

# KOMPENSACJA BŁĘDÓW OBRÓBKI W PROCESACH FREZOWANIA

Jerzy LIPSKI

**Streszczenie:** Coraz wyższe wymagania dotyczące dokładności geometrycznej po obróbce frezowaniem, przy założeniu wysokich parametrów skrawania, powodują konieczność wprowadzania korekcy do programu opisującego tor narzędzia. Źródłem prognozowanej wartości tej korekcy są wyniki pomiarów przedmiotów rozpoczynających partię produkcyjną. W rezultacie istniejących nieliniowych zależności między otrzymanymi po obróbce odchyłkami a wprowadzoną wartością korekcy, powstaje problem opracowania algorytmu w celu ustalenia wartości korekcy minimalizującej błęd. W artykule przedstawiono koncepcję takiego algorytmu wykorzystującego wyniki pomiaru pierwszych sztuk w serii do opracowania parametrów korekcy w wielu punktach toru narzędzia.

**Słowa kluczowe:** frezowanie, błędy obróbki, algorytmy korekcyjne

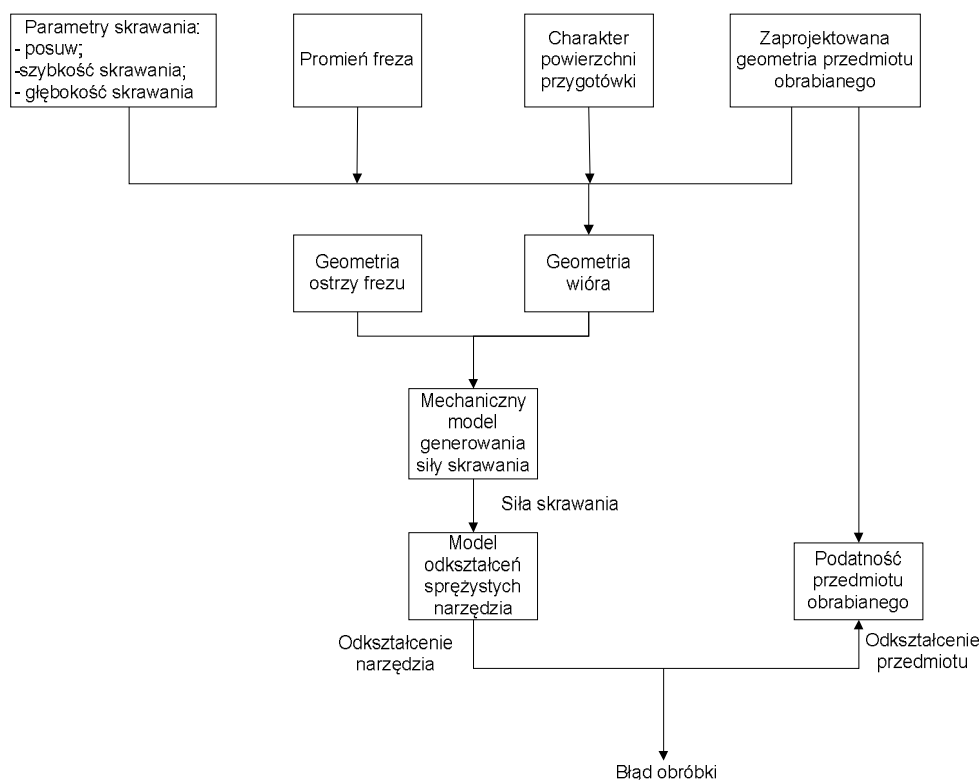
## 1. Przyczyny powstawania błędów geometrii powierzchni obrobionych w procesie frezowania

Powierzchnia obrobiona w procesie frezowania ma geometrię powstałą w wyniku przemieszczania się ruchem posuwowym punktu styku wirującego wieloostrzowego narzędzia. Jeżeli można by założyć, że zarówno narzędzie jak i oprawka a także przedmiot zamocowany do stołu obrabiarki, są idealnie sztywne to sterowanie położeniem punktu styku narzędzia z przedmiotem byłoby proste. Niestety tak nie jest, dodatkowo stan termiczny układu przedmiot obrabiany – frez ulega zmianie i jest zależny zarówno od czasu obróbki jak i bieżącego położenia narzędzia na wyznaczonym torze. Efektem tego jest zmienna temperatura w strefie skrawania zależna od miejsca i czasu.

