

Szerszámgépek pozicionálási pontosságának meghatározásának kiértékeléséhez használt ISO 230-2 szabvány és VDI/DGQ 3441 ajánlás közötti különbség egy konkrét példán keresztül

The difference between the ISO 230-2 standard and the VDI/DGQ 3441 guideline used for evaluating the determination of positioning accuracy of machine tools, illustrated through a specific example

BUDIMIR Alexander Buda¹, PhD

¹Department of Manufacturing Science and Engineering
Faculty of Mechanical Engineering, Budapest University of Technology and Economics
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3
budimir.alexander.buda@gpk.bme.hu ORCID: 0009-0003-2351-1938

Abstract

The positioning accuracy of machine tools plays a decisive role in ensuring the quality, repeatability, and economic efficiency of modern high-precision machining processes. Consequently, the reliable, reproducible, and standardized determination of positioning accuracy is a fundamental requirement for both machine tool manufacturers and users. The execution and evaluation of laser interferometric measurement methods, which are widely applied for the investigation of positioning accuracy, are governed by various international standards and professional guidelines, among which the ISO 230-2 standard and the German VDI/DGQ 3441 guideline are of particular importance. Although both documents share the same fundamental objective, significant differences can be observed in the details of the measurement procedures, the methodology of statistical evaluation, as well as in the interpretation and presentation of the results. As a consequence of these differences, different accuracy characteristics may be obtained for the same machine tool, which can have a substantial impact on its qualification, comparability, and assessment of industrial applicability. The aim of the present study is to present and analyze in detail the methodological and interpretative differences between the ISO 230-2 standard and the VDI/DGQ 3441 guideline based on laser interferometric measurements carried out on a specific CNC milling machine.

Keywords: Machine tool, ISO 230-2, VDI/ DGQ 3441, Laser interferometer, Positioning accuracy

Kivonat

A szerszámgépek pozicionálási pontossága meghatározó szerepet tölt be a korszerű, nagy pontosságú forgácsolási folyamatok minőségének, ismételtetésének és gazdaságosságának biztosításában. Ennek következtében a pozicionálási pontosság megbízható, reprodukálható és szabványosított meghatározása alapvető követelmény mind a szerszámgépgyártók, mind a felhasználók részéről. A pozicionálási pontosság vizsgálatára széles körben alkalmazott lézerinterferométeres mérési módszerek végrehajtását és kiértékelését különböző nemzetközi szabványok és szakmai ajánlások szabályozzák, amelyek közül kiemelkedő jelentőséggel bír az ISO 230-2 szabvány, valamint a német VDI/DGQ 3441 ajánlás. Bár mindkét dokumentum azonos alapcélkitűzéssel, a szerszámgépek tengelyirányú pozicionálási pontosságának meghatározására szolgál, a mérési eljárások részleteiben, a statisztikai kiértékelés módszertanában, továbbá az eredmények értelmezésében és megadásában lényeges eltérések mutatkoznak. Ezen eltérések következtében ugyanazon szerszámgép esetében eltérő pontossági jellemzők adódhatnak, ami jelentős hatással lehet a gép minősítésére, összehasonlíthatóságára és ipari alkalmazhatóságának megítélésére. Jelen tanulmány célja, hogy egy konkrét CNC marógépen végrehajtott lézerinterferométeres mérések alapján részletesen bemutassa és elemezze az ISO 230-2 szabvány és a VDI/DGQ 3441 ajánlás közötti módszertani és értelmezési különbségeket.

Kulcsszavak: Szerszámgép, ISO 230-2, VDI/DGQ 3441, Lézer interferométer, Pozicionálási pontosság

1. BEVEZETÉS

A szerszámgépek pontossága alapvetően meghatározza azt a képességüket, hogy méret- és geometriahű alkatrészeket állítsanak elő. A korszerű CNC szerszámgépeknek hosszú időn keresztül nagy pontossággal kell pozícionálniuk és orientálniuk a szerszám csúcspontját, mindezt a geometriai, termikus, dinamikai és szabályozási zavaró hatások ellenére [1–3]. Annak érdekében, hogy a pontosság mérhetővé, összehasonlíthatóvá és tanúsíthatóvá váljon, nemzetközi és nemzeti szervezetek szabványosított vizsgálati előírásokat és statisztikai leírásokat dolgoztak ki, amelyek közül a pozícionálási teljesítmény értékelésére legszélesebb körben az ISO 230 szabványsorozat és a VDI/DGQ 3441 ajánlás terjedt el [4,5].

