz zwiększył łagodność pracy maszyny przy jednoczesnym zachowaniu optymalnej prędkości posuwu.

Przykładowy kształt Jerku wygenerowany przy wykorzystaniu sposobu według wynalazku (przy użyciu  $n=2$  i  $k=6$ ) dla drogi pomiędzy wybranymi dwoma punktami geometrycznymi przedstawia rysunek:



## Zastrzeżenia patentowe

1. **Sposób optymalizacji czasu pracy obrabiarek sterowanych numerycznie znamienny tym, że** wskazuje się parę funkcji wypukłą i wklęsłą do modelowania parametru Jerk, wyznacza się współrzędne położenia punktu przegięcia – zmiany funkcji wypukłej czyli przyspieszania na wklęsłą czyli hamowania wraz z ich dopuszczalnymi wartościami parametrów ( $v$ ,  $a$ ,  $j$ ), w szczególności dla każdej pary sąsiednich punktów geometrycznych ( $p_{pocz}$ ,  $p_{konc}$ ) rozpoczynając od zadanej wartości parametru Jerk dla punktu  $p_{pocz}$  dobiera się wypukłą funkcję modelowania Jerku  $f(n)g^{(k)}$ , gdzie  $f$  i  $g$  są funkcjami liniowymi, a  $f(n)=n+a$  i  $g(k)=k+b$  przy ustalonych wartościach  $n$  i  $k$  dla  $a, b \in [0, \infty)$ , przy czym wartości  $a$  oraz  $b$  ulegają stałemu zwiększaniu wraz z przechodzeniem do kolejnych punktów pośrednich; zwiększenie Jerku skutkuje przyspieszeniem i proces ten trwa do punktu pośredniego, w którym przy nowej wartości Jerku osiąga się maksymalną dopuszczalną prędkość albo przyspieszenie lub gdy dociera się do punktu  $p_k$  będącego w połowie drogi pomiędzy punktami  $p_{pocz}$  i  $p_{konc}$ , który oznacza się jako  $k$ -ty punkt pośredni, wówczas ustala się Jerk na stałym/ostatnim poziomie lub rozpoczyna proces hamowania, czyli funkcja wypukła  $f(n)g^{(k)}$  zostaje zastąpiona przez funkcję do niej przeciwną, przy czym decyzję opiera się na teście, czyli symulacji, czy rozpoczynając hamowanie od punktu  $p_k$  osiąga się punkt  $p_{konc}$  z zadaną dokładnością, natomiast jeśli błąd jest mniejszy kontynuuje się proces przy stałym Jerk-u, a w przypadku większego błędu powtarza symulację dla punktu  $p_{k-1}$  przy oczekiwanej dokładności, następnie przekazuje się zoptymalizowane parametry dla punktów pośrednich pracy maszyny do sterownika.
2. **Sposób** według zastrz. 1 **znamienny tym, że** pożądaną minimalną dokładność określa się na poziomie 0,01 mm.

