

# GÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

### SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczeni Ádám

**elnök**

Vesza József

**főszerkesztő**

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**főszerkesztő-helyettesek**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálinkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

### KEDVES OLVASÓ!

A Gép folyóirat 2012./03. számában a Mechatronikai és Logisztikai Kiválósági Központ kutatási eredményei kerülnek publikációk formájában ismertetésre. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, valamint a Miskolci Egyetem kutatást végző szervezeti egységei anyagi hozzájárulásával valósul meg. A kiválósági központot négy tudományos műhely alkotja, melyek kutatásai a mechatronika és logisztika tématerületei köré csoportosulnak. A mechatronikai és a logisztikai szakterületek komplex kutatása és az eredmények ipari alkalmazása elengedhetetlennek mondható, mivel a magyar gazdaság fejlődési tendenciái és a magyar kormány gazdaságpolitikája is ezt teszi indokolttá (pl. autóipar dinamikus bővülése, regionális logisztikai központok kialakítása, stb.). Az intelligens rendszerek csak megfelelő gazdaságosság, kommunikáció, illetve jogi szabályozás esetén piacképesek, ami indokolja a mechatronikai és logisztikai rendszerek ilyen szempontú vizsgálatát is.

A Mechatronikai rendszerek elemeinek kutatása és fejlesztése, a Logisztikai rendszerek hatékonyságnövelési eljárásainak, módszereinek kutatása, a Vezetékes és vezetékes nélküli kommunikációs rendszerek megbízhatóságának növelése a logisztikai és mechatronikai alkalmazásoknál és az Innovatív megoldások a szervezetek irányításában a versenyképesség fokozására tudományos műhelyek alkotják a Mechatronikai és Logisztikai Kiválósági Központot. Az elmúlt egy éves kutatási időszakban számos oktató, kutató és hallgató kapott lehetőséget eredményeinek neves hazai és nemzetközi konferenciákon való bemutatására. A központ elsődleges céljainak tekinti a fiatal oktatók, kutatók helyben tartását, az ipari vállalatokkal való kapcsolatok kiépítését és az azokkal való közös kutatások megvalósítását.

A Mechatronikai rendszerek elemeinek kutatása és fejlesztése tudományos műhelyben a Robert Bosch Mechatronikai Tanszék, a Szerszámgépek Tanszéke, az Elektrotechnikai- Elektronikai Tanszék, valamint a Fizikai Tanszék 7 kutatás – fejlesztési témával vesz részt. Ezen kutatások az indítómotorok, a szuperfiniselő berendezés, a golyósorsók, a bonyolult felületű alkatrészek előállítására, az elektromechanikus aktuátorok, a mérés-technikai, a villamos hálózatok, valamint az atom – és szilárdtest fizikai problémák modellezése, fejlesztése és kutatása témákban valósulnak meg. Ez a cikkgyűjtemény a kiválósági központ elmúlt egy éves kutatási munkájának egy fontos részét ismerteti.

*Prof. Dr. Illés Béla*  
egyetemi tanár,  
központvezető

*Dr. Szabó Tamás*  
egyetemi docens,  
tudományos műhelyvezető

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: +36-46/379-530, +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530, e-mail: gazdasz@chello.hu.

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőknel, e-mailen: [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu), faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,  
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**A megjelent cikkek lektoráltak.**