Az ISO 230 egy több részből álló nemzetközi szabvány, amely egységes keretrendszert biztosít a szerszámgépek pontosságának leírására és vizsgálatára. Az ISO 230-1 a geometriai hibákat és a volumetrikus pontosság fogalmát definiálja, amely a szerszám és a munkadarab tényleges és ideális relatív helyzete és orientációja közötti maximális eltérést jelenti egy meghatározott munkatérben [2,3]. Az ISO 230-2 a numerikusan vezérelt tengelyek lineáris és forgó pozícionálási pontosságának és ismételhetőségének vizsgálati eljárásait írja le, az egyes tengelyek mentén végzett mérések alapján, olyan eszközök alkalmazásával, mint a lézertinterferométerek, lépcsős etalonok vagy lineáris mérőskálák [4–6]. A szabvány előírja az inkrementális mozgásvizsgálatokat mindkét irányban, a környezeti hatások kompenzálását, valamint egy szabványosított statisztikai jellemzőkészlet alkalmazását, beleértve a szisztematikus pozícionálási hibát, a visszafordulási (holtjáték-) hibát, valamint az egyirányú és kétirányú ismételhetőséget [4]. Ezek a paraméterek képezik a tengelyek pozícionálási pontosságának alapvető numerikus leírását, amelyet a gépek átvételi vizsgálata, időszakos ellenőrzése és hibakompensációja során alkalmaznak [4,6].

A német VDI/DGQ 3441 ajánlás időben megelőzi az ISO 230-2 szabványt, és jelentős hatással volt annak felépítésére. Ez az ajánlás szintén statisztikai alapon írja le a pozícionálási pontosságot, ismételt kétirányú mozgások alkalmazásával diszkrét célpozíciókba, valamint az átlagos pozícionálási eltérés, az ismételhetőség és a tengely szórásai sávjainak kiértékelésével [4,5,7]. Az ipari gyakorlatban a VDI/DGQ 3441 és az ISO 230-2 gyakran együttesen kerül alkalmazásra: az ISO 230-2/VDI 3441 szerinti, lézeralapú „pozícionálási hibaterképezés” módszert a lineáris tengelyhibák jellemzésére és kompenzálására használják, míg az ISO 230 további részei (például az ISO 230-4 a körinterpoláció vizsgálatára) a pontosság leírását az egytengelyű viselkedésről összetettebb pályákra terjesztik ki [1,4,5].

Mindkét keretrendszer következetes nyelvezetet és módszertant biztosít a szerszámgépek pontosságának leírásához: az ISO 230 mint globálisan elfogadott, átfogó vizsgálati szabvány, valamint a VDI/DGQ 3441 mint statisztikai szemléletű ajánlás, amely számos európai gyakorlati kalibrálási és kompenzációs stratégia alapját képezi [4,5,7]. Együttes alkalmazásuk lehetővé teszi a gépek kvantitatív összehasonlítását, a nyomon követhető kalibrációt, valamint a pozícionálási teljesítmény szisztematikus fejlesztését.

