

Ujjmaró, hosszlyukmaró dinamikai vizsgálata

Dynamic analysis of a flute endmill

MOLNÁR Lóránd
mesterszakos hallgató

afclorand@yahoo.com

Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki tanszék,

Vezető tanára: Dr. MÁTÉ Márton

Kivonat

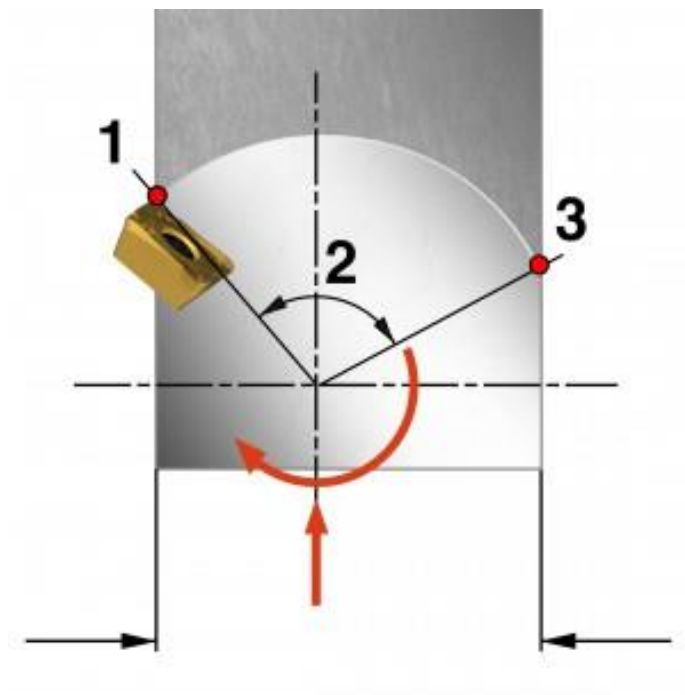
Jelen közlemény a hosszlyukmaró forgácsolási kinematikáját, a forgácsképzés geometriáját, valamint a forgácsolási folyamat alatt ébredő erők hatását, illetve a rezgések kialakulását elemzi. A tárgyalt matematikai modell segítségével következtetni lehet, adott szerszám konstruktív adatainak és forgácsolási paramétereinek ismeretében, a kialakuló rezgések amplitúdójára és körfrekvenciájára.

Kulcsszavak: hosszlyukmaró, forgácsvastagság, forgácsolási paraméterek, forgácsolóerő, rezgések

1. HOSSZLYUKMARÓ: ÉLPONT-PÁLYA ÉS FORGÁCSKÉPZŐDÉS

A forgácsképződés és a marópálya befolyásolják az éltartamot. A marószerszám egyes forgácsoló-élei radiális irányban szakaszosan forgácsolnak. Három különböző fázist veszünk figyelembe egyes fogásvételekben:

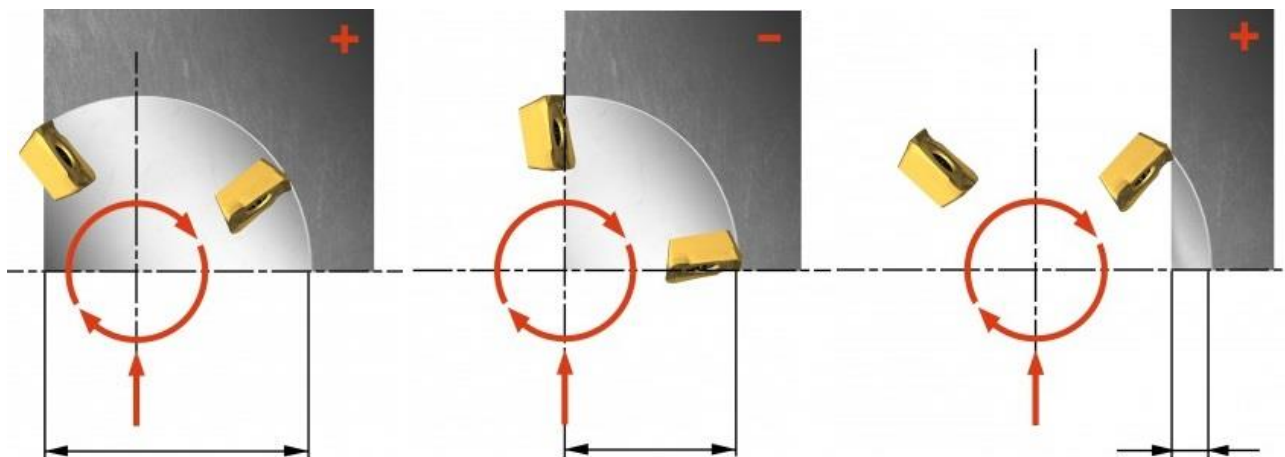
- fogásvétel,
- forgácsív a fogásban,
- kilépés a fogásvételből.



1. ábra

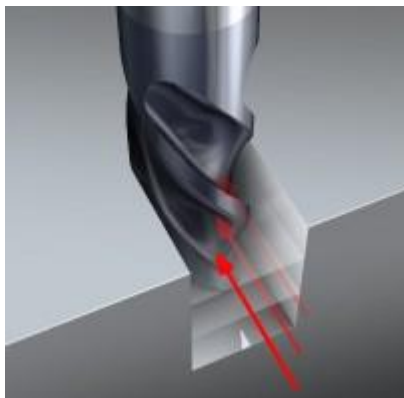
A forgács kiemelésének három fázisa [7]

Fogásvétel során egy részciklus alatt leválasztandó anyagvastagságot értjük. A ábrán szemléltettem a különböző fogásvétel lehetőségeket homlokmaráskor.

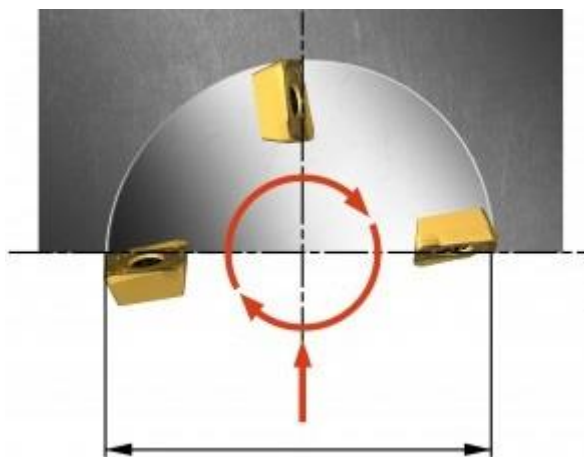


2. ábra
Fogásvétel lehetőségek [7]

A maximális forgácsívét, horonymarás esetén 180° ($a_e = 100\%$ DC) értékűnek vesszük. A hosszú forgácsív következménye abban áll, hogy több hő jut a vágóélre. Nagy radiális erők keletkeznek, ezenkívül értelemszerűen hosszabb a fogásban töltött idő.