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

# TARTALOM

1. Nagy L.:	16. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:
LINEÁRIS ELEKTROMÁGNESES AKTUÁTOR	SZERSZÁMPROFIL SZÁRMAZTATÁSA
INDUKTIVITÁSÁNAK VIZSGÁLATA..... 3	CAXX ALKALMAZÁSSAL..... 63
2. Lénárt J.:	17. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:
ÉRINTKEZÉSMENTES REZGÉSMÉRÉS..... 7	GOLYÓSANYA SZERSZÁMPROFILJÁNAK
3. Olasz A., Szabó T.:	MEGHATÁROZÁSA HAGYOMÁNYOS
NÉGY SZABADSÁGFOKÚ ROBOT INVERZ	FURATKÖSZÖRÜNÉL..... 67
KINEMATIKAI VIZSGÁLATA.....11	18. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:
4. Jakab E., Lénárt J.:	GÓTIKUS KÖRÍVPROFILÚ GOLYÓSANYA
CNC LEMEZMEGMUNKÁLÓ GÉPEK..... 15	SZERSZÁMPROFILJÁNAK KÖZELÍTÉSE
5. Kiss D., Csáki T., Makó I.:	ELLIPSZISSEL ..... 71
NAGY MENETEMELKEDÉSŰ GOLYÓSANYA	19. Tóth L.:
CNC ESZTERGÁN TÖRTÉNŐ MEGMUNKÁLÁSI	TRANZIENS JELEK VIZSGÁLATA
LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA..... 19	VIRTUÁLIS MŰSZEREZÉssel ..... 75
6. Csáki., Makó I., Hegedűs Gy.:	20. Szarka T.:
ROBOTTECHNIKAI OKTATÓ	A VILLOGÁS (FLICKER) ZAVAR
LABORATÓRIUM FEJLESZTÉSI TERVE ..... 23	TERJEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA..... 79
7. Icsenko A.A., Barna B., Molnár L.:	21. Szalontai L., Kovács E.:
KOPOTT CSAPÁGYHÁZAK FELÚJÍTÁSA	OPTIKAI ELVEN TÖRTÉNŐ KONTÚRVONAL
FÉMPOLIMER ANYAGOK	FELISMERÉS ..... 83
FELHASZNÁLÁSÁVAL ..... 27	22. Gáti A., Ferenc I., Kellényi L.:
8. Takács Gy., Hegedűs Gy., Szilágyi N.:	ANDROID ALAPÚ ÁLLAPOTFELMÉRŐ
SZERSZÁMGÉPEK SZÁMÍTÓGÉPPel	RENDSZER NEUROKOGNITÍV ÉS KERINGÉSI
SEGÍTTET KARBANTARTÁSA ..... 31	PROBLÉMÁK KORAI FELISMERÉSÉRE ..... 87
9. Szilágyi A., Patkó Gy.:	23. Füvesi V., Kovács E.:
SZUPERFINISELŐ BERENDEZÉS EGY	MÓDSZER INKREMENTÁLIS JELADÓ MODELL-
LEHETSÉGES NEMLINEÁRIS DINAMIKAI	ALAPÚ HIBA-DETEKTÁLÁSÁRA..... 91
MODELLJE..... 35	24. Szentirmai L.:
10. Szilágyi A., Patkó Gy., Takács Gy.:	EGYENÁRAMÚ KISMOTOR VISELKEDESE ÉS
TRAPÉZMENETES ÉS GOLYÓSORSÓS	MÉRÉSE A VILÁGHÁLÓN ..... 95
HAJTÁSOK EGYENÉRTÉKŰSÉGE .....39	25. Bodolai T.:
11. Szilágyi A., Takács Gy., Barna B., Demeter P.:	OPTIKAI TÁVOLSÁGMÉRÉS
HIDROPLASZTIKUS SZORÍTÓEGYSÉG	LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA..... 99
MECHANIKAI VIZSGÁLATA ..... 43	26. Kazup L., Marcsák G. Z.:
12. Szilágyi A., Takács Gy., Velezdi Gy., Demeter P.:	FÁZISZÁRT HUOK ALKALMAZÁSA
MEGOLDÁSVÁLTOZATOK	VILLAMOSHÁLÓZATI MÉRÉSADATGYŰJTŐ
KARUSSZELESZTERGA ÁTALAKÍTÁSÁHOZ .... 47	RENDSZEREKben ..... 103
13. Csáki T., Lajtos J., Makó I., Szilágyi A.:	27. Paripás B., Palásthy B.:
REVERSE ENGINEERING ALKALMAZÁSI	AZ ÜTKÖZÉS UTÁNI KÖLCSÖNHATÁSRA
LEHETŐSÉGEI ..... 51	VONATKOZÓ (E,2E) KOINCIDENCIÁS
14. Szilágyi A., Takács Gy., Barna B., Demeter P.:	MÉRÉSEINK RÖVID ÁTTEKINTÉSE ..... 107
GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK REMANENS	28. Paripás B., Palásthy B., Matjaz Ž.:
ÉLETTARTAMÁNAK KÍSÉRLETI	ÁLLAPOT-ÁLLAPOT INTERFERENCIA
VIZSGÁLATA..... 55	KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA
15. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:	ELEKTRONSPEKTROSKÓPIÁVAL..... 111
A MEGMUNKÁLÁSI PONTOSSÁG HATÁSA A	29. Majár J.:
KAPCSOLÓSZÖGRE GOLYÓSORSÓKNÁL..... 59	KOMPAKT KETTŐSRENDSZEREK
	DINAMIKÁJÁNAK SPIN-PÁLYA
	KORREKCIÓI .....115

