

Praktyczne aspekty doboru modelu numerycznej kompensacji błędów geometrycznych obrabiarek

Selection of numerical compensation model of geometric errors of machine tools

PAWEŁ MAJDA
JOANNA JASTRZĘBSKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.175>

Po wielu latach intensywnej pracy międzynarodowi eksperci z ISO TC 39 opublikowali raport techniczny ISO TR 16907 "Machine tools – numerical compensation of geometric errors". Dokument ten definiuje terminologię oraz przedstawia korzyści i ograniczenia dotyczące numerycznej kompensacji błędów obrabiarek i maszyn pomiarowych. Producenci i użytkownicy maszyn uzyskali więc ważne informacje na temat zastosowania kompensacji numerycznej. W kontekście zdefiniowanych w ISO TR 16907 typów kompensacji w tym artykule przedstawiono zasady doboru modeli błędów przestrzennego pozycjonowania dla trójosiowych obrabiarek skrawających. Omówiono też zasady redukcji tych modeli ze względu na zadania funkcjonalne stawiane obrabiarkom. Zaprezentowano tablicę modeli zredukowanych dla trójosiowych obrabiarek. Determinuje ona stopień szczegółowości modelu i programu badań doświadczalnych, jakie należy przeprowadzić w celu wyznaczenia przestrzennego rozkładu błędu pozycjonowania. **SŁOWA KLUCZOWE:** numeryczna kompensacja, błąd przestrzennego pozycjonowania

After many years of intensive work, experts from ISO TC 39 have published the technical report ISO TR 16907 "Machine tools – numerical compensation of geometric errors". This document defines the terminology, presents advantages and limitations of numerical compensation of machine tool and measuring machine. This gives machine manufacturers and users important information on the application of numerical compensation. In the context of the compensation types defined in ISO TR 16907, presented principles of selecting volumetric error models for three-axis machine tools. The principles of reducing these models due to the functional tasks of machine tools were also presented. The final result is a table of reduced models for three-axis machine tools. It determines the degree of the model and the experimental test program, which should be done to determine volumetric error.

KEYWORDS: numerical compensation, volumetric error

Numeryczna kompensacja błędów geometrycznych maszyn (obrabiarek i współrzędnościowych maszyn pomiarowych) jest obecnie standardową procedurą stosowaną przez producentów. Bazuje ona na zasadzie niezależnego przeprowadzenia pomiarów błędów i wprowadzenia ich – jako poprawek – do układu sterowania numerycznego (CNC) maszyny. W ten sposób uzyskuje się poprawę (*tuning*) dokładności pozycjonowania elementów wykonawczych maszyny, a zwłaszcza tzw. punktu centralnego narzędzia – TCP (*tool centre point*) względem przedmiotu obrabianego (N–PO).

* Dr hab. inż. Paweł Majda (pawel.majda@zut.edu.pl), mgr inż. Joanna Jastrzębska (joanna.jastrzebska@zut.edu.pl) – Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Raport ISO TR 16907 [4] określa łącznie 15 kategorii numerycznej kompensacji w zależności od stopnia złożoności i rodzaju kompensowanych błędów. Najbardziej zaawansowane uwzględniają oddziaływanie wszystkich błędów translacyjnych i rotacyjnych osi liniowych i/lub obrotowych oraz możliwość kompensacji orientacji narzędzia w całej przestrzeni roboczej maszyny. W polskiej literaturze przedmiotu mówi się wówczas o: kompensacji wolumetrycznej, kompensacji objętościowej, wyznaczeniu mapy błędów 3D, rozkładzie wektorowego pola błędu przestrzennego pozycjonowania, błędzie i/lub modelu *VE* (*volumetric error*) itp.

W artykule skoncentrowano się na modelu dla L-VOL (*volumetric compensation of linear axes*) – według oznaczenia [4] – trójosiowych obrabiarek. Ten rodzaj kompensacji umożliwia skompensowanie błędów: pozycjonowania, prostoliniowości, kątowych i wzajemnej prostopadłości translacyjnych osi sterowanych numerycznie. W takim ujęciu obrabiarka z indeksowanym położeniem głowicy narzędziowej również jest klasyfikowana jako trójosiowa. Rozważania analityczne przeprowadzono dla całej populacji struktur geometryczno-ruchowych obrabiarek trójosiowych o szeregowej strukturze kinematycznej.