Jeżeli przedmiot obrabiany ma kształt regularny i względnie stałą sztywność w kierunku działania sił skrawania to, pomijając zjawiska cieplne można oczekiwać stałych wartości odkształceń wywołanych tymi siłami. W wielu jednak przypadkach technolog musi pisać program sterujący obróbką części o bardzo złożonych kształtach. Konstrukcje korpusów, wsporników, dźwigni i innych odpowiedzialnych elementów maszyn są zaprojektowane z uwzględnieniem kryterium największej sztywności i wytrzymałości w kierunku działania obciążeń przy minimalnej masie wyrobu. W tej sytuacji frezowanie odbywa się po torach krzywoliniowych wzdłuż żeber lub ścianek o zmiennym profilu i stosunkowo małej i także zmiennej sztywności w kierunku działania sił skrawania [4]. Na deformacje fragmentów przedmiotu spowodowane odkształceniami sprężystymi nakładają się deformacje cieplne, gdyż linia styku frezu z materiałem obrabianym, jako źródło ciepła, przemieszcza się wzdłuż toru narzędzia. Zróżnicowana wydajność cieplna tego źródła a także niejednakowe warunki odprowadzania ciepła, powodują również zróżnicowane efekty destabilizujące położenie powierzchni po obróbce względem wymiarowej bazy stałej związanej z przedmiotem obrabianym.

Dla ścisłości rozważań należałoby uwzględnić jeszcze możliwe błędy wynikające z różnic położenia toru osi frezu i toru linii jego styku z przedmiotem obrabianym a także

wynikające z błędów geometrii obrabiarki oraz interpolatora. Błędy te jednak pominięto zakładając, że mogą one być zdiagnozowane i skompensowane w układzie sterowania CNC (np. przez użycie funkcji G41 lub G42 w programie).



Rys. 1. Proces generowania błędów obróbki podczas frezowania [3]

Efektom opisanych zjawisk i właściwości procesu skrawania frezem jest powstanie różnic między zaplanowanym i zaprogramowanym torem narzędzia a jego rzeczywistym położeniem w przestrzeni obróbkowej. Powoduje to zróżnicowanie wymiarów przedmiotu po obróbce w odniesieniu do stałej bazy. Jeżeli wartości błędów mieszczą się w polu tolerancji to nie zachodzi potrzeba interwencji technologa. Taka sytuacja ma miejsce przy obróbce powierzchni swobodnych obrabianych w celu nadania częściom kształtów o zminimalizowanej masie, gdzie przyjmuje się wartości tolerancji warsztatowej. Jednakże, jeśli dotyczy to powierzchni współpracujących (np. otworów obrabianych frezowaniem), tolerancje mogą być tak zawężone, że można się spodziewać przekroczeń. Znany rozwiązaniem, stosowanym przez technologów, jest zmniejszenie do minimum wartości parametrów skrawania w przejściach wykańczających [1]. Oznacza to jednak zmniejszenie wydajności obróbki. Innym rozwiązaniem jest wprowadzenie dodatkowej korekcji średnicy frezu jednakowej na całej drodze narzędzia i tak wyliczonej, aby nie przekroczyć granic tolerancji. Można to zrealizować w oparciu o dokładne pomiary powierzchni obrobionych i wyznaczenie zakresu zmienności błędu wzdłuż toru narzędzia. Powstaje jednak ryzyko

założenia zbyt dużych wartości korekcji co może skutkować lokalnymi przekroczeniami tolerancji. Pewnym rozwinięciem tej metody może być podział drogi narzędzia na odcinki o zróżnicowanym zakresie błędów i zróżnicowanie także wartości kompensacji na tych odcinkach. Trzeba jednak pamiętać, że korekcja polegająca na zbliżeniu narzędzia do przedmiotu obrabianego lub oddaleniu powoduje, w pewnym stopniu, zmianę wartości składowych siły skrawania oraz wartości generowanej energii rozpraszanej w postaci ciepła. Zjawiska te mogą w pewien sposób wpływać na rezultat wprowadzonej w ten sposób korekcji. Można zauważyć, że przy założeniu liniowej zależności ze współczynnikiem 1 między wartością zmierzonego błędu a wartością korekcji, w wyniku obróbki z korekcją nadal powstaje błąd, wprawdzie mniejszy lub nawet z przeciwnym znakiem lecz jest. Mowa tu o wartości średniej błędu z kilku realizacji procesu obróbki, ponieważ zawsze jest pewien czynnik losowy wpływający na bieżącą wartość błędu po obróbce.