3. ábra. Horonymarás [7]

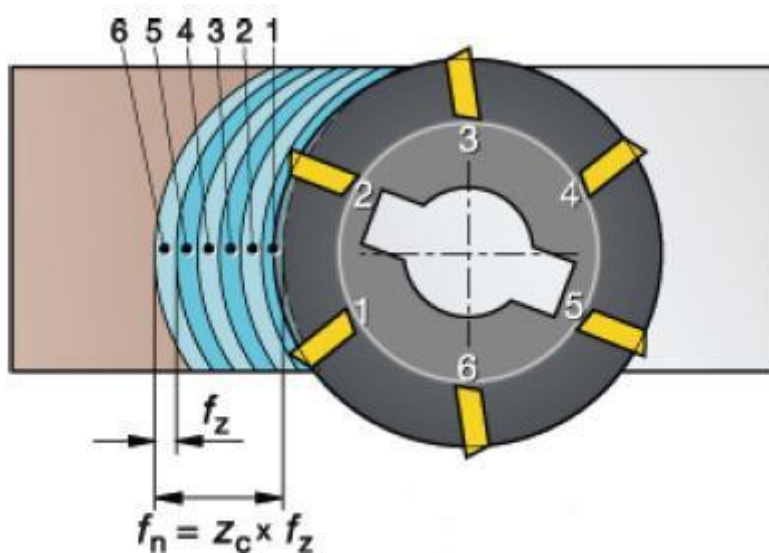


4. ábra. Forgácsív horonymarás esetén [7]

A fogásból való kilépés a legérzékenyebb a három fogácsolási fázis közül. Kerülni kell a forgácsképződést kilépéskor. Csökken az éltartam, ha vastag forgácsok jönnek létre kilépéskor, ugyanis a fogás végső pontján a forgács nincs megtámasztva, és megpróbál elhajlani. Keményfém szerszámoknál az ilyenkor ébredő mechanikai feszültség fokozottan káros.

2. A FORGÁCSKERESZTMETSZET MEGHATÁROZÁSA

A forgács alakulását több tényező is befolyásolja, de a számítások során csak a fogankénti előtolást, főorsó fordulatszámát és a működő fogszámot tekintem befolyásoló tényezőnek.



5. ábra
Homlokmarás [7]

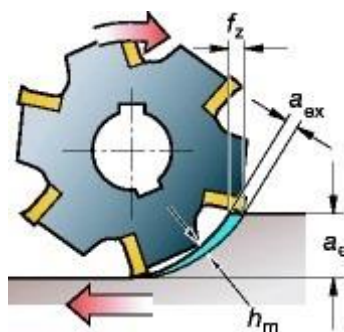
Az f_z fogankénti előtolás számításához szükségünk van a hosszanti előtolás értékére. A fogankénti előtolás meghatározásához, számításba kell vennünk az ajánlott maximális forgácsvastagság értéket.

Az ábrán is látható összefüggést átalakítva kapjuk az alábbi képletet:

$$f_z = \frac{V_f}{n z_c}, \quad (1)$$

ahol V_f a percnkénti előtolás (mm/percben), n az orsófordulatszama (ford/percben) és z_c pedig a fogak száma.

A maximális forgácsvastagságot a_{ex} -nek jelöljük általában. A marószerszám fogásvételének az eredménye ez az érték, ami az f_z , (a_e) és (k_r) értékektől függ. A fogankénti előtolás meghatározásánál fontos szempont a forgácsvastagság, annak érdekében, hogy a legnagyobb termelékenységet eredményező hosszanti előtolást lehessen alkalmazni.



6. ábra
Forgács paraméterek [7]

Az átlagos forgácsvastagságot, h_m -el jelöljük. A hasznos teljesítmény és a fajlagos forgácsolóerő számításához használjuk.

2.1. A legnagyobb forgácsvastagság

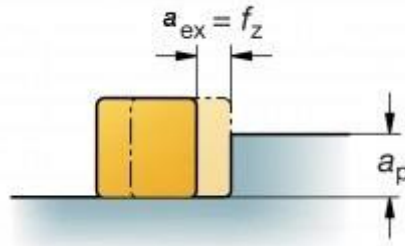
A marás legfontosabb paramétere. A megfelelő maximális forgácsvastagság ismerete nélkülözhetetlen megbízható és termelékeny marási műveletek tervezéséhez. Hatékony forgácsolás akkor valósítható meg, ha az a_{ex} értéket megfelelően igazítjuk a kiválasztott maróhoz. A túl kicsi a_{ex} értékű, tehát vékony forgács rossz

forgácsképződést, rövid éltartamot jelent. Az alacsony termelékenység és a rossz teljesítmény leggyakoribb oka a nem megfelelő a_{ex} -érték. Ha túl nagy a forgácsvastagság, akkor megterheli a forgácsolóélet, ami szerszámra káros.

A termelékenység növelésére nagyobb előtolást kell alkalmazni. A forgács vékonyodását elkerülendő, a fogankénti előtolás a következő esetekben növelhető:

- egyenes élű, 90° -nál kisebb belépési szögű marók esetében;
- kisebb fogásmélység esetén (a_p), általában kör- vagy nagy saroksugarú lapkák esetében;
- kisebb radiális fogásvételkor (D_e/a_e) arány, peremmarás esetében.

A $\phi 2$ -es ujjmaró 90° -os belépési szöggel rendelkezik. A maximális forgácsvastagság, egyenlő a fogankénti előtolással a 90 fokos marók esetében tehát $f_z = a_{ex}$.



7. ábra
Derékszögű él-elhelyezési szög [7]

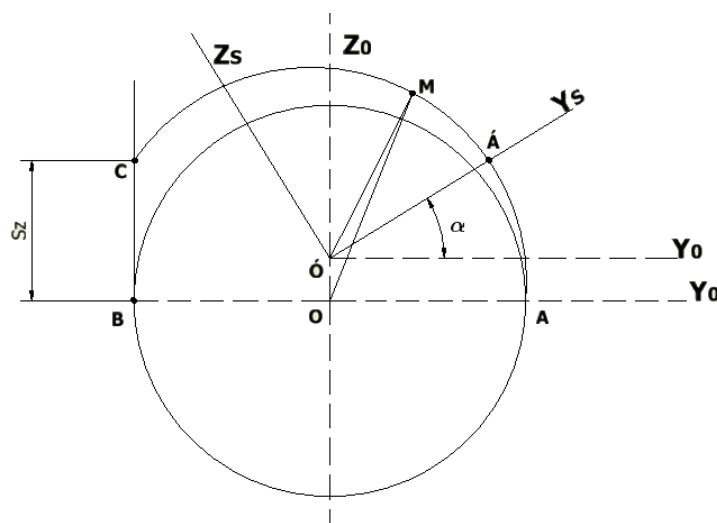
A forgácsvastagság a következő képlettel számolható:

$$h_{ex} = f_z \sin \kappa_r. \quad (2)$$

A belépési szög csökkentésekor növelni kell a fogankénti előtolást annak érdekében, hogy a forgácsvastagság (a_{ex}) ne változzon.