Producenci układów sterowania CNC obrabiarek – np. Fanuc, Heidenhain, Siemens i in. – proponują różne opcje kompensacji błędów obrabiarki zgodnie z ISO TR 16907 [4]. Celem artykułu jest dostarczenie informacji na temat doboru odpowiedniej metody i/lub modelu błędu *VE* dla trójosiowej obrabiarki, z uwzględnieniem jej cech funkcjonalnych. Osiągnięcie tak sformułowanego celu pozwoli na: racjonalne wspomaganie doboru środków pomiarowych, określenie zakresu niezbędnych do wykonania pomiarów oraz zakup od producenta sterowania adekwatnej do potrzeb opcji kompensacji błędów obrabiarki.

Wybór układu odniesienia dla modelu numerycznej kompensacji błędów geometrycznych obrabiarek trójosiowych

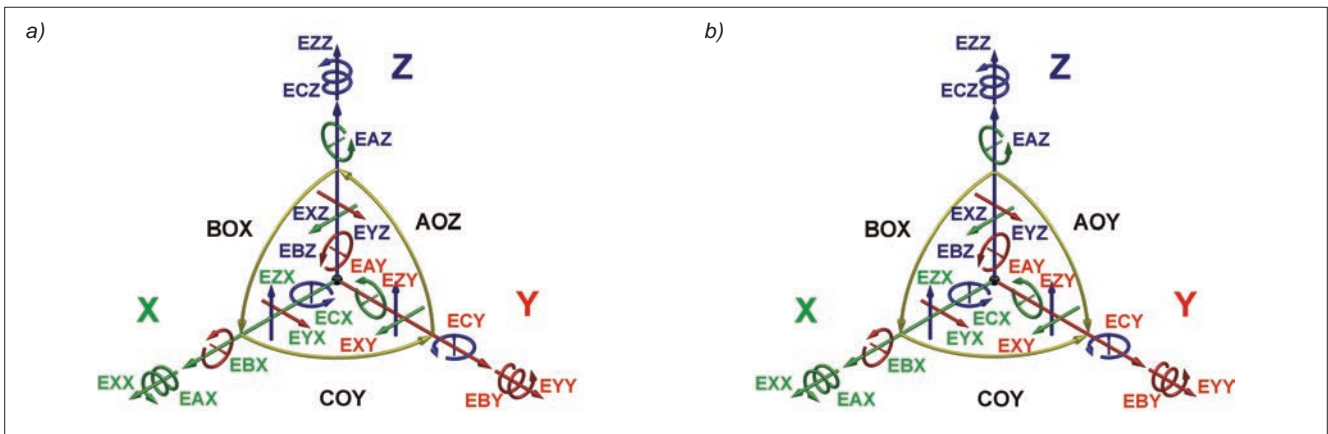
Sam model *VE* buduje się przy założeniu kinematyki ruchu bryły doskonale sztywnej. Modelowanie ruchu bryły układu nośnego obrabiarki (UNO) z uwzględnieniem błędów geometrycznych najczęściej przeprowadza się z użyciem jednorodnych przekształceń macierzowych [5–7]. Na wstępie kluczowe jest określenie układu odniesienia, w którym będzie modelowany rozkład błędu *VE*. Zgodnie z normą [3] układ współrzędnych obrabiarki jest prawostronnym układem prostokątnym. Klasycznie poszczególnym elementom UNO przypisuje się oznaczenia osi układu odniesienia w kierunkach, w których przemierzają się one prostoliniowo (*X*, *Y*, *Z*) lub obrotowo

(wokół kolejnych osi A, B, C). Położenie i orientację układu współrzędnych obrabiarki definiuje się z użyciem linii odniesienia osi ruchu translacyjnych połączeń prowadnicowych. Polega to na wybraniu głównej (*primary*) osi ruchu, tak by linia odniesienia była wyrównana z jedną osią układu współrzędnych obrabiarki – w ten sposób określa się dwa parametry orientacji i płaszczyznę ortogonalną. Następnie wybiera się oś drugorzędą (*secondary*) – w taki sposób, że jej linia odniesienia jest równoległa do kolejnej osi ruchu – i definiuje się trzeci parametr orientacji, wynikający z rzutu linii odniesienia na poprzednio zdefiniowaną płaszczyznę. Na koniec wybiera się początek układu współrzędnych obrabiarki, definiując trzy parametry pozycji. Wybór osi głównej, osi drugorzędnej i początku układu współrzędnych obrabiarki zależy od jej konstrukcji oraz możliwości korekty mechanicznej i kompensacji mechanicznej i/lub programowej (numerycznej) błędów. Standardowo [1, 2] kierunek i położenie osi Z obrabiarek (frezarek oraz tokarek) pokrywa się z kierunkiem i położeniem osi C, czyli napędu głównego (wrzeciona). Należy zauważyć, że w obrabiarkach trójosiowej nie ma możliwości numerycznego skompensowania wzajemnej równoległości linii odniesienia osi C i Z, a więc prostopadłości osi narzędzia względem osi X i Y. Wystąpienie omawianego błędu jest bardzo niepożądane w kontekście wiercenia głębokich otworów. Przemieszczaniu narzędzia w osi Z będzie towarzyszyło rozbijanie średnicy otworu. W takim ujęciu oś Z należy traktować jako główną