Własności dynamiczne i statyczne, w kolejnych punktach toru narzędzia są nieznanne i w warunkach przemysłowych nierealne są próby ich wyznaczenia dla każdej operacji frezarskiej. Dlatego związek funkcyjny między wartością wprowadzonej korekcji a wartością błędu osiągniętego w jej rezultacie także nie może być wyznaczony wprost dla każdego punktu toru.

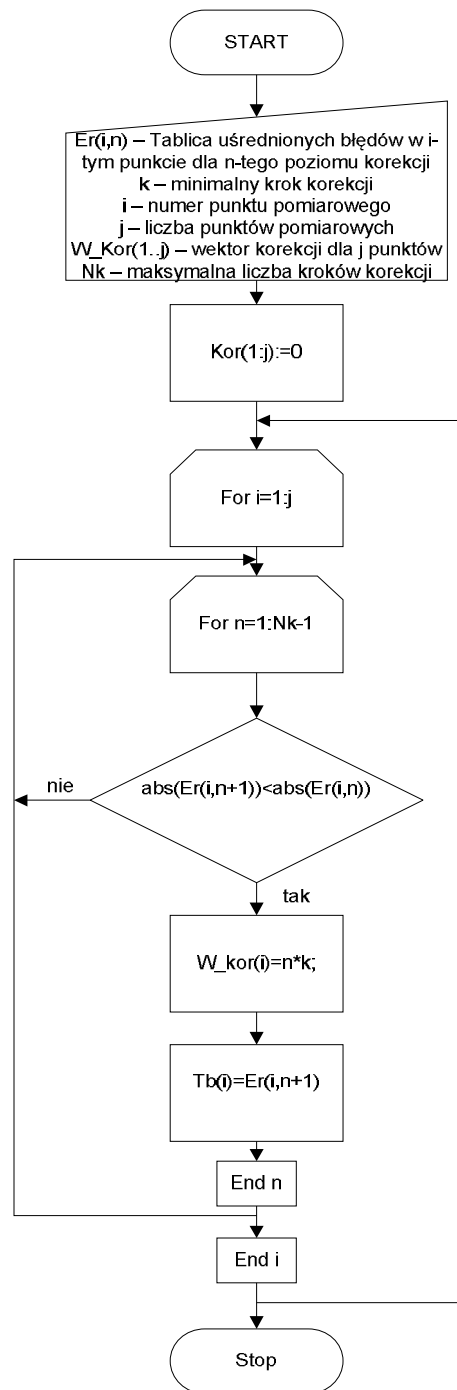
Podjęto próbę rozwiązania tego problemu przez skonstruowanie algorytmu uczącego pozwalającego na nauczenie doboru wartości korekcji na podstawie historii prób wprowadzania korekcji i oceny jej rezultatu w kolejnych punktach toru narzędzia.

## 2. Struktura algorytmu wyznaczania wartości korekcji

Konstrukcja algorytmu, dla poprawnego działania wymaga spełnienia kilku założeń:

- proces frezowania powinien mieć ustalone warunki skrawania i parametry takie jak: posuw, szybkość skrawania i nominalną grubość warstwy skrawanej na całej długości korygowanego toru narzędzia;
- w celu zgromadzenia danych dla ciągu uczącego należy wykonać kilka realizacji procesu oraz pomiaru otrzymanych błędów wzdłuż toru narzędzia co pozwoli na ich uśrednienie. Proces ten można zautomatyzować dokonując kontrolnych pomiarów rezultatów obróbki na maszynie pomiarowej i rejestrując wyniki;
- wartości korekcji powinny być wielokrotnością minimalnego kroku realizowanego przez zespoły napędowe posuwu, wartości mniejsze są nierealizowalne;

Algorytm wyznaczenia wartości korekcji toru narzędzia został przedstawiony na rys.2. Podstawową zmienną strukturalną w tym algorytmie jest tablica  $Er(i,n)$  rezultatów korekcji w fazie uczenia, która zawiera dla każdego punktu pomiarowego  $i$  wartości błędów z odpowiednim znakiem wskazującym kierunek odchyłki od wymiaru nominalnego. Wartości te odpowiadają korekcjom od zerowej do  $Nk$ -tej reprezentującej maksymalną korekcję zastosowaną w eksperymencie uczącym. Dla wszystkich punktów toru narzędzia, w trakcie uczenia, są stosowane takie same wartości korekcji od zerowej do maksymalnej.