A vizsgált szerszám kétélű, és ebből adódóan 180° -os elfordulása alatt létrejövő forgácsot kell geometriai szempontból definiálni.

A $\phi 2$ mm átmérőjű ujjmaróra, átlagos táblázatos becslés alapján, $s_z = 0,03$ mm értékű fogankénti előtolást írunk elő.



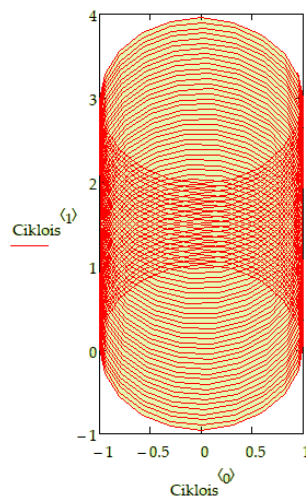
8. ábra
A forgácsvastagság változása az él helyzetével

A forgácsvastagság-függvény felírásához szükség van a maróél csúcsának pályaegyenleteire. Ezeket a 8. ábra alapján írjuk fel. Két koordináta-rendszert használunk: az $X_0Y_0Z_0$ koordináta-rendszer úgy van tájolva, hogy az X_0 tengely a maró tengelyével párhuzamos; a rendszer jobbsodrású. A maróhoz csatoljuk az $X_sY_sZ_s$ koordináta-rendszert, amely a forgácsba lépés pillanatában az $X_0Y_0Z_0$ -val egybeesik. Mivel a maró forog és közben az előtolás irányában elmozdul, ezért egy adott α elfordulási szögnek az OO' távolság felel meg

Következésképpen a 8. ábra alapján felírhatjuk az álló és a szerszámhoz csatolt mozgó rendszer közötti transzformációs mátrixot, ahol $S_1 = S_z Z$, az egyetlen fordulatra eső előtolás.

$$\begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$OO' = \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \quad (4)$$



9. ábra

A szerszámél csúcspontjának pályája

Az A pont koordinátái a szerszám rendszerében a következők: $(0, R, 0)$

A pálya egyenletei, a (3) mátrix segítségével a következők:

$$\begin{cases} X_o(\alpha) = 0 \\ Y_o(\alpha) = Y_s \cos \alpha - Z_s \sin \alpha = R \cos \alpha \\ Z_o(\alpha) = R \sin \alpha + \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \end{cases} \quad (5)$$

A Mathcad programcsomag segítségével kiszámított hurkolt ciklois pálya a 9. ábrán látható.

A forgácsban töltött idő alatt, az élcsúspont távolsága az O origótól a következő lesz:

$$OM = \sqrt{Y_o^2(\alpha) + Z_o^2(\alpha)} \quad (6)$$

A számítások elvégzése után kapjuk, hogy

$$OM(\alpha) = \sqrt{R^2 + \frac{S_z^2 Z^2}{4\pi^2} \alpha^2 + 2R \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \sin \alpha} \quad (19)$$

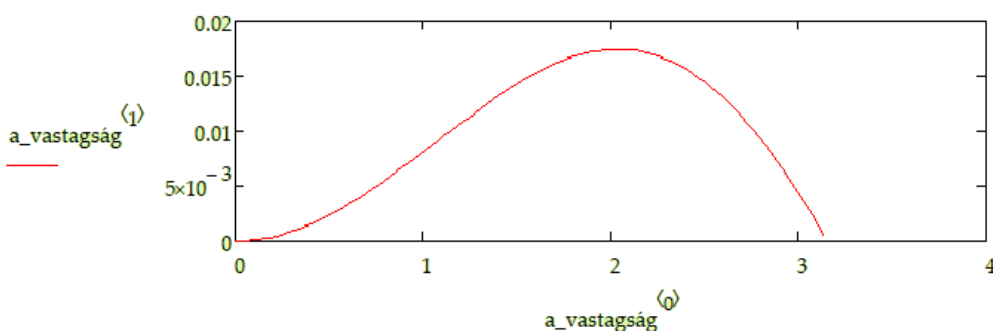
A forgácsvastagságot a kör sugárirányában mérjük, tehát a hurkolt ciklois polársugara és a maró sugárának különbségeként írható fel:

$$a(\alpha) = \sqrt{R^2 + \frac{S_z^2 Z^2}{4\pi^2} \alpha^2 + 2R \frac{S_z Z}{2\pi} \alpha \sin \alpha} - R \quad (7)$$

A vastagság maximumát a $\frac{da(\alpha)}{d\alpha} = 0$ egyenletből számítjuk. Az egyszerűsítések után az alábbi transzcendens trigonometriai egyenlethez jutunk:

$$\alpha \frac{S_z Z}{2\pi} + R \sin \alpha + R \cos \alpha = 0 \quad (8)$$

A forgácsvastagság változását az 10. ábra szemlélteti.



10. ábra
Forgácsvastagság függvénye/módosulása

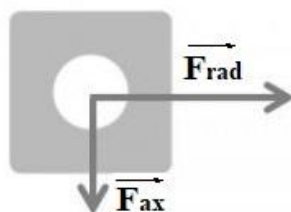
A kapott eredmények azt igazolják, hogy a legnagyobb forgácsvastagságot a fogankénti előtolás és a szerszám átmérője befolyásolja. Ezek függvényében változik a legnagyobb vastagság helyét meghatározó elfordulási szög-érték is. A választott forgácsolási paramétereknek megfelelő maximális forgácsvastagság $a_{max} = 0.017$ mm.

A tanulmányozott szerszám két élű. Ez esetben a maximális forgácsvastagság horonymaráskor $\alpha = 116^\circ 65'$ -értékre keletkezik.

2. REZGÉSEK TANULMÁNYOZÁSA HORONYMARÁSKOR

A rezgések tanulmányozásához ismernünk kell a forgácsoló erőket. Homlokmarás esetén a forgácsoló-erők irányai befolyásolják a rezgéseket. A 90° -os ujjmarónál a domináns erők radiális irányban fejtik ki a hatásukat. Emiatt az ujjmaró nagy szabadhossz esetén elhajlik. Vékony falú alkatrészek megmunkálásakor lényeges, hogy forgácsoláskor a kis értékű axiális erők keletkezzenek, illetve ezeket minél kisebb értéken tartjuk.