2. A MÉRÉS ELMÉLETI ALAPJA

Az ISO 230-2 szabvány és a VDI/DGQ 3441 ajánlás által meghatározott vizsgálati feltételek rögzítik a környezeti feltételeket, a gép üzemi állapotát, valamint a mérési eljárást. A felhasználónak biztosítani kell, hogy a szerszámgépek teljesítményvizsgálatához az üzembe helyezés helyszínén megfelelő hőmérsékleti környezet álljon rendelkezésre. Laboratóriumi körülmények között a méréseket akkor kell elvégezni, amikor a vizsgált objektum hőmérséklete 20 °C. Amennyiben a megkívánt környezeti hőmérséklet nem tartható fenn, a mérési eredményeket hőtágulási korrekciós tényező alkalmazásával kell javítani, figyelembe véve a pozícionáló rendszer tengelyei (vagy a munkadarab/szerszám tartó) és a mérőberendezés közötti hőmérséklet-különbségeket, és az eredményeket 20 °C referenciahőmérsékletre kell vonatkoztatni. A mérések elvégezhetőek olyan mérőérzékelő alkalmazásával, amelynél az egyes mért értékekre egyenként történik meg a korrekció, vagy a környezeti feltételek folyamatos nyomon követésével és a mérési eredmények matematikai korrekciójával az adatok kiértékelése során. A gépet – és adott esetben a kísérleti berendezéseket – a mérés megkezdése előtt elegendő ideig a vizsgálati környezetben kell elhelyezni annak érdekében, hogy termikus egyensúlyi állapotba kerüljenek. Gondoskodni kell arról, hogy védve legyenek a huzattól és az olyan külső hatásoktól, mint a közvetlen napsugárzás, radiátorok, légfűtők és hasonló hőforrások. A vizsgálatok során a gépnek teljes felszereltségű és üzemképes állapotban kell lennie. Amennyiben szüntetésre és a geometriai pontosság ellenőrzésére van szükség, ezeket az eljárásokat a pozícionálási pontosság vizsgálata előtt maradéktalanul el kell végezni. Ha integrált kompenzációs algoritmusok alkalmazásra kerülnek, ezt a vizsgálati jegyzőkönyvben egyértelműen fel kell tüntetni. Valamennyi vizsgálatot terhelésmentes állapotban, azaz felszerelt munkadarab nélkül kell végrehajtani. A szerszámgépek üzemszerű körülmények közötti

vizsgálatát a gyártó vagy szállító által előírt, illetve a felhasználó és a gyártó vagy szállító között egyeztetett megfelelő bemelegítési fázisnak kell megelőznie [8,9].

1.1. ISO 230-2

Az egyes numerikusan vezérelt tengelyek pozicionálási pontosságának vizsgálata – legfeljebb 2000 mm hosszúságig (adott esetben rövidebb, akár 100 mm-es tengelyekre is alkalmazva) – minden tengely esetében a rendelkezésre álló maximális elmozdulási tartományon történik, m darab mérési pozícióban. A mérési pozíciókat úgy kell megválasztani, hogy a közöttük lévő távolságok egyenlőtlenül és szándékosan elosztva helyezkedjenek el, megfelelően az i indexszel jelölt m kiválasztott mintapontnak. Az egyes mérési pozíciókban a szerszámgép mozgó eleme (szán) ismételtlen megközelíti az adott pozíciót mindkét mozgásirányból. Ennek eredményeként a meghatározott mérési pozíciókban n darab egyedi mérési érték keletkezik, amelyeket a j index jelöl.

Az ISO 230-2 [8] a szerszámgépek pozicionálási pontosságának leírására az alábbi fogalmakat határozza meg:

Referencia pozíció, P_i – a gép mozgó elemének végleges, programozott helyzete

Tényleges pozíció, P_{ij} – a gép mozgó elemének mért végleges helyzete az i és j referencia pozíciókban

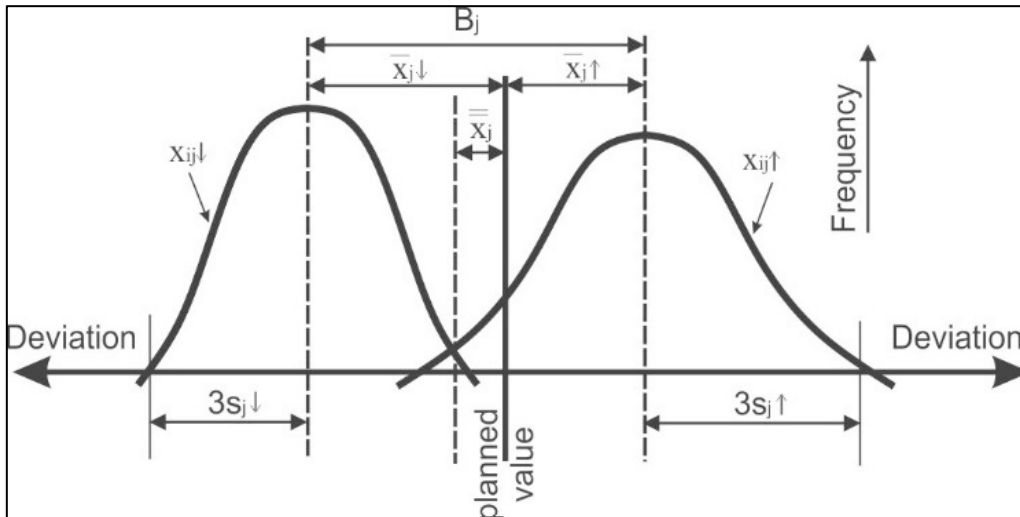
Pozícióeltérés, X_{ij} – a gép mozgó elemének tényleges végleges helyzete és a referencia pozíció különbsége, azaz:

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (1)$$

A kiválasztott mérési pozícióhoz tartozó pozicionálási irányokat az alábbi jelölések adják meg:

- \uparrow – pozitív irány (a pozitív tengelyirányú elmozdulás irányában: +X, +Y, +Z),
- \downarrow – negatív irány (a negatív tengelyirányú elmozdulás irányában: -X, -Y, -Z).

Mivel ezek véletlenszerű hibák, az értékek eloszlása normális eloszlás alakját követi, amelyet az 1. ábra szemléltet.



1. ábra. A mérési eredmények eloszlása egy mérési pontnál „j”

Egy adott pozícióban a pozicionálási hiba egy irányban:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \text{ és } \bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (2)$$

A vizsgált pozíció kétirányú pozicionálási hiba átlaga:

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (3)$$

Az irányonkénti átlagos pozicionálási hibák különbsége adja meg az irányváltási hibát:

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (4)$$

A tengely irányváltási hibája:

$$B = \max[|B_i|] \quad (5)$$

Az átlagos irányváltási hiba értéke:

$$\bar{B} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m B_i \quad (6)$$

A pozicionálási hiba szórása szintén irányfüggő, tehát külön meghatározandók:

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \text{ és } s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (7)$$

Az irányonkénti ismétlési pontosság egy pontban definíció szerint:

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \text{ és } R_i \downarrow = 4s_i \downarrow \quad (8)$$

Kétirányú pozicionálási ismétlőképesség egy pontban:

$$R_i = \max[2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (9)$$

Az irányonkénti pozicionálási ismétlőképesség a tengelyre vonatkoztatva:

$$R \uparrow = \max[R_i \uparrow] \text{ és } R \downarrow = \max[R_i \downarrow] \quad (10)$$

Kétirányú pozicionálási ismétlőképesség a tengelyre vonatkoztatva:

$$R = \max[R_i] \quad (11)$$

A mérések alapján számítható a szisztematikus pozicionálási hiba:

$$E \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow] \text{ és } E \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] \quad (12)$$

A tengelyre vonatkoztatott szisztematikus pozicionálási hiba:

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (13)$$

A tengelyre vonatkozó kétirányú pozicionálási hiba:

$$M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] \quad (14)$$

A tengely egyirányú pozicionálási pontossága definíció szerint:

$$A \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \text{ és } A \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (15)$$

Végül a tengely kétirányú pozicionálási pontossága:

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (16)$$

1.2. VDI/DGQ 3441

Az ISO 230-2 szabvány és a VDI/DGQ 3441 ajánlás közötti hasonlóságokat korábban már elemezték a [10] hivatkozásban. Az ISO 230-2 szabványhoz képest új kifejezések, amiket bevezettek:

A pozicionálási pontosság átlagos szórása egy mérési pontban:

$$\bar{s}_j = \frac{s_j \uparrow + s_j \downarrow}{2} \quad (17)$$

Átlagos ismétlési képesség egy mérési pontban:

$$P_{s_j} = 6\bar{s}_j \quad (18)$$

Az átlagos ismétlési képesség maximuma a tengely mentén:

$$P_{s_{max}} = P_{s_{jmax}} \quad (19)$$

Pozicionálási eltéréstartomány:

$$P = [\bar{x}_i + 1/2(U_j + P_{s_j})]_{max} - [\bar{x}_i - 1/2(U_j + P_{s_j})]_{min} \quad (20)$$