Rys.2. Schemat algorytmu wyznaczenia wartości korekcji na podstawie danych z obróbki eksperymentalnej

W rezultacie eksperymentu błędy w pewnych punktach toru mogą przekroczyć wartości dopuszczalne co zakwalifikuje te części do braków. Jednakże koszt kilku braków powinien być zrekompensowany korzyścią z obróbki całej serii przedmiotów o złożonych kształtach przy zastosowaniu wydajnych parametrów obróbki i minimalnych błędach wymiarów.

Wiedza zawarta w tablicy może być wykorzystana do wyznaczenia indywidualnej korekcji dla każdego punktu pomiarowego. Celem algorytmu jest wybór takiej wartości korekcji dla wybranego punktu leżącego na torze narzędzia, która da w rezultacie minimalną odchyłkę od zerowej wartości błędu. Jeżeli zmierzony w analizowanym punkcie błąd (po obróbce bez korekcji) nie przekracza wartości minimalnego kroku korekcji, algorytm pozostawia ten punkt bez analizy. Jeśli natomiast, wartość ta jest większa, algorytm sprawdza rezultaty testowanej korekcji wprowadzając kolejne jej wartości przez inkrementację o przyjętą jednostkę. Do realizacji przyjmuje się taką wartość korekcji, dla której jest spełniony warunek minimum błędu. Operację tą powtarza się dla każdego wytypowanego punktu toru narzędzia. Liczba skorygowanych punktów i ich położenie zależy od stopnia złożoności przedmiotu obrabianego.

W celu wykorzystania opisywanego algorytmu należy zgromadzić dane z pomiarów (w wybranych punktach toru narzędzia) po obróbce testowej. Obróbka taka odbywa się przy założeniu wydajnych parametrów skrawania i dla  $n$  poziomów wartości korekcji jednakowych dla całego toru narzędzia. Błędy z tych prób, w stosunku do wartości nominalnych, są zapisane w tabeli  $Er(i,n)$ . Każdy wiersz tabeli reprezentuje zbiór pomiarów w  $i$ -tym punkcie toru dla kolejnych poziomów korekcji. Należy również założyć maksymalną liczbę kroków korekcji  $Nk$  i minimalną wartość kroku korekcji  $k$ . Rezultatem takich założeń będzie maksymalna dopuszczalna korekcja będąca iloczynem tych dwu wielkości. Rezultatem obliczeń optymalizacyjnych jest wektor  $W\_Kor$ -elementowy, który zawiera wyznaczoną dla każdego  $i$ -tego punktu pomiarowego zalecaną wartość korekcji. Wartość ta jest tak określona, aby w rezultacie otrzymać w każdym z analizowanych punktów wymiar możliwie bliski nominalnemu.

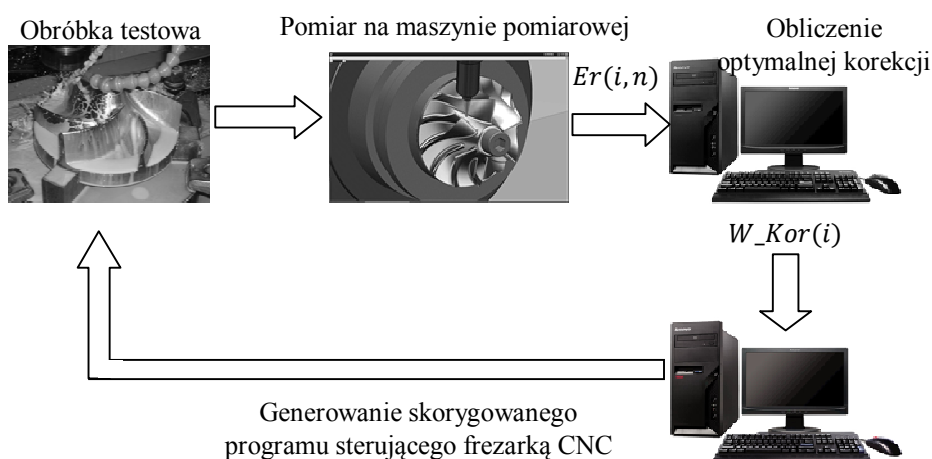
W pierwszym etapie algorytmu przyjmuje się do obliczeń pierwszy punkt pomiarowy, zerowy poziom korekcji oraz wypełnia zerami wektor korekcji optymalnych. Algorytm analizuje czy wprowadzenie korekcji o kolejno wzrastającej wartości powoduje, dla danego punktu pomiarowego, zmniejszenie błędu w odniesieniu do sytuacji bez korekcji, a w kolejnych krokach, w stosunku do poprzedniego stanu błędu. Jeżeli, dla analizowanego punktu, dalsza korekta nie przynosi zmniejszenia błędu to do wektora korekcji  $W\_kor(i)$  wpisuje się wartość korekcji poprzedniej, czyli dla tego punktu najlepszej. Jednocześnie jest wypełniany wektor błędów  $Tb(i)$  minimalnych możliwych do osiągnięcia podczas optymalnej korekcji.