# LINEÁRIS ELEKTROMÁGNESES AKTUÁTOR INDUKTIVITÁSÁNAK VIZSGÁLATA

## STUDY OF THE INDUCTANCE OF A LINEAR ELECTROMAGNETIC ACTUATOR

Nagy Lajos\*

### ABSTRACT

*The paper presents an approximating determination of the inductance of a linear electromagnetic actuator by means of the electro-mechanical method. The method is based on the direct measurement of the inductance derivative with respect to the iron core position at different currents. The inductance is obtained by numerical integration.*

### 1. BEVEZETÉS

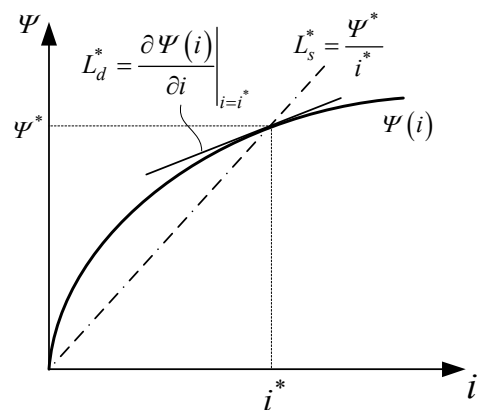
Napjainkban széles körben alkalmaznak lineáris elektromágneses aktuátorokat. Felépítésük egyszerű és gazdaságosan gyárthatók. A kutatás egy adott indítómotor haladó-haladó típusú mozgás-átalakítóját működtető elektromágnesét vizsgálja. A vizsgált elektromágnes két koncentrikusan egymásba helyezett tekercsből és egy mozgatható vasmagból épül fel [17]. A cél a kapcsolómechanizmus dinamikai viselkedésének modellezése. A jelenséget egy csatolt nemlineáris differenciál-egyenletrendszer írja le, amely mechanikus és elektromos paramétereket egyaránt tartalmaz. Az egyik legfontosabb villamos paraméter az induktivitás, amely vasmagos tekercseknél az áramerősség és a pozíció függvénye. A cikkben bemutatásra kerül egy elektromechanikai mérési módszer és azok az elméleti megfontolások, amelyek figyelembevételével az induktívfüggvény a működési tartományban meghatározásra került.

### 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az induktivitás mérésére és elméleti számítására többféle módszer ismert. Tisztán elektromos mérési eljárásokat mutatnak be [4-6] művek, amelyeket impedancia méréseknek is neveznek, és általában légmagos tekercsek induktivitásának meghatározására

használnak. A [6] irodalom három fő csoportra bontja ezeket méréseket: három áram-feszültség módszer; váltakozó áramú hidmérő eljárások; rezonancia módszer. Valamennyi mérés váltakozó áramú (AC) gerjesztésen alapul. A gyakorlatban az AC hidmérő eljárásokat alkalmazzák.

Különösen nehéz egy tekercs induktivitásának meghatározása mozgatható vasmag esetén. A vasmag általában nemlineáris mágneses tulajdonságú, azaz a mágneses térre és a mágneses indukcióra vonatkozó anyagegyenlet nemlineáris, továbbá hiszterézis is felléphet. Az ilyen típusú tekercseknél az induktivitás a vasmag pozíciójának és az áramerősségnek a függvénye. A [7-15] publikációkban lineáris és forgó mozgású elektromágneses aktuátorok induktivitását numerikus-, és véges elem (FE) módszerekkel határozzák meg. A [13]-ban különböző numerikus eljárásokat mutatnak be a nemlineáris induktivitás számítására, ahol a villamos egyenleteket a Kirchhoff-, ill. Faraday törvényekből származtatják.



1. ábra. Szekáns és differenciális induktivitás definiálása

Nemlineáris induktivitás esetén az [5-7, 9-11, 18-20] irodalmakban definiálják az  $L_s$  szekáns (statikus),

\* tanársegéd, Miskolci Egyetem, Robert Bosch Mechatronikai Tanszék

látszólagos) és az  $L_d$  differenciális (dinamikus, inkrementális) induktivitás fogalmát, amelyet az 1. ábra szemléltet.