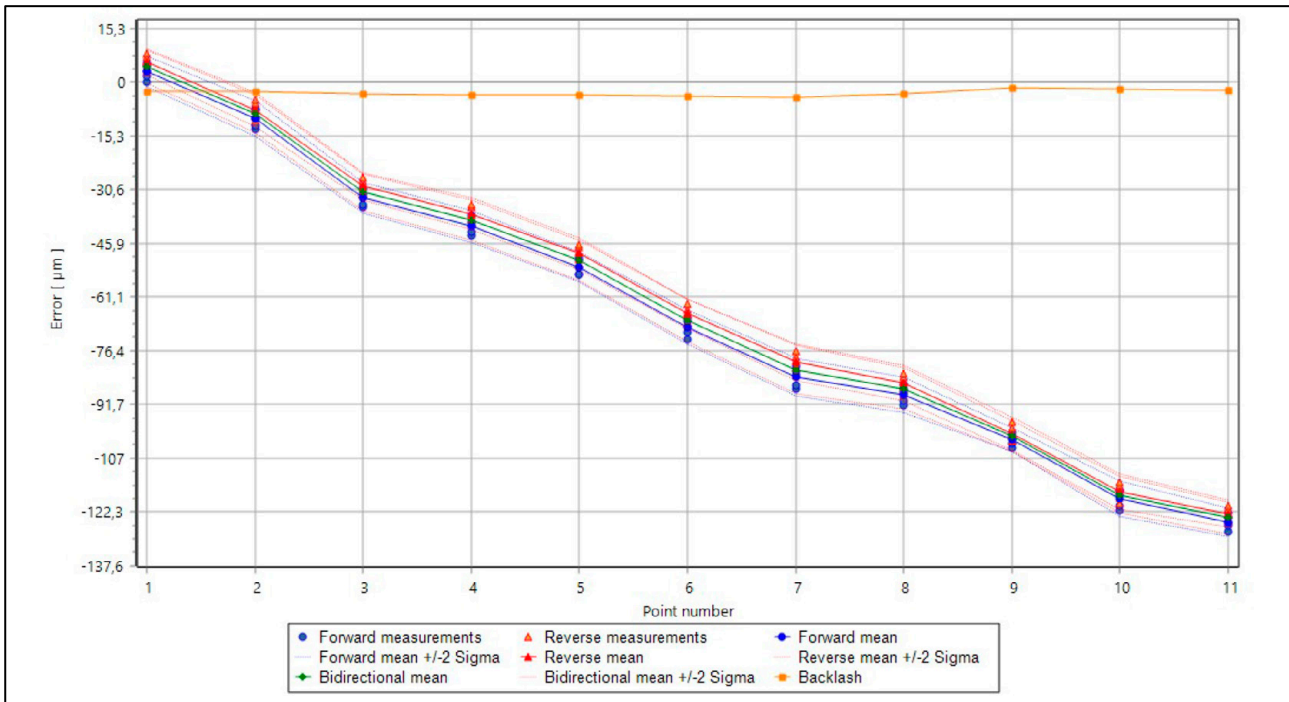
Az irányváltási hibatartomány központi értéke:

$$\bar{U} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_j \quad (21)$$

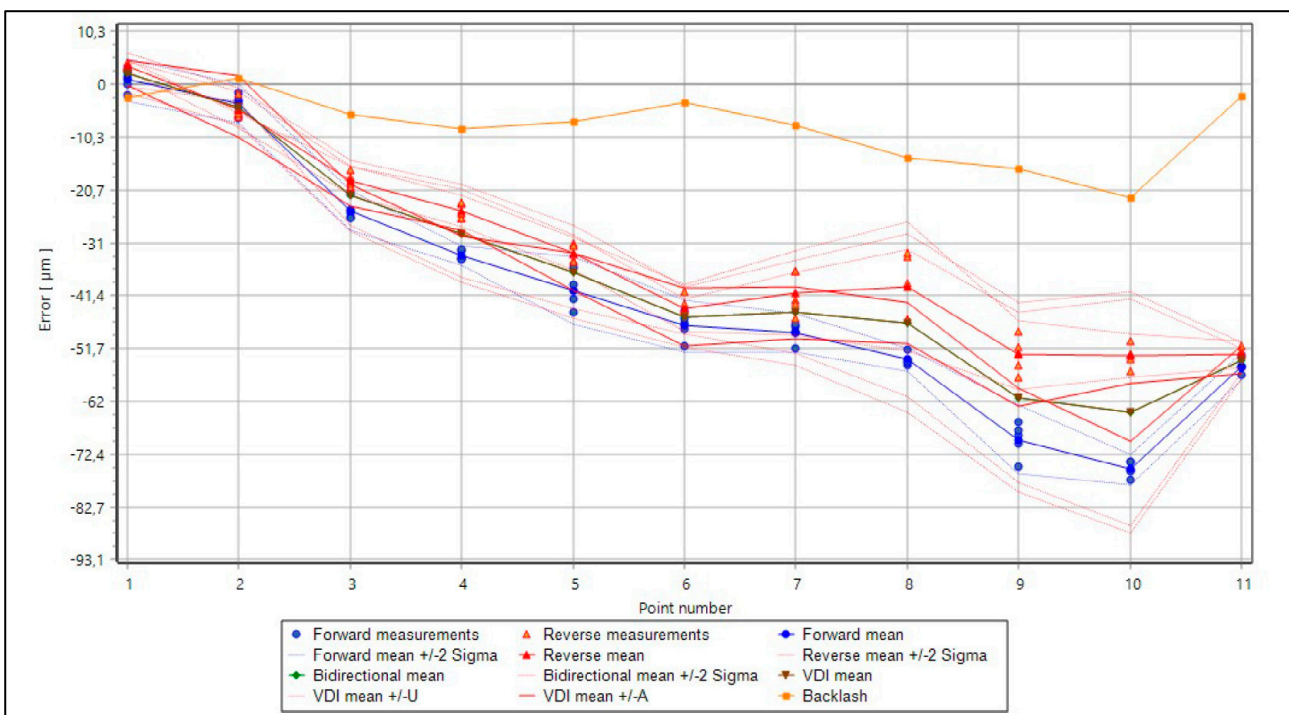
3. AZ ELVÉGZETT MÉRÉSEK

A méréseket egy NCT VHTC-130-as jelű mikro maró szerszámgépen végeztük el az X és az Y tengelyek mentén. A méréseket a teljes lökethossz tartományon egymástól nem megegyező távolságokban lévő pontokban végeztük. Összesen tizenegy ponton vettünk fel pozicionálási értékeket az X tengely és az Y tengely mentén egyaránt. Az adatok kiértékelésében a lézer interferométer gyártója által szolgáltatott szoftvercsomagot használtuk. A méréseket egy *Lasertex HPI-3D* műszerrel végeztük.

A 2. ábrán az Y tengely pozicionálási pontossága látható a mérési pontokban, míg a 3. ábrán az X tengely pozicionálási pontossága látható a mérési pontokban.



2. ábra. Az NCT VHTC-130 szerszámgép Y tengelyének pozicionálási pontossága



3. ábra. Az NCT VHTC-130 szerszámgép X tengelyének pozicionálási pontossága

Az 1. táblázat tartalmazza összesítve a két vizsgált tengely összes pozicionálási pontossággal kapcsolatos meghatározott paramétereit ISO 230-2 és VDI/DGQ 3441 szerint egyaránt.

Az NCT VHTC-130 szerszámgép pontosságát leíró paraméterek

1. táblázat

ISO 230-2			VDI/DGQ 3441		
	X tengely	Y tengely		X tengely	Y tengely
A↑	83,321 μm	136,864 μm	Pontosság ↑	86,877 μm	141,146 μm
A↓	64,177 μm	136,244 μm	Pontosság ↓	68,022 μm	140,033 μm
A	83,321 μm	138,941 μm	P	87,993 μm	143,168 μm
R↑	13,512 μm	10,795 μm	Ismétlőképesség ↑	20,268 μm	16,193 μm
R↓	25,172 μm	10,296 μm	Ismétlőképesség ↓	37,758 μm	15,445 μm
R	30,118 μm	14,935 μm	$P_{s,max}$	22,373 μm	15,819 μm
\bar{B}	-8,188 μm	-3,077 μm	\bar{P}_s	13,165 μm	13,619 μm
B	22,144 μm	4,389 μm	U_{max}	22,144 μm	4,389 μm
E↑	73,211 μm	128,301 μm	$P_s + U$	36,891 μm	20,208 μm
E↓	56,683 μm	128,664 μm	\bar{U}	8,394 μm	3,077 μm
E	78,827 μm	131,062 μm			
M	66,447 μm	128,483 μm	Pa	66,447 μm	128,483 μm