### 3. Koncepcja zastosowania algorytmu optymalizującego korekcję toru narzędzia

Metoda zoptymalizowanej korekcji nadaje się szczególnie dla seryjnej obróbki frezowaniem elementów o znacznej i niejednakowej podatności obserwowanej wzdłuż drogi narzędzia. Może mieć także zastosowanie przy obróbce frezami kulistymi powierzchni metodą wierszowania [2,5]. W tym przypadku dla każdego wiersza będzie przypisana macierz zarejestrowanych błędów i obliczona korekcja będzie zapisana nie w wektorze  $W\_kor(i)$  a w macierzy reprezentującej zbiór wartości korekcji dla wytypowanych punktów powierzchni krzywoliniowej.

Zastosowanie proponowanej metody skorygowania toru narzędzia skrawającego podczas frezowania należy przeprowadzić w kilku etapach pokazanych na rys. 3:

- przeprowadzenie testowej obróbki bez korekcji frezu dla ustalonych parametrów obróbki zapewniających zadowalającą wydajność;
- dokonanie precyzyjnych pomiarów otrzymanego kształtu powierzchni w wytypowanych, na podstawie kryteriów konstrukcyjnych wyrobu, punktach;
- na podstawie zaobserwowanego błędu oszacowanie liczby jednostek minimalnej korekcji koniecznych do sprowadzenia toru narzędzia do przynajmniej częściowego nałożenia się z idealnym zarysem obrabianej powierzchni;
- wykonanie obróbki eksperymentalnej przy wprowadzonych kolejno korekcjach o jeden elementarny krok;
- dokonanie pomiarów otrzymanych błędów w poprzednio określonych punktach i wypełnienie tablicy „wrażliwości na korekcję”  $Er(i,n)$ ;
- Zastosowanie algorytmu optymalizującego (rys.2) wyznaczającego optymalny wektor korekcji w wytypowanych punktach;
- wprowadzenie otrzymanego wektora korekcji do programu obróbki;
- testowa obróbka skorygowanym programem;
- uruchomienie serii produkcyjnej.



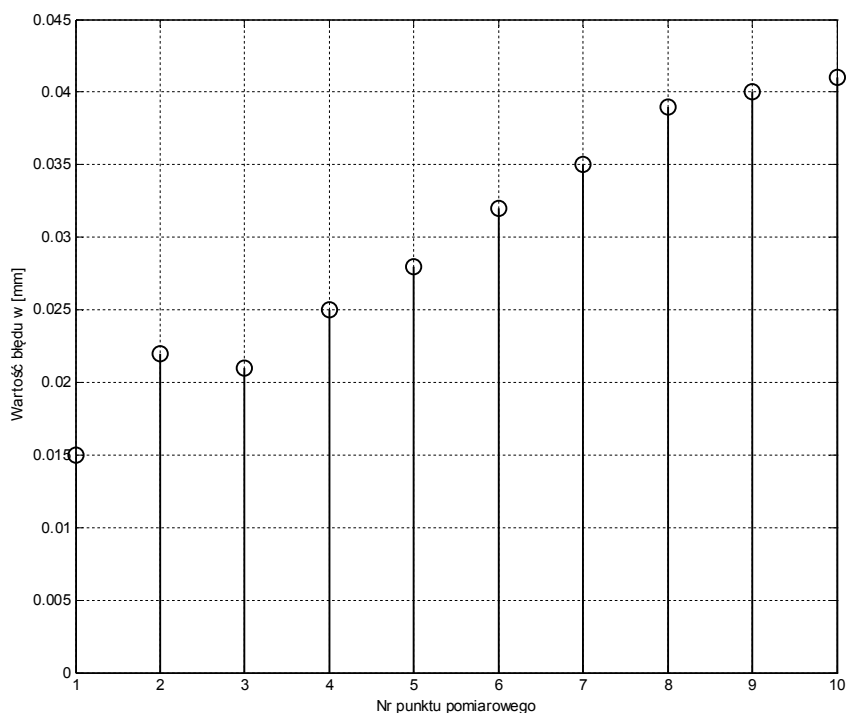
Rys. 3. Etapy wprowadzania zoptymalizowanej korekcji toru narzędzia