oś układu współrzędnych obrabiarki, ponieważ to względem niej podczas montażu obligatoryjnie bazuje się oś C wrzeciona, aby zminimalizować błędy obrabiarki, których nie można kompensować numerycznie. Z tego samego powodu orientację układu, w którym będzie budowany model VE, także należy bazować względem osi Z. Spełnienie tego kryterium będzie równoznaczne z eliminacją numerycznej kompensacji błędów wzajemnej prostopadłości osi X i Z i/lub osi Y i Z podczas realizacji ruchu w osi Z. Te błędy zostaną skompensowane w trakcie realizacji ruchu w osiach X lub Y i nie wpłyną na pogorszenie dokładności kształtowania głębokich otworów.

Dalsze rozważania wymagają przyjęcia konwencji oznaczania błędów. Przykładowe oznaczenia zgodne z serią norm ISO 230-x przedstawiono na rys. 1.

Należy zauważyć, że przypadek zaprezentowany na rys. 1b zapewni w obróbce otworów prawidłowy dobór układu odniesienia do modelowania błędu VE trójosiowej obrabiarki. Wariant pokazany na rys. 1a można zastosować do kompensacji błędów obrabiarki przy założeniu, że narzędzie nigdy nie będzie użyte do wiercenia otworów (np. w obróbce specjalizowanej). Dla typowych obrabiarek nie miałyby to jednak praktycznego uzasadnienia. Konsekwencją przyjęcia w modelu VE osi bazowej, względem której określa się orientację pozostałych osi, jest odpowiednie zapisanie błędów prostopadłości w macierzach jednorodnych przekształceń modelu VE. Te macierze dla przypadków przedstawionych na rys. 1 podano w tabl. 1.



Rys. 1. Przykładowe oznaczenia błędów kinematycznych osi translacyjnych obrabiarek według ISO 230, z uwzględnieniem prostopadłości wzajemnej osi: a) Z do Y, b) Y do Z. Oznaczenia: X, Y, Z – osie układu odniesienia modelu VE; EXX, EYY, EZZ – błąd pozycjonowania; EYX, EXY, EYZ – błąd prostoliniowości w płaszczyźnie pionowej; EZX, EZY, EYZ – błąd prostoliniowości w płaszczyźnie pionowej; EAX, EBY, ECZ – becinka, błąd rotacji (roll); EBX, EAY, EAZ – skok, błąd rotacji (pitch); ECX, ECY, EBZ – schodzenie z kursu, błąd rotacji (yaw); COY – prostopadłość osi Y do X; AOZ – prostopadłość osi Z do Y; AOY – prostopadłość osi Y do Z; BOX – prostopadłość osi X do Z. Błędy prostopadłości osi to skalary, a pozostałe są funkcjami aktualnie rozpatrywanej pozycji wzdłuż osi

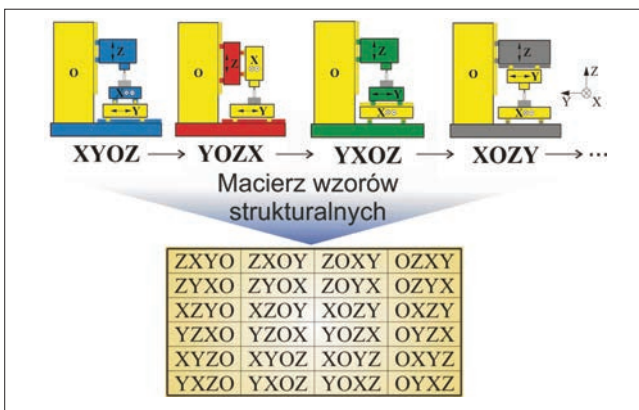
TABLICA I. Macierze jednorodnych przekształceń modeli błędów geometrycznych osi X, Y i Z