Homlokmaráskor a rezgések csökkenthetők, ha ritka fogosztású ujjmarót alkalmazunk. A forgácsoló-erők csökkenthetők akkor is, ha kisebb fogásmélységet (a_p) alkalmazunk. Olyan felületeken, amelyek rögzítése nem elég merev, instabil lehet a forgácsolási folyamat. A szármaróban ébredő, rezgésgerjesztő forgácsolási erőösszetevők a 11. ábrán láthatók.

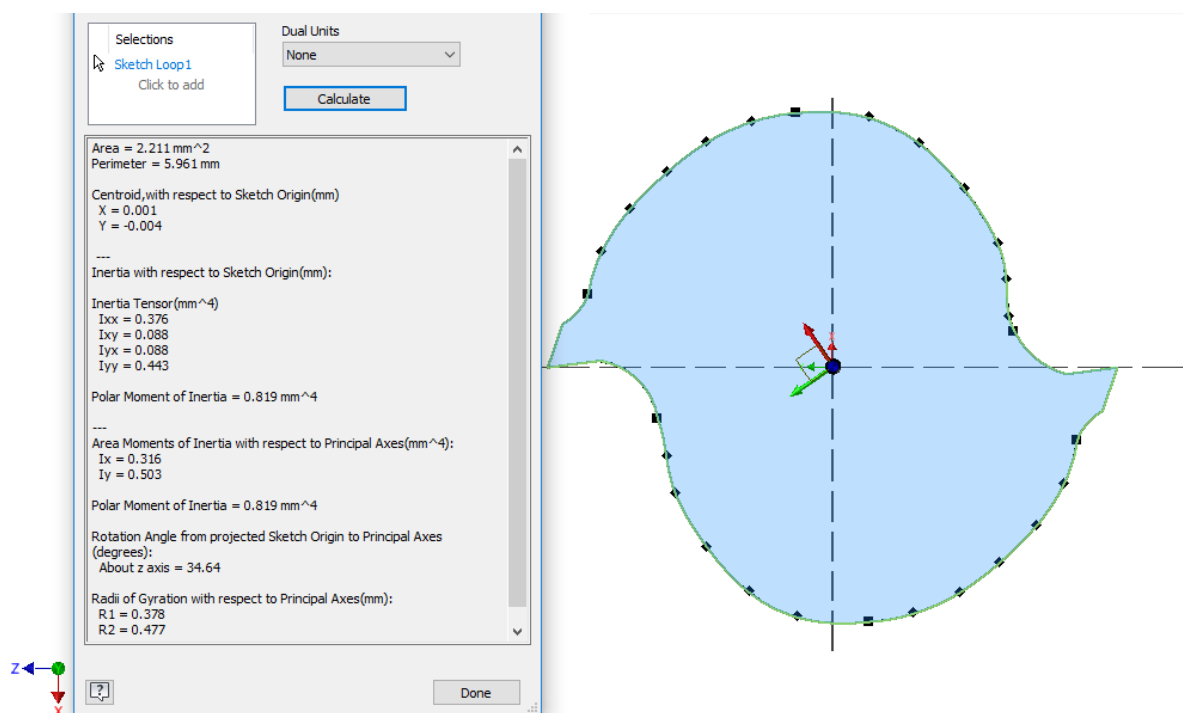


11. ábra
Forgácsolóerők iránya 90°-os ujjmarónál [7]

A szabadméret hossza befolyásolja a rezgések amplitúdóját. A rezgések csökkenthetők, ha lehetőleg rövidebb szabadmérettel rendelkező szerszámmal forgácsolunk. A megfelelő rögzítés biztosításához az ajánlott befogási hossz 4-szer nagyobb kell legyen, mint a forgácsoló átmérő. A nem megfelelő támasztás, gyenge befogás nem kívánt rezgéseket gerjeszt a szerszámban.

A viszonylag nagy szerszámkinyúlás okozta rezgések csökkenthetők, ha növeljük a fogankénti előtolást.

A tanulmányban szereplő ujjmaró keresztmetszetét és ennek geometriai tehetetlenségi nyomatékát Autodesk Inventor környezetben határoztam meg. Az 12. ábrán látható az ujjmaró keresztmetszet-vázlata. A tehetetlenségi nyomatéka az x tengelyre $I_x = 0,316 \text{ mm}^4$.



12. ábra
Ujjmaró sematikus rajza

Feltevésém szerint, a rezgések elsődleges és legfontosabb forrása a forgácsvastagság változása miatt kialakuló, ciklikusan változó forgácsoló erő. A forgácsoló erőket a forgácsvastagság függvény (7) képlet alapján számítom.

A számításokat a fajlagos egységnyi forgácsoló erő kiválasztásával indítom; sárgaréz anyagminőség esetében ennek értéke $500\text{-}700 \text{ N/mm}^2$.

A számításokban, a továbbiakban a $k_{s1,1} = 500 \text{ N/mm}^2$ értéket tekintjük.

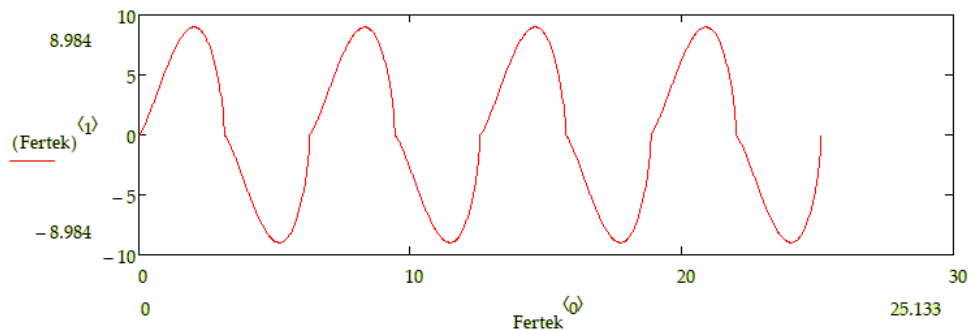
Az alkalmazott fogásmélység 0.5 mm , vagyis az átmérő 25% -a.

A forgácsoló erő egyszerűsített képlete a következő [11]

$$F_{forg} = k_{s1,1} a^{-z} \cdot A, \quad (9)$$

ahol A = a leválasztásra kerülő forgács keresztmetszete (mm^2), z pedig a forgácsvastagságot figyelembe vevő kitevő, melynek értéke $0,25 \div 0,35$.