#### 4. Przykładowe zastosowanie koncepcji zoptymalizowanej korekcji toru narzędzia podczas frezowania

Opisany algorytm zastosowano do usprawnienia obróbki seryjnej części zawierających elementy krzywoliniowe typu żebra o zmiennym przekroju i znacznej podatności. Przykład dotyczy jednego wybranego elementu, którego wymiary były kontrolowane w 10 punktach. Celem było zwiększenie wydajności operacji frezarskich przy jednoczesnej poprawie dokładności obrabianej części. Po obróbce pierwszej sztuki bez korekcji, dokonano pomiaru na maszynie pomiarowej i uzyskano wykres błędów jak na rys. 4.

Na podstawie analizy wyników pomiarów można dojść do wniosku, że należy przesunąć tor narzędzia o ok. 0.015 mm we wszystkich punktach kontrolnych. Jednakże nie zmniejszy to błędów do wartości dopuszczalnej ( $\pm 0,01$ ) dla punktów położonych

w najbardziej podatnych obszarach przedmiotu. Można się spodziewać, dla skrajnie podatnych punktów aż 0,04 mm korekcji.



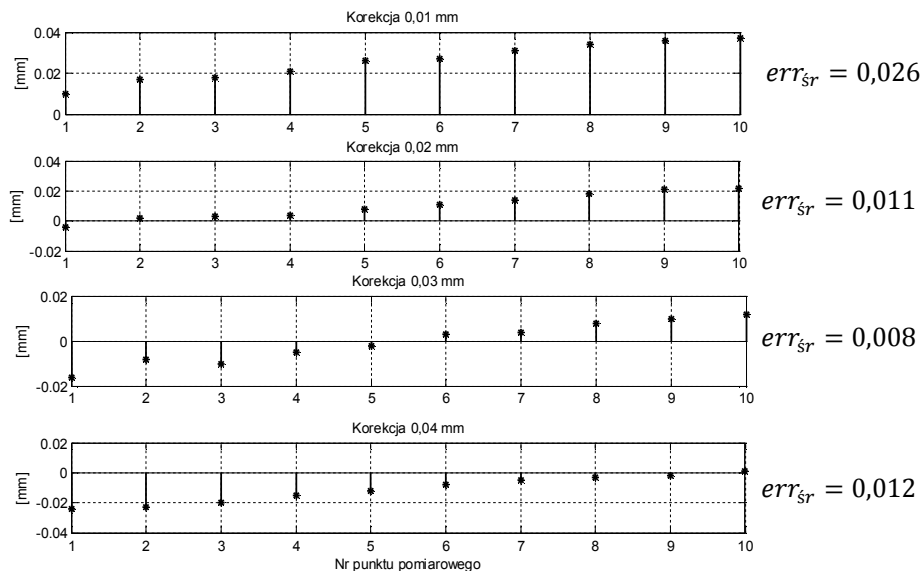
Rys. 4. Błąd wymiarów kontrolnych po obróbce bez korekcji  
( $err_{sr} = 0,03$ )

W następnej fazie zebrano wyniki pomiarów po obróbce testowej z zastosowaniem jednakowej korekcji dla całego analizowanego odcinka toru narzędzia w czterech wariantach korekcji: 0,01 mm, 0,02 mm, 0,03 mm i 0,04mm. Wyniki w formie graficznej ilustracji otrzymanych błędów przedstawia rys.5. Jako miarę jakości efektów wprowadzonych korekcji obliczono średni błąd dla 10 punktów kontrolnych z wzoru:

$$err_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^j |e_i|}{j} \quad (1)$$