## Rysunki

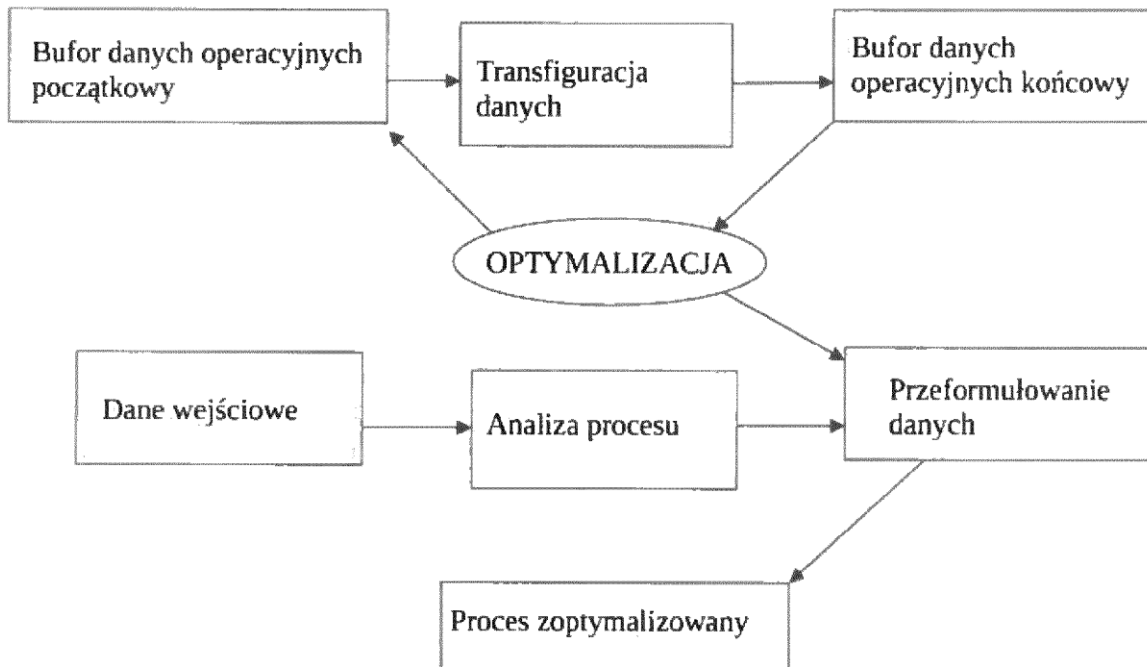


Fig. 1

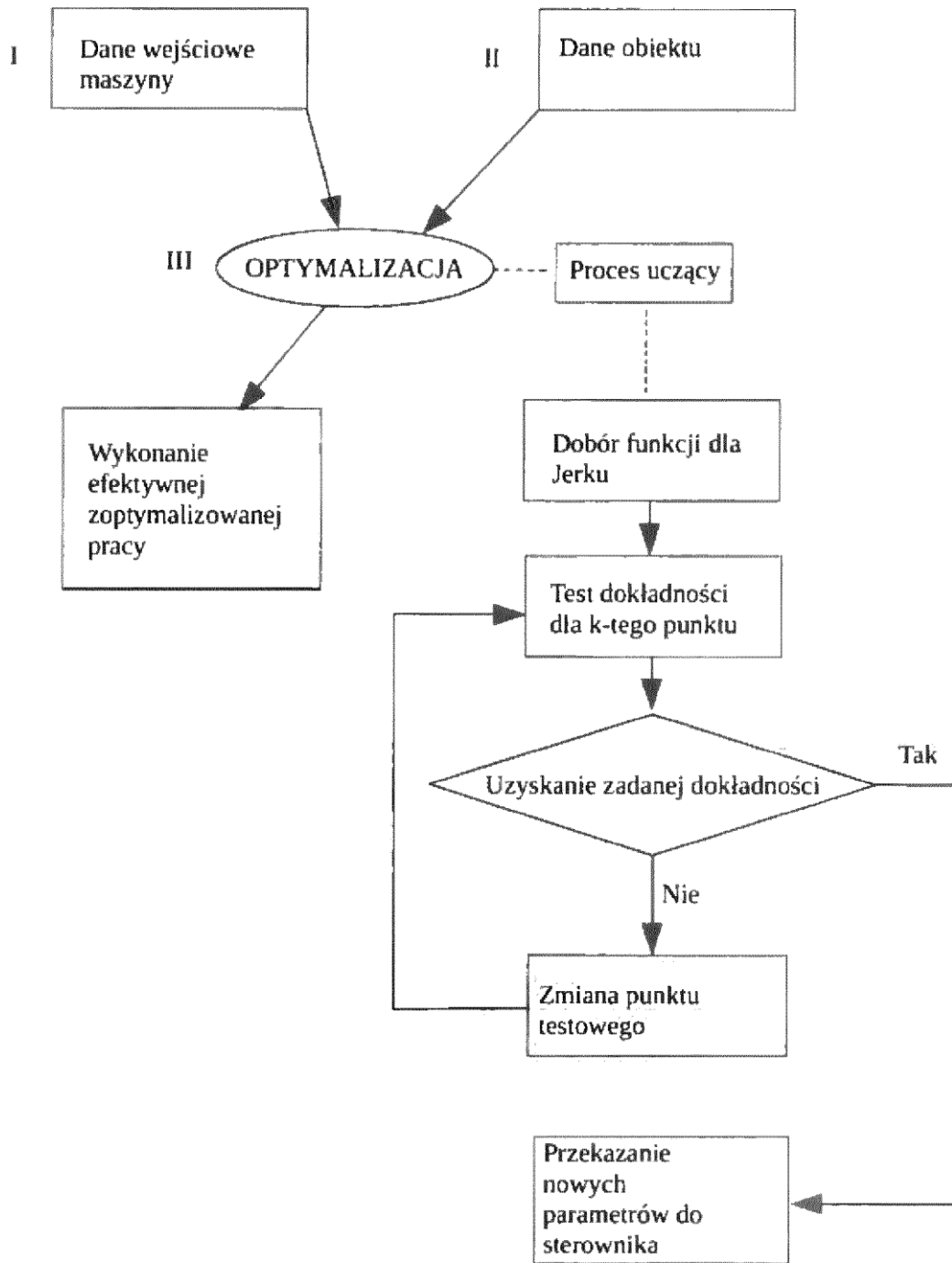


Fig. 2