A forgácsoló él váltakozva választják le a forgácsot. Ennek következtében a szerszámot meghajlító erő iránya változik. A változás leírására szükséges tudnunk, hogy a szerszám abszolút, azaz $2k\pi + \theta$, $\theta \in [0, 2\pi]$ elfordulási szögére melyik él lesz aktív, az első vagy a második. Úgy tekintjük, hogy 0 -tól π -ig az egyes él, π -tól 2π -ig a kettes fog vágni. Az erő változását a $0 \div 8\pi$ intervallumon a 13. ábrán szemléltettük:



13. ábra

A forgács vastagság változás alapján becsült forgácsoló erő változása a szerszámon

A függvény alakjából észrevehető, hogy periodikus, de nem harmonikus. Ezért szükséges ezt Fourier-sorba fejteni. A számításokat Mathcad 15.0 környezetben végeztem el. Az a_0 együtthatót elhanyagoltam, mert értéke nagyon kicsi, azaz 10^{-15} nagyságrendű.

A kiszámított együtthatók értékei az 14. ábrán láthatók. Az első oszlopban az a_n értékek szerepelnek, másodikban pedig a b_n értékei, ahol a jelölések az

$$f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_n \cos i x + \sum_{i=1}^{\infty} b_n \sin i x \quad (10)$$

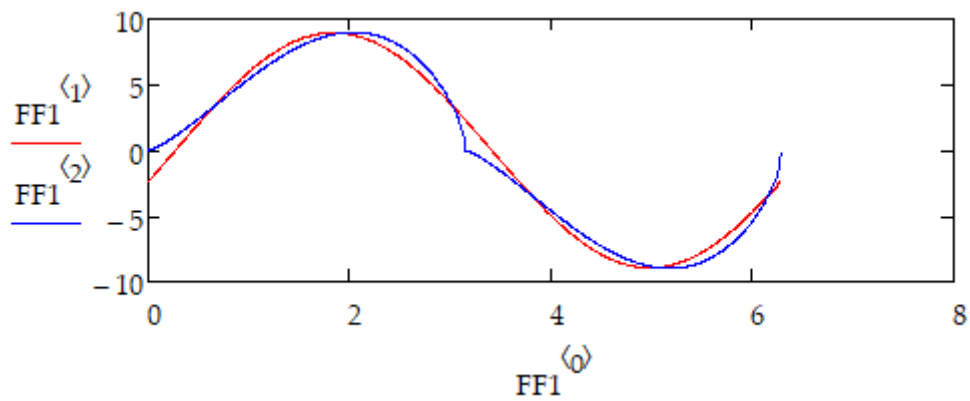
felírásnak megfelelők. Ezután meghatároztam a közelítő függvényt, ahol az elfordulási szög lesz a függvény változója, ő maga pedig véges számú harmonikusok összege.

	0	1
0	-2.377	8.628
1	$-2.827 \cdot 10^{-15}$	0
2	0.61	0.657
3	$5.314 \cdot 10^{-15}$	$-6.361 \cdot 10^{-15}$
4	0.306	0.286
5	$-3.039 \cdot 10^{-15}$	$-1.908 \cdot 10^{-15}$
6	0.186	0.17
7	$-4.316 \cdot 10^{-15}$	0
8	0.126	0.117
9	$-2.827 \cdot 10^{-15}$	$2.679 \cdot 10^{-8}$

14. ábra

A Fourier-sorozat első 10 tag meghatározása

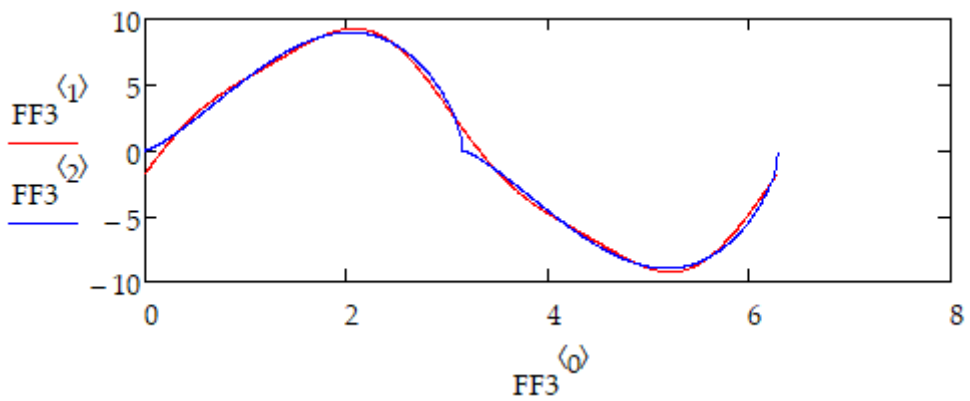
A 15. ábrán az első harmonikus és az eredeti függvény összehasonlító ábrázolását láthatjuk. Észre lehet venni, hogy az eredeti függvény töréspontját az első harmonikus nem tudja követni.



15. ábra

Az első harmonikus és az eredeti függvény reciprok helyzete

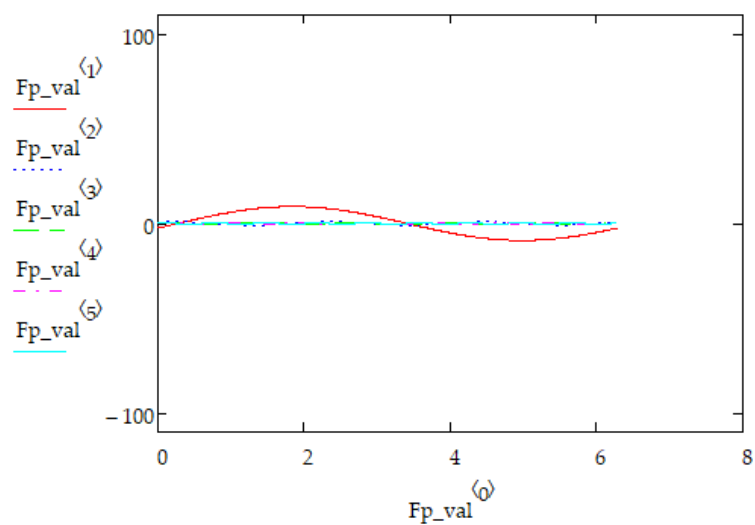
Ha viszont az első négy taggal számolok akkor sem lesz jobb, de ha az első hat tagot tekintem, akkor jobb közelítéseket kapok. A Fourier sorozatból származtatott függvény egyre jobban simul az eredeti függvényre.