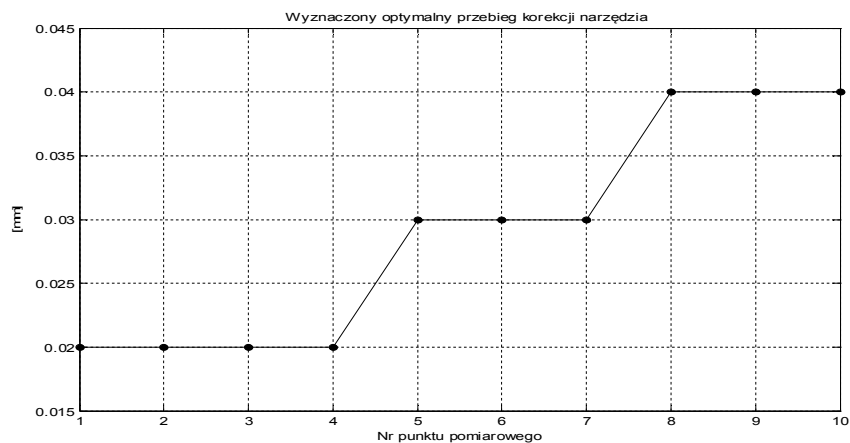
gdzie:  $e_i$  – błąd zmierzony w  $i$ -tym punkcie;  
 $j$  – liczba punktów pomiarowych.

Wartości tego wskaźnika zapisano na rys. 5. przy kolejnych wykresach błędów otrzymanych po kolejnych korekcjach. Widać, że dopiero dla korekcji o wartości 0,03 mm błąd średni osiągnął wartość 0,008, jednak w skrajnych punktach przekracza wartość dopuszczalną. W wyniku korekcji nastąpiła zmiana znaku błędu.



Rys. 5. Rezultaty wprowadzania korekcji jednakowej dla wszystkich punktów pomiarowych

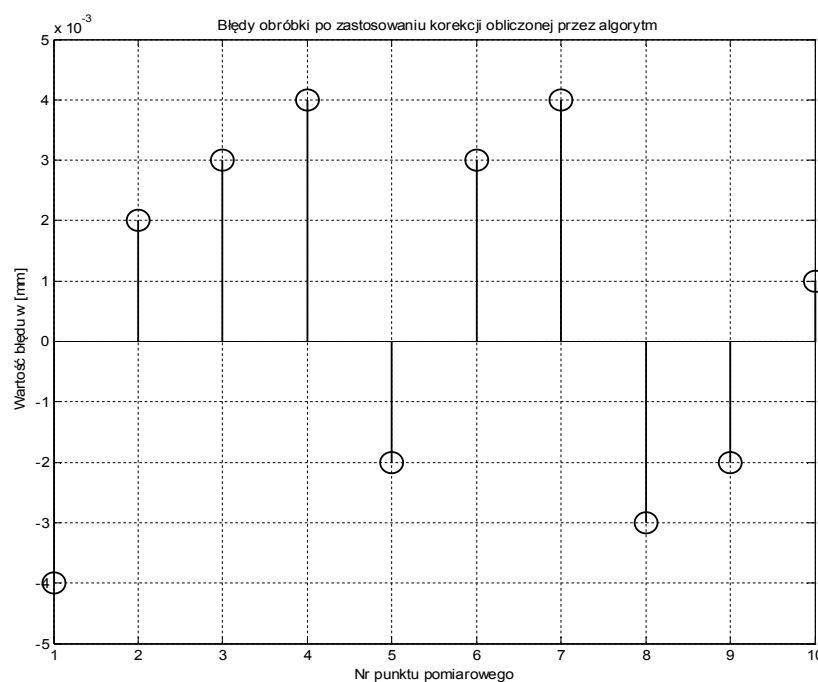
Zebrany materiał doświadczalny w postaci tablicy błędów  $Er(i,n)$ , gdzie  $i$  jest numerem punktu a  $n$  numerem kolejnego kroku korekcji poddano operacji wyznaczenia optymalnej strategii korekcji dla analizowanego przykładu. W wyniku zastosowania algorytmu z rys.2. otrzymano wektor  $W\_Kor(i)$  zawierający proponowane wartości korekcji będące wielokrotnością elementarnego kroku posuwu 0,01 mm. Wartości tych korekcji przedstawia rys. 6.