A mérések során a következő környezeti feltételeket vettük figyelembe:

- Relatív páratartalom: 48%
- Légnomás: 742 mmHg
- Környezeti hőmérséklet: 20,5 °C
- Szerszámgép hőmérséklet: 23,8 °C

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Elvégeztük a pozicionálási pontosság meghatározásához szükséges méréseket egy NCT VHTC-130-as jelű mikró marásra alkalmas szerszámgépen. Figyelembe vettük a mérések során a környezeti körülményeket és kompenzáltuk a hőmérséklet, páratartalom és nyomás hatását a mérési rendszerre. A mért adatok alapján meghatároztuk a 2. fejezetben leírtak alapján a pozicionálási pontosságot leíró összes paramétert ISO 230-2 és VDI/DGQ 3441 szerint egyaránt.

A kapott értékek alapján láthatjuk, hogy a lényeges eltérést az ISO szabvány és a német ajánlás között azoknál a paramétereknél tapasztalunk, amelyeknél a meghatározásukhoz figyelembe kell venni az ismétlőképességet. A második fejezetben feltüntetett egyenletekből jól látni, hogy a német ajánlás az ismétlőképességet a szórás hatszorosával számítja, vagyis egy növelt értékkel, míg a nemzetközi szabvány csupán a négyszeresével. Ebből adódóan a két értékelés közül a VDI egy szigorúbb módszertannak nevezhető, mivel az általa értékelt szerszámgépek minősítése pozicionálási pontosság szempontjából alacsonyabb. Ez jól megfigyelhető ennél a gépnél is. Míg az ISO szerint a gép pozicionálási pontossága az X tengely mentén 83,321 μm, addig a VDI szerint 86,877 μm, így a különbséget az érték a két szabvány között 3,556 μm. Az Y tengely esetében ez az eltérési tartomány még nagyobb, pontosan 4,227 μm a tengely magasabb pontatlansága végett.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném köszönetemet nyilvánítani a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Karának, Gyártástudomány és technológia tanszékének, ahol a méréseket elvégezhettem.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Sarvas, M., Holub, M., Marek, T., Prochazka, J., Bradac, F., & Blecha, P. (2024). Influence of Machine Tool Operating Conditions on the Resulting Circularity and Positioning Accuracy. *Machines*. <https://doi.org/10.3390/machines12050352>.
- [2] Gao, W., Ibaraki, S., Donmez, M., Kono, D., Mayer, J., Chen, Y., Szipka, K., Archenti, A., Linares, J., & Suzuki, N. (2023). Machine tool calibration: Measurement, modeling, and compensation of machine tool errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2023.104017>.
- [3] Marek, J., Holub, M., Marek, T., & Blecha, P. (2020). Geometric Accuracy, Volumetric Accuracy and Compensation of CNC Machine Tools. *Machine Tools [Working Title]*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92085>.
- [4] Tabaković, S., Zeljkovic, M., Zivanovic, S., Budimir, A., Dimić, Z., & Kosarac, A. (2024). Calibration of a Hybrid Machine Tool from the Point of View of Positioning Accuracy. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app14125275>.
- [5] Mutilba, U., Gomez-Acedo, E., Kortaberria, G., Olarra, A., & Yagüe-Fabra, J. (2017). Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17. <https://doi.org/10.3390/s17071605>.
- [6] Lee, H., Chen, J., Pan, S., Liou, H., & Hsu, P. (2016). Relationship between ISO 230-2/-6 Test Results and Positioning Accuracy of Machine Tools Using LaserTRACER. *Applied Sciences*, 6, 105. <https://doi.org/10.3390/app6040105>.
- [7] Ravichandran, Jamuna, and Natarajan Uthirapathy. "Measurement of error in computer numerical control machines and optimization using teaching-learning-based optimization algorithm." *Measurement and Control* 52.7-8 (2019): 929-937. <https://doi.org/10.1177/0020294019847699>
- [8] ISO: *ISO 230-2:2014 Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes*, Berlin: Beuth, 2014.
- [9] Produktionstechnik, V.D.I.G.: *VDI/DGQ 3441 ff. Statistische Prüfung der Arbeits- und Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen*. Beuth Berlin, 1977.