Macierze dla błędów prostopadłości wg rys. 1a	Macierze dla błędów prostopadłości wg rys. 1b
$E_x = \begin{bmatrix} 1 & -ECX & EBX & EXX \\ ECX & 1 & -EAX & EYX \\ -EBX & EAX & 1 & EZX - BOX \cdot x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_x = \begin{bmatrix} 1 & -ECX & EBX & EXX \\ ECX & 1 & -EAX & EYX \\ -EBX & EAX & 1 & EZX - BOX \cdot x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$E_y = \begin{bmatrix} 1 & -ECY & EBY & EXY - COY \cdot y \\ ECY & 1 & -EAY & EYY \\ -EBY & EAY & 1 & EYZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_y = \begin{bmatrix} 1 & -ECY & EBY & EXY - COY \cdot y \\ ECY & 1 & -EAY & EYY \\ -EBY & EAY & 1 & EYZ - AOY \cdot y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$E_z = \begin{bmatrix} 1 & -ECZ & EBZ & EXZ \\ ECZ & 1 & -EAZ & EYZ - AOZ \cdot z \\ -EBZ & EAZ & 1 & EZZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$E_z = \begin{bmatrix} 1 & -ECZ & EBZ & EXZ \\ ECZ & 1 & -EAZ & EYZ \\ -EBZ & EAZ & 1 & EZZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

x, y, z – aktualna pozycja rozpatrywanej osi w układzie współrzędnych maszyny

Struktury geometryczno-ruchowe maszyn o kinematyce szeregowej

Kinematyka procesu roboczego obrabiarek jest rezultatem wzajemnych ruchów elementów korpusowych UNO. Te ruchy są kierowane przez połączenia prowadnicowe. Układ tych połączeń – nazywany układem prowadnicowym – stanowi realizację tzw. struktur geometryczno-ruchowych (SG-R). Ma to odzwierciedlenie w zaproponowanej przez Wragowa [9] konwencji zapisu struktury, zgodnie z którą w tzw. wzorze strukturalnym umieszcza się jednoznacznie informację o możliwości realizacji ruchów elementów UNO. Gdy zastosuje się klasyczną konwencję oznaczeń osi translacyjnych X, Y, Z oraz kolejnych osi obrotowych A, B, C, a nieruchomy korpus stacjonarny (stojak, łożo, podstawę) oznaczy się symbolem O, wtedy wzór strukturalny konstruuje się w postaci: [przedmiot obrabiany – w (workpiece)] → symbole osi układu współrzędnych odpowiadające kierunkom przemieszczeń kolejnych elementów UNO wraz z oznaczeniem korpusu stacjonarnego → [narzędzie – t (tool)]. Przez przestawianie (permutacje bez powtórzeń) oznaczeń osi (X, Y, Z) z korpusem stacjonarnym (O) dla trójosiowej obrabiarki uzyskuje się łącznie 24 (4!) wzory strukturalne SG-R, czyli 24 warianty układu korpusowego (rys. 2). W Polsce badania SG-R ze względu na różne kryteria projektowania maszyn prowadził zespół G. Szwegiera.



Rys. 2. Wzory SG-R trójosiowej obrabiarki

Dla jednej SG-R trójosiowej obrabiarki, ze względu na modelowanie rozkładu VE , należy uwzględnić wysięg narzędzia, rozumiany zgodnie z pojęciami stosowanymi w technologii obróbki skrawaniem. Wysięg może być

zdefiniowany np. względem punktu oprawki narzędziowej, choć w ogólnym przypadku nie musi tak być. Możliwe przypadki przedstawiono na rys. 3 – wariant z indeksowaną głowicą uchylno-obrotową traktuje się jako przypadek ogólny obrabiarki trójosiowej. Dalej pokazano, że w zależności od wariantu wysięgu narzędzia model VE podlega odpowiednim uproszczeniom.