Rys.6. Wartości optymalnej korekcji



Zaproponowaną strategię korekcji wprowadzono do programu sterującego obrabiarką. Wyniki pomiaru po obróbce przedstawiono na rys. 7. Obliczony wskaźnik jakości korekcji wyniósł w tym przypadku  $err_{sr} = 0,003$  mm. Jednocześnie widoczny jest, w miarę symetryczny rozkład błędów wokół wartości zerowej.



Rys.7. Ilustracja błędów obróbki wykonanej skorygowanym programem wyznaczonym przy pomocy opisanego algorytmu. Średni błąd dla 10 punktów pomiarowych wynosi  $err_{sr} = 0,003$  mm

## 5. Wnioski

Zastosowanie strategii kompensacji błędów w procesie uruchamiania obróbki seryjnej pozwala na poprawę dokładności i stabilności uzyskanych wymiarów obrabianych części. W obróbce frezarskiej przedmiotów o skomplikowanych kształtach i różnej często małej sztywności wprowadzenie korekcji jednakowej dla wszystkich punktów toru narzędzia jest rozwiązaniem prostym, możliwym do realizacji nawet bezpośrednio z pulpitu systemu sterowania obrabiarką. Jednakże, nie jest to rozwiązanie dające optymalne rezultaty. Jak pokazano na przykładzie zilustrowanym na rys. 5. Błędy spowodowane niejednakowymi warunkami kształtowania powierzchni w różnych punktach toru narzędzia pozostały. Wskaźnik średniego błęd osiągnął minimum dla symetrycznego rozkładu błęd wokół wartości zerowej, aby jednak, po dalszym zwiększeniu korekcji rosnąć.

Zaproponowane rozwiązanie polega na zróżnicowaniu wartości korekcji w poszczególnych punktach toru narzędzia i dobraniu jej tak, aby w efekcie obróbki otrzymać minimalny błąd. Realizację takiej strategii zapewnia opisany algorytm. Zastosowanie wektora korekcji  $W_{Kor}$  wskazane przez algorytm optymalizacyjny

wymaga dokonania korekt w programie sterującym obróbką. operacja ta może być, dla prostych przypadków, dokonana ręcznie, lub dla skomplikowanych części o dużej liczbie punktów kontrolnych przy pomocy programu korygującego.

Nie bez znaczenia jest możliwość zwiększenia wydajności obróbki przez zastosowanie wyższych parametrów skrawania w stosunku do tych jakie należałoby stosować w systemie bez korekcji lub z korekcją jednakową dla wszystkich punktów toru narzędzia.

Znacznym usprawnieniem procesu budowy tablicy błędów  $Er$  i drogą do automatyzacji procesu doboru korekcji będzie zastosowanie laserowego systemu pomiarowego bezpośrednio na obrabiarce w fazie uruchamiania produkcji. Przyspieszy to tę fazę oraz umożliwi samoczynne dostrojenie programu sterującego obrabiarką bez udziału technologa.

### Literatura

1. Alberti M., Ciurana J., Casadesus M.: *A system for optimising cutting parameters when planning milling operations in high-speed machining*, Journal of Materials Processing Technology, 168 1 (2005), pp. 25–35.
2. Bera T.C., Desai K.A., Rao P.V.M.: *Error compensation in flexible end milling of tubular geometries*, Journal of Materials Processing Technology, 211 (2011), pp. 24–34.
3. Ee Meng Lim, His-Yung Feng, Chia-Hsiang Menq, Zhi-Hang Lin: *The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball-end milling process*, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35. No. 8, Elsevier Science 1995. pp.1149-1169.
4. M.Kulisz, J.Lipski: *Correction of the cutting tool path for milling operations with circular interpolation*, red. Świć A., Bojanowska A., [W:] Informatics method as tools to solve industrial problems, Lublin 2012, pp.41-50.
5. Raksiri Ch., Parnichkun M.: *Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44 (2004), pp. 1283–1291.

Dr hab. inż. Jerzy Lipski, prof. P.L.  
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa  
Politechnika Lubelska  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38  
tel./fax: (81) 53 84 480  
e-mail: j.lipski@pollub.pl