Az FE analízis alapja a növekményes energia módszer (IEM), amelyben a mágneses, vagy a kiegészítő mágneses energiát [7-10,14] és az energia/áram (E/C) perturbációt alkalmazzák.

Viszonylag kevés módszer létezik egyenáramú (DC) gerjesztésen alapuló induktivitás meghatározására. Egy 3 fázisú állandó mágnes gerjesztésű motor induktivitásának mérésére fázisonként DC gerjesztést alkalmaztak diszkrét pozíciókban a [9,10] publikációkban. Valamennyi mérést alacsony áramerősségeknél végeztek.

Ebben a cikkben az elektromágneses erő mérése alapján, közvetve került meghatározásra az indukciófüggvény. A mérés közvetlenül az indukciófüggvény deriváltját szolgáltatja.

### 3. ELMÉLETI MEGFONTOLÁSOK

A [3] irodalom alapján az áramerősség és az elektromágneses erő az alábbi függvénykapcsolattal írható fel:

$$i = i(x, \Psi) \quad F = F(x, \Psi), \quad (1)$$

ahol  $\Psi$  a tekercs összfluxusa,  $x$  a vasmag elmozdulása.

Az [1-3, 12,16] irodalmak szerint az elektromágneses erő a (2) összefüggéssel határozható meg:

$$F = \frac{\partial W_m^*(i, x)}{\partial x}, \quad (2)$$

ahol  $W_m^*(i, x)$  a kiegészítő mágneses energia. Ezt a tekercsek összfluxusának áramerősség szerinti integráljával állítjuk elő:

$$W_m^*(i, x) = \int_0^i \Psi(i, x) di. \quad (3)$$

A mérés elméleti modelljét a szekáns induktanciával fogalmazzuk meg. Az 1. ábra alapján a szekáns induktancia az összfluxus és az áram hányadosa, így:

$$\Psi(i, x) = L_s(i, x)i. \quad (4)$$

Visszahelyettesítve (4)-et (3)-ba, majd (2)-be az elektromágneses erő a következő alakba írható:

$$F(i, x) = \int_0^i \frac{\partial L_s(i, x)}{\partial x} i di. \quad (5)$$

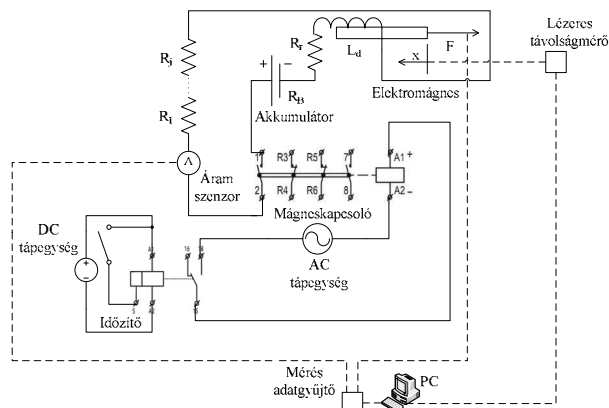
Az (5) egyenlet mindkét oldalát  $i$  szerint differenciálva, majd az egyenletet rendezve az induktivitás hely szerinti deriváltja meghatározható (6) szerint:

$$\frac{\partial L_s(i, x)}{\partial x} = \frac{\partial F(i, x)}{\partial i} \frac{1}{i}. \quad (6)$$

A mért áramerősség és elektromágneses erő ismeretében az (6) egyenlet bal oldala előállítható.

### 4. A MÉRÉS VÉGREHAJTÁSA, MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Az előző fejezet a mérés elméleti hátterét mutatta be. A mérést statikus állapotban végeztük el. A mérés áramköri rajzát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A mérés áramköri rajza