16. ábra

Az első 6 harmonikust tartalmazó Fourier-közelítés és az eredeti függvény

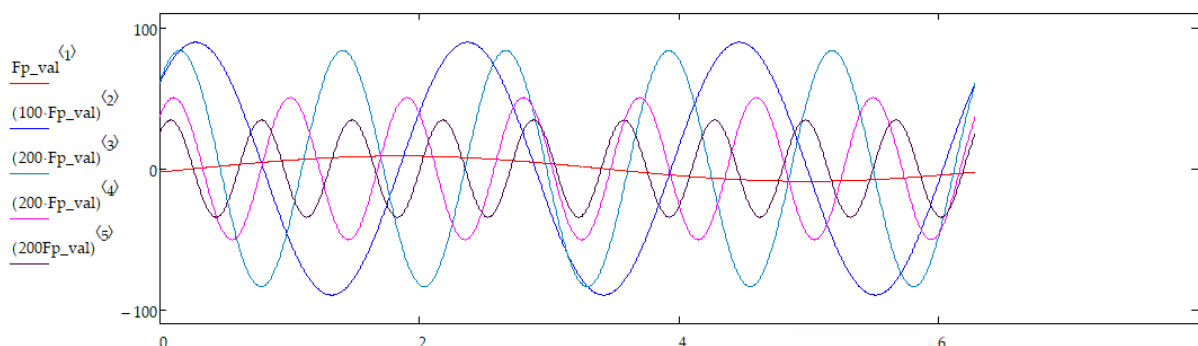
Az egyes harmonikusok értékeit a 17. ábra szemlélteti.



17. ábra

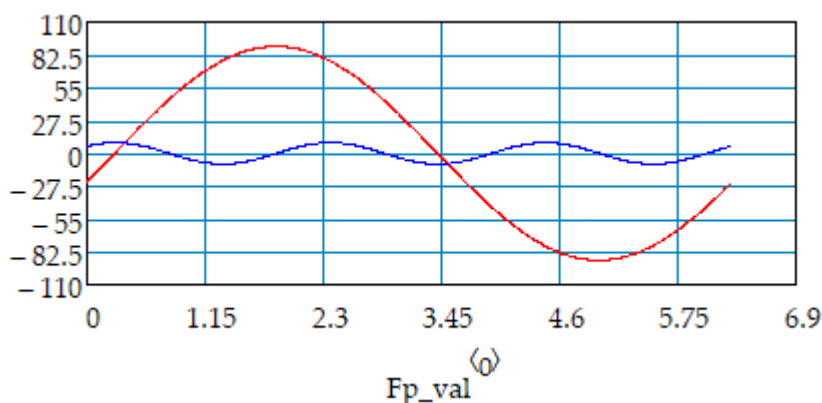
Az egyes harmonikusok szuperponált ábrázolása

Annak érdekében, hogy vizuálisan értelmezhetővé tegyük a különböző harmonikusokat, az amplitúdókat jól megválasztott faktorokkal szorozzuk (18. ábra):

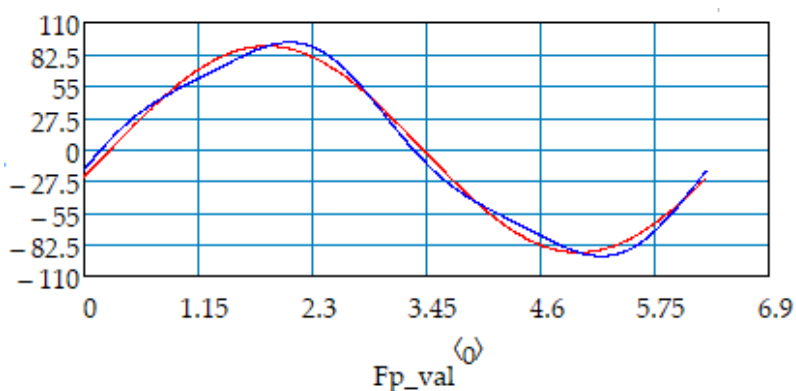


18. ábra
Fourier sorok tagjai szuperponációban

Jelen feladatban a függvénynek csak az első és harmadik tagjával való közelítés elegendő



19. ábra
Az első és harmadik harmonikus



20. ábra
Eredeti és a közelítő függvény relatív helyzete

A 20. ábrán a harmonikus sorral való közelítést (kék színű görbe) és az első harmonikust (piros színű görbe) szemléltetjük. Észre lehet venni, hogy a közelítés jól követi az eredeti függvényt.

Ezután átírjuk a változókat időre, hogy a rezgési egyenletek felírásához a szögváltozót időváltozóra cseréljük, a $\varphi(t) = \omega_0 t$ lineáris transzformáció bevezetésével, ahol $\omega_0 = \pi n/30$, a gerjesztési körfrekvencia

Továbbá szükséges a maró konzolban levő részének tömege. Ezt közelítéssel számítjuk, a keresztmetszetről. A 12. ábra alapján a szerszám keresztmetszete a teljes $\phi 2$ mm átmérőjű körnek közelítőleg 70%-a, ezenfelül a szárból kb. 2 mm tömör, horonymentes hengerrész.

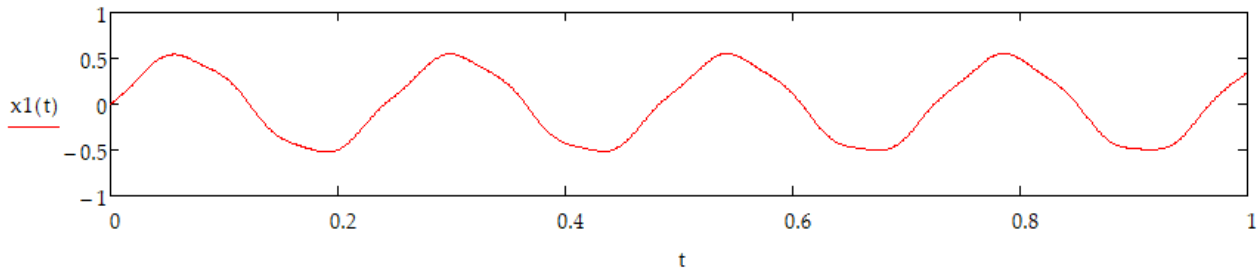
A differenciálegyenletet, az egy szabadságfokú modell alapján [1] írjuk fel:

$$\ddot{x} + 2 \frac{c}{2m} \dot{x} + kx = F_f(t). \quad (11)$$

Csillapítási tényezőnek $c = 10^{-5} \text{N} \frac{\text{s}}{\text{mm}}$ értéket vettem.

A k merevséget a konzolba rögzített maró deformációjának mértékéből számítottam.