Uproszczenia modelu błędu przestrzennego pozycjonowania maszyn

Po wykonaniu działań matematycznych w konwencji modelowania ruchu bryły sztywnej z użyciem jednorodnych przekształceń macierzowych uzyskuje się wzory na składowe błędy VE , rzutowane odpowiednio na osie X, Y i Z. W obliczeniach pomija się – jako nieistotne – składowe błędów w drugiej i wyższej potęgce. Przykładowo dla SG-R z indeksowanym położeniem wrzeciona, tj. dla struktury wOXYZCA(C)t, czyli dla modelu FRB (patrz rys. 3), w układzie odniesienia zgodnym z rys. 1b wzory te wyglądają następująco:

$$VE_x = EXX + EXY + EXZ + T_z \cdot (EBX + EBY + EBZ) - T_y \cdot (ECX - ECY - ECZ) - ECX \cdot y + EBX \cdot z + EBY \cdot z - COY \cdot y \quad (1)$$

$$VE_y = EYX + EYY + EYZ - T_z \cdot (EAX - EAY - EAZ) + T_x \cdot (ECX + ECY + ECZ) - EAX \cdot z - EAY \cdot z \quad (2)$$

$$VE_z = EZX + EZY + EZZ + T_y \cdot (EAX + EAY + EAZ) - T_x \cdot (EBX - EBY - EBZ) + EAX \cdot y - BOX \cdot x - AOY \cdot y \quad (3)$$

Dla modelu RRB-I, czyli dla $T_x = 0$ oraz $T_y = 0$, wzory upraszczają się do postaci:

$$VE_x = EXX + EXY + EXZ + T_z \cdot (EBX + EBY + EBZ) - ECX \cdot y + EBX \cdot z + EBY \cdot z - COY \cdot y \quad (4)$$

$$VE_y = EYX + EYY + EYZ - T_z \cdot (EAX - EAY - EAZ) - EAX \cdot z - EAY \cdot z \quad (5)$$

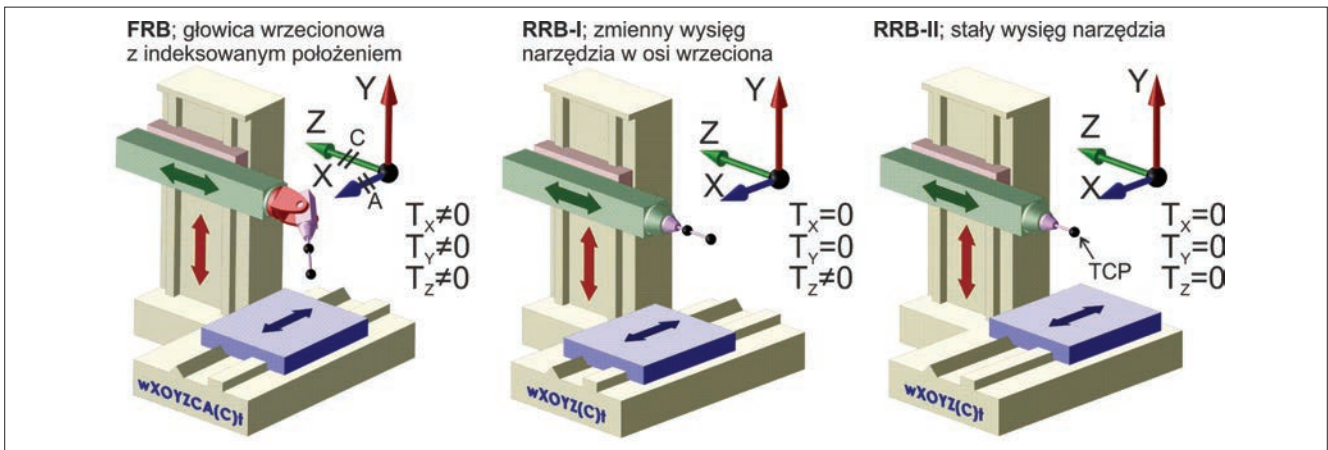
$$VE_z = EZX + EZY + EZZ + EAX \cdot y - BOX \cdot x - AOY \cdot y \quad (6)$$

Z kolei dla modelu RRB-II, czyli dla $T_x = 0$, $T_y = 0$ oraz $T_z = 0$, wzory mają postać:

$$VE_x = EXX + EXY + EXZ - ECX \cdot y + EBX \cdot z + EBY \cdot z - COY \cdot y \quad (7)$$

$$VE_y = EYX + EYY + EYZ - EAX \cdot z - EAY \cdot z \quad (8)$$

$$VE_z = EZX + EZY + EZZ + EAX \cdot y - BOX \cdot x - AOY \cdot y \quad (9)$$



Rys. 3. Rodzaje wysięgu narzędzia i odpowiadające im nazwy modeli uproszczonych ruchu bryły sztywnej trójosiowej obrabiarki: FRB (full rigid body), RRB (reduced rigid body). Oznaczenia: T_x , T_y , T_z – wysięg narzędzia na kierunku osi X, Y i Z