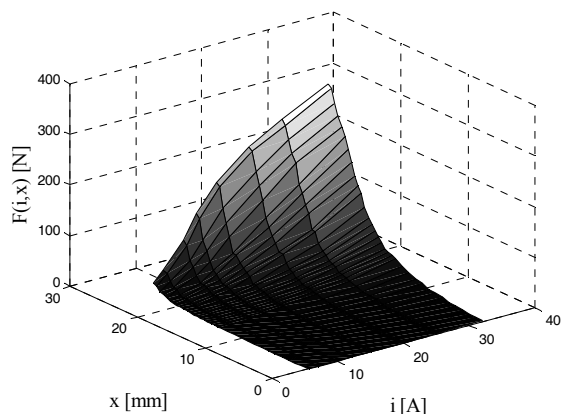
A mérési sorozatokat úgy hajtottuk végre, hogy egyazon pozícióban, különböző áramerősségeknél mértük a vasmagra ható elektromágneses erőt erőmérő cella segítségével. A vasmag kezdeti helyzetét teljesen behúzott állapotban vettük fel, és az elektromágnesből lépésenként kb. 0,5 mm-ként kifelé haladva (azaz a légrést növelve) pozicionáltuk. A helyzeteket lézeres távolságmérővel regisztráltuk. Az egyes áramszinteket különböző nagyságú ellenállások beépítésével állítottuk be. Az áram mérésére árammérő szenzort alkalmaztunk. A mért elektromágneses erőfüggvény a 3. ábrán látható.

### 5. A MÉRÉS KIÉRTÉKELÉSE

A kapott mérési eredmények alapján az induktivitás hely szerinti parciális deriváltja előállítható. Négy különböző áramszintnél,  $i_1=5 A$ ,  $i_2=10 A$ ,  $i_3=20 A$ ,  $i_4=32 A$ , az alábbi approximációs függvényt alkalmaztuk:

$$\begin{aligned} F(i, x) \Big|_{i_1} &\cong f_1(x) = a_1(x) + a_2(x)i_1 + a_3(x)i_1^2 + a_4(x)i_1^3 \\ F(i, x) \Big|_{i_2} &\cong f_2(x) = a_1(x) + a_2(x)i_2 + a_3(x)i_2^2 + a_4(x)i_2^3 \\ F(i, x) \Big|_{i_3} &\cong f_3(x) = a_1(x) + a_2(x)i_3 + a_3(x)i_3^2 + a_4(x)i_3^3 \\ F(i, x) \Big|_{i_4} &\cong f_4(x) = a_1(x) + a_2(x)i_4 + a_3(x)i_4^2 + a_4(x)i_4^3 \end{aligned} \quad (7)$$

ahol  $a_1(x)$ ,  $a_2(x)$ ,  $a_3(x)$ ,  $a_4(x)$  együtthatók.



3. ábra. A mért elektromágneses erő függvény

Az  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$  függvényeket ötödfokú polinommal illesztjük (8) szerint:

$$f_n(x) = p_{1n}x^5 + p_{2n}x^4 + p_{3n}x^3 + p_{4n}x^2 + p_{5n}x + p_{6n} \quad (8)$$

$n = 1, \dots, 4.$

Az  $a_1(x)$ ,  $a_2(x)$ ,  $a_3(x)$ ,  $a_4(x)$  együtthatók az alábbi mátrix egyenletből állíthatók elő:

$$\begin{bmatrix} a_1(x) \\ a_2(x) \\ a_3(x) \\ a_4(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & i_1 & i_1^2 & i_1^3 \\ 1 & i_2 & i_2^2 & i_2^3 \\ 1 & i_3 & i_3^2 & i_3^3 \\ 1 & i_4 & i_4^2 & i_4^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ f_3(x) \\ f_4(x) \end{bmatrix} \quad (9)$$

A közelítő derivált indukció függvény:

$$\frac{\partial L_s(i, x)}{\partial x} \cong \frac{1}{i} (a_2(x) + 2a_3(x)i + 3a_4(x)i^2), \quad (10)$$

amelyet a vizsgált tartományban az 4. ábra szemléltet. A közelítő derivált függvényekhez az indukciófüggvény (10)-ből integrálással előállítható:

$$L_s(i, x) = \int_0^x \frac{\partial L_s(i, \xi)}{\partial \xi} d\xi \quad (11)$$

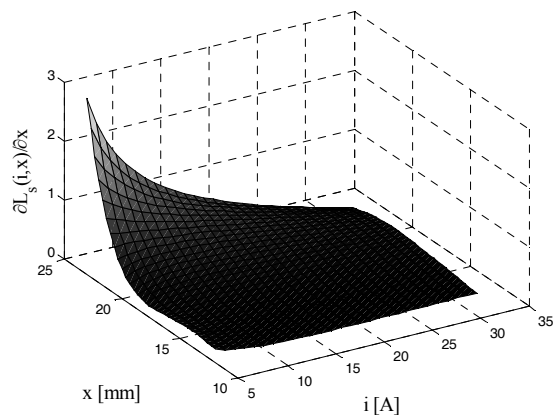
Az alábbi függvényközelítést alkalmazva:

$$L_s(i, x) = \frac{1}{i} (b_2(x) + 2b_3(x)i + 3b_4(x)i^2) + L_0, \quad (12)$$

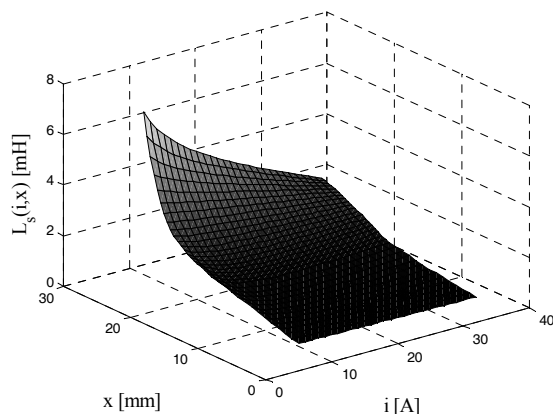
ahol

$$b_n(x) = \int_0^x a_n(\xi) d\xi \quad n = 1, \dots, 4. \quad (13)$$

A (12) egyenletben az  $L_0=0,6949 \text{ mH}$  a vasmag nélküli tekercs induktivitása. A konstansok meghatározása alapján a kapott indukcia függvényt az 5. ábra mutatja.



4. ábra: A közelítő derivált indukció függvény



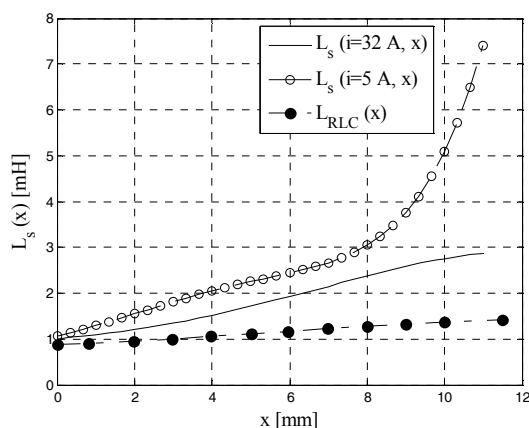
5. ábra: A kapott indukció függvény

Az elektromágneses induktivitását Voltkraft típusú RLC mérőműszerrel,  $f=120 \text{ Hz}$  frekvencián is meghatároztuk. Az  $i=5 \text{ A}$ ,  $i=32 \text{ A}$  áramerősségeknél és az RLC méréssel kapott indukcia függvények a 6. ábrán láthatók. Szembetűnő, hogy a tisztán elektromos mérési módszerrel alapuló indukтивitás közel lineárisan változik a vasmag helyzetének függvényében.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra került egy elektromechanikai mérési módszer lineáris elektromágneses aktuátor indukтивitásának meghatározására. A kiegészítő mágneses energia felhasználásával meghatároztuk az elektromágneses erőt, amely függ az áramerősségtől és a vasmag pozíciójától. A mérés elméleti modelljét a szekáns indukтивitással foglalmaztuk meg. A mért elektromágneses erő és a megfelelő áramerősségek

ismeretében az induktivitás hely szerinti parciális deriváltját előállítottuk, amelyet az áram vonatkozásában harmadfokú, a hely vonatkozásában ötödfokú polinommal közelítettük. A derivált függvényből integrálással meghatároztuk az indukciófüggvényt. A kapott eredményeket összehasonlítottuk egy rezonancia módszeren alapuló mérésrel.



6. ábra: Különböző induktancia függvények összehasonlítása

## KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## IRODALOM

- [1] PREUMONT A.: Mechatronics, Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems, Springer, 2006.
- [2] JANSCHKE K.: Mechatronic Systems Design, Methods, Models, Concepts, Springer, 2012.
- [3] CRANDALL S. H., KARNOPP C. D., KURTZ JR. E. F., PRIDEMORE-BROWN D. C.: Dynamics of Mechanical and Electromechanical Systems, McGraw-Hill, 1968.
- [4] SE-YUEN MAK: The RLC circuit and the determination of inductance, Phys. Educ., (29) 1994. pp 94-97.
- [5] SE-YUEN MAK: Six ways to measure inductance, Phys. Educ. September 2002. pp. 439-445.
- [6] SZYPER M.: Inductance Measurement, CRC Press LLC, 1999.
- [7] GOLLEE R., ROSCHKE Th., GERLACH G.: A finite element method based dynamic analysis of a long stroke linear actuator, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (196-197), 1999. pp. 943-945.