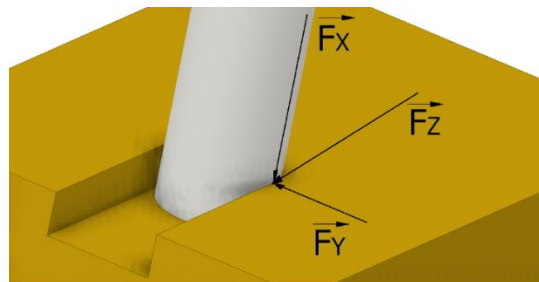
A differenciálegyenletet a Mathcad 15.0 szoftver használatával, az Adams-féle módszer alkalmazásával oldtam meg. Ennek alapján, meg kapjuk a következő grafikus képet (21. ábra):



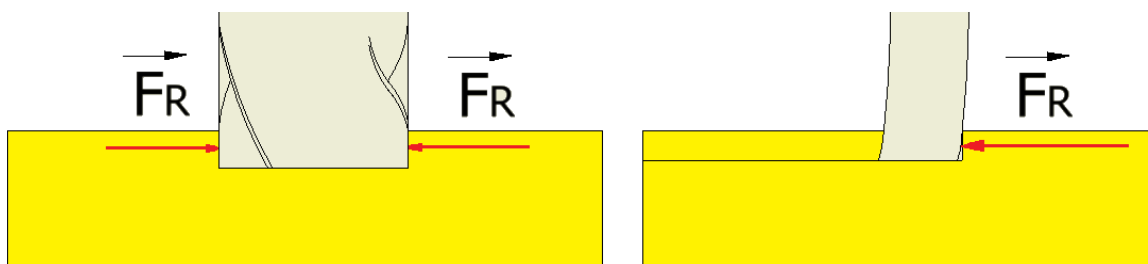
21. ábra
Első modell stacionáriuslengései

A 21. ábra alapján meg állapítható, hogy a szerszám kihajlása túlságosan nagy lesz. Az ujjmaró szára ilyen értékű kihajlás esetén eltörik. A felépített modell nem valóságos. Ennek az az oka, hogy ebben a feltevésben a maró homlokrésze szabadon marad. A valóságban viszont a szerszám meg van itt támasztva. A forgácsolt felület horony kialakítású, az ujjmaró így két oldalt is támasztva lesz. Az ujjmaró e miatt csak egy irányban képes kilengeni.

Az új erőmodellbe beleszámítottam a kilengés korlátait is. A marónak az alsó része, tehát a két keresztletet tartalmazó része nem tud elmozdulni mert részben a horony falai támasztják, részben pedig a kihajlás elhanyagolható abban az irányban.

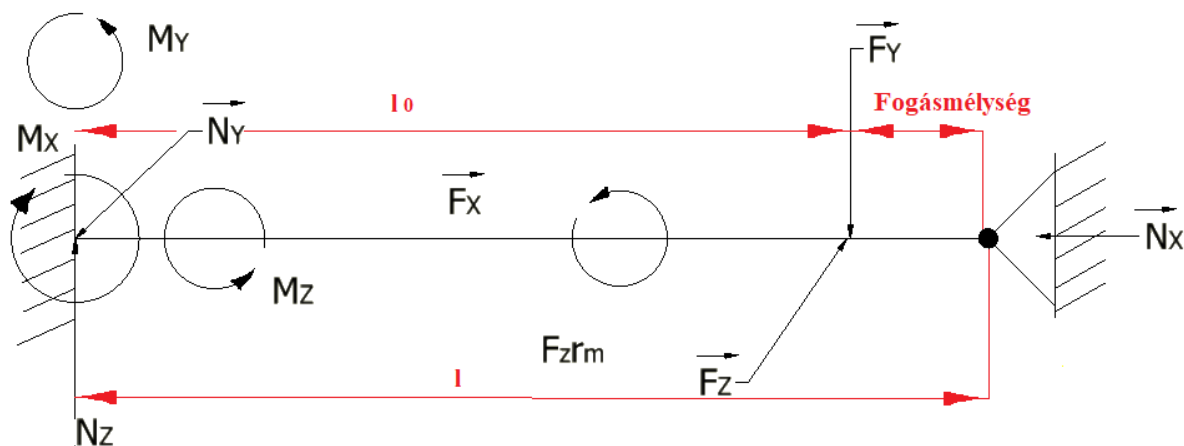


22. ábra
Erők irányai homlokmarás esetén



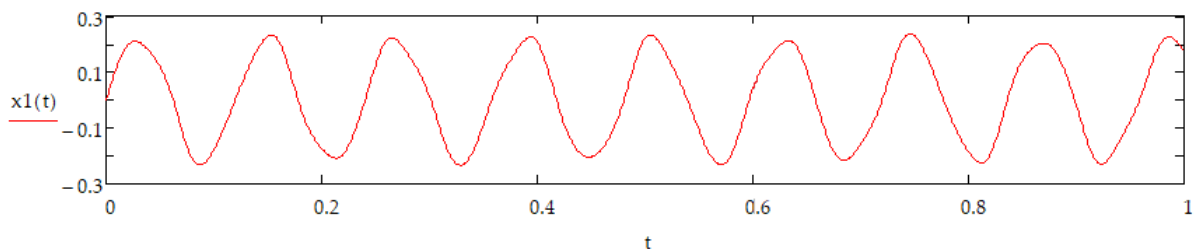
23. ábra
A kényszererők irányai

Jó közelítést kapunk, ha a maró fogait tartalmazó homloksíkot csuklóval helyettesítjük, amelyben az elmozdulást lenullázzuk. A feladatot a Castigliano féle tétel [1] alkalmazásával oldjuk meg. A forgácsoló erővektorokat pedig a kezdeti felület, vagyis a mart horony tetejére illesztjük. Az új erőmodellt a 24. ábrán tüntettük fel.

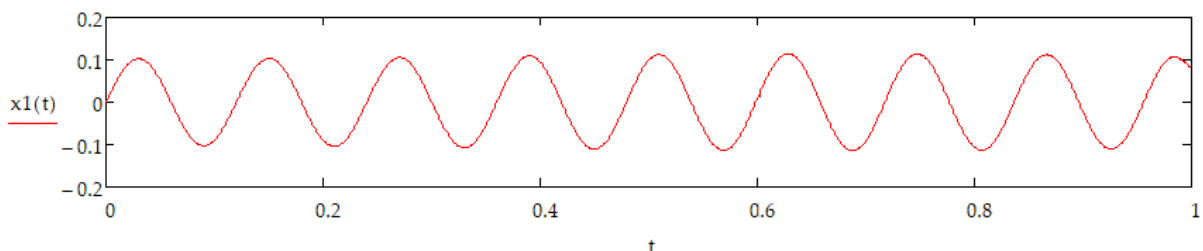


24. ábra
A maró rögzítési és erőmodellje

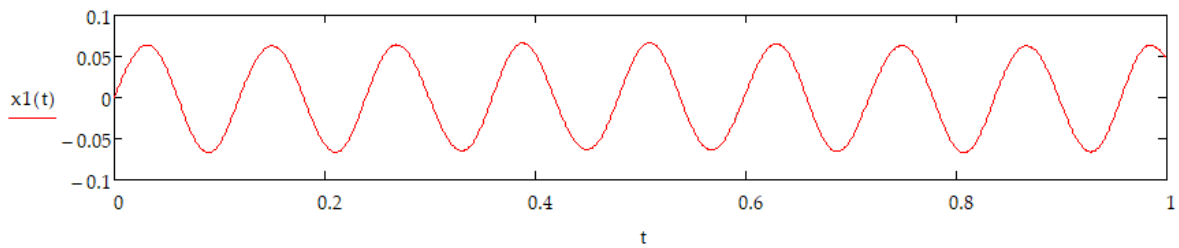
Az új modellre számított válaszfüggvény szerint, hogy sokkal kisebb lesz az amplitúdó, de még mindig elfogadhatatlanul nagy. A forgácsolási paraméterek vizsgálata rávilágít arra, hogy a választott forgácsoló sebesség-érték elég alacsony. Észre lehet venni, hogy a forgácsolási sebesség növelésével a rezgések amplitúdóit hatékonyan csökkenteni tudjuk. A rezgések amplitúdói még csökkenthetőek, ha kisebb fogásmélységet választunk.



25. ábra
Második modell szerinti válasz 30 m/perc forgácsolási sebességre

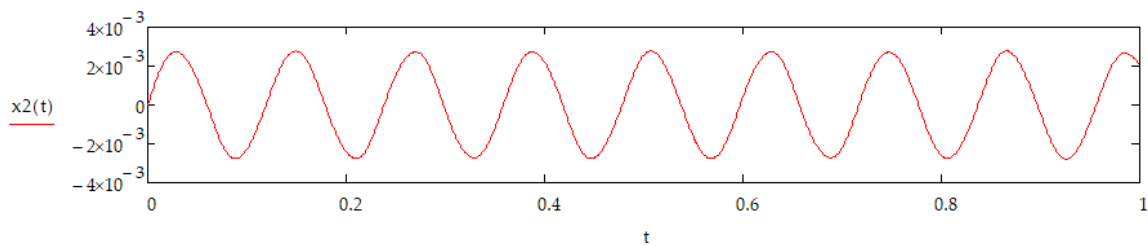


26. ábra
Második modell válasza 60 m/perc forgácsolási sebességre

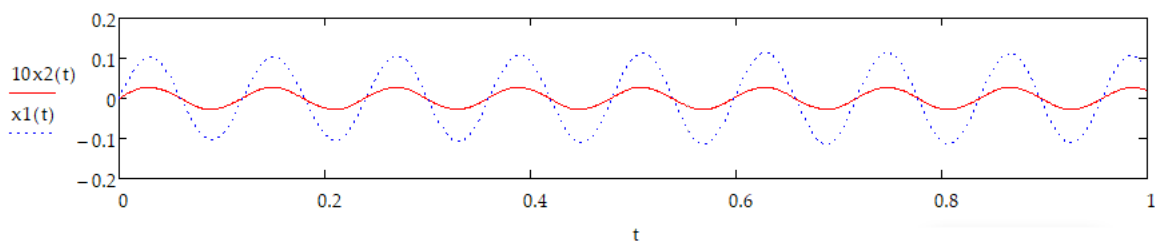
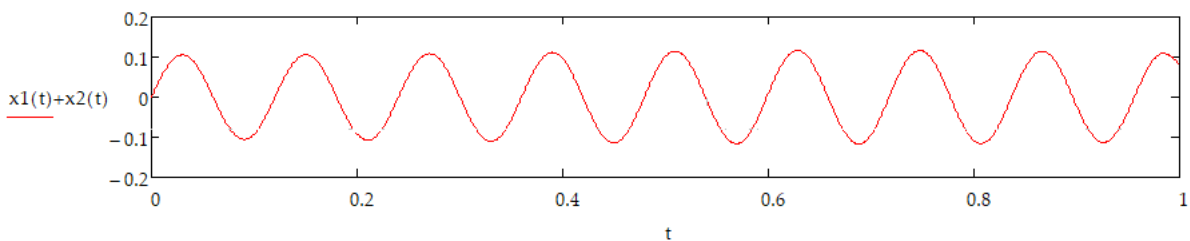


27. ábra
Második modell 100 m/perc forgácsolási sebességre

A második harmonikust hasonlóképpen értékeljük ki.



28. ábra
Második harmonikus kiértékelése



29. ábra
A végleges modell eredményei

KÖVEKTEZTETÉSEK

Nem robusztus technológiai rendszerek esetében nagy fontosságot kell tulajdonítani a rezgés források azonosításának, és a rezgések modellezésének, az amplitúdók helyes becslése céljából.

Dolgozatunkban bemutattuk, hogy mennyire fontos a helyes modell alkalmazása és a megfelelő forgácsolási sebesség, illetve fordulatszám kiválasztása.

A bemutatott modell koránt sem teljes, még lehet változtatni és javítani rajta azáltal, hogy a marót nem egy szabadságfokú, hanem folytonos környezetnek tekintjük. Itt viszont negyedfokú differenciálegyenleteket kell alkalmazni.

IRODALOMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Alămoreanu, E., Dinu, G., Stoica, M., ș.s. *Rezistența materialelor*, Universitatea Politehnica București, Matrix Rom
- [2] Picoș, C., Coman, Gh., Pruteanu, O., Bohosievici, C., Braha, V., Dr.Paraschiv, Slătineanu, L., Grănescu, Tr., ș.a. *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere*, Editura Universitas Chisinau, **1992**
- [3] Hollanda, D ., *A forgácsolás alapjai*, Scientia Kiadó, Kolozsvár, **2008**
- [4] Dr. Árva, J., Dr. Nagy, P.S., *Forgácsoló eljárások fehér*, Műszaki kiadó, Budapest, **2013** képek
- [5] Bálint, L., *A forgácsoló megmunkálás tervezése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, **1958**
- [6] Conf. dr. ing. Enache, Ș., *Proiectarea si tehnologia sculelor așchietoare*, Editura didactică si pedagogică, București, **1973**
- [7] <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [8] <https://www.iscar.com/Products.aspx/CountryId/1/ProductId/3531>
- [8] http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/tec_solid_end_mills/tec_solid_end_mills_technical/tec_solid_end_mills_terminology
- [10] http://www.gjt.bme.hu/sites/default/files/03_Elgeometria.pdf
- [9] <https://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forg1.htm>