- [8] GYIMESI M., OSTERGAARD D.: Inductance Computation by Incremental Finite Element Analysis, IEEE Trans. Magn., (35), 1999. pp 1119-1122.
- [9] LU H., ZHU J., GUO Y.: Calculation of Differential Inductances of a Tubular Linear PM Actuator, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, (15), Supplement 2007.
- [10] GUO Y., ZHU J., LU H., JIN J.: Computation of Incremental Inductances for Nonlinear Dynamic Analysis of a Claw Pole SMC Motor, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, (15), No 3. 2007.
- [11] STUMBERGER G., PLANTIC Z., STUMBERGER B., MARCIC T.: Impact of static and dynamic inductance on calculated time response, Przeglad Elektrotechniczny, (87). No. 3., 2011. pp 190-193.
- [12] HADZISELIMOVIC M., VIRTIC P., STUMBERGER G., MARCIC T., STURMBERGER B.: Determining force characteristics of an electromagnetic brake using co-energy, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (320), 2008. e556-561
- [13] HADZISELIMOVIC M., BLAZNIK M., STUMBERGER B., ZAGRADISNIK I.: Magnetically Nonlinear Dynamic Model of a Series Wound DC Motor, Przeglad Elektrotechniczny, (87), No. 12b., 2011. pp 60-64.
- [14] DEMERDASH N. A., NEHL T. W.: Electric Machinery Parameters and Torques by Current and Energy Perturbations from Field Computations – Part I: Theory and Formulation, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14. December 1999. S. 1507-1513.
- [15] DEMERDASH N. A., NEHL T. W.: Electric Machinery Parameters and Torques by Current and Energy Perturbations from Field Computations – Part II: Application and Results, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14. December 1999. S. 1514-1522.
- [16] BODE C.: Methoden zur Induktivitätsberechnung, Jahresbericht 2009. p 14.
- [17] MEYER R., BRAUN H., REHAGE R., WEINMANN H.: Alternators and Starter Motors, Robert Bosch GmbH, 2003.

# ÉRINTKEZÉSMENTES REZGÉSMÉRÉS

## CONTACTLESS VIBRATION MEASUREMENT

Lénárt József\*

### ABSTRACT

*This article discusses about designing a novel equipment for vibration measurement and analysis. The goal of the project is to create a device that is small and smart, and can do the job without auxiliary equipment, like PC or notebook.*

### 1. BEVEZETÉS

Ez a cikk egy egyedi rezgésmérésre és rezgésvizsgálatra alkalmas berendezés fejlesztéséről szól. A fejlesztés célja egy olyan eszköz elkészítése, ami kicsi, okos és alkalmazásához nem szükséges semmilyen kiegészítő berendezés, mint például számítógép, mérőerősítő, vagy mérésadatgyűjtő. Bemutatásra kerülnek az érintkezésmentes mérés módszerei, valamint a tervezett mérési módszer. A fejlesztés még korai stádiumban van, így mérési eredmények nem születtek, jelenleg a tervezés és az első kísérletek fázisánál tartunk. A rezgésmérés a gépészetben egy rendkívül fontos vizsgálati lehetőség, egy olyan tudomány, amelynek segítségével nem csak magának a rezgésnek a paraméterei mérhetők, hanem ezekből következtetni lehet a gépek állapotára, esetleges meghibásodásaira is. A rezgésmérés során kapott mérési eredmények analizálásával megállapíthatók pl. kiegyensúlyozatlansági hibák (amiket okozhatnak akár alkatrésztréres is), csapágyhibák (jellemzően csapágykopás), illetve egyéb, a működést befolyásoló zavarok. A rezgések mérésére többféle módszert fejlesztettek ki, minden mérési feladathoz megtalálható a leginkább megfelelő mérési elv. Ezek a mérési elvek jellemzően indirekt mérések, leggyakrabban a gyorsulás mérésén alapulnak. A gyorsulás viszonylag könnyen mérhető (piezo, MEMS, stb.), integrálással meghatározható a próba sebessége, kétszer integrálva pedig a pozíciója (elmozdulása). [1] Vannak azonban olyan feladatok, ahol ezek a hagyományos, gyorsulásmérésen alapuló mérési elvek nem alkalmazhatók. Ilyen feladat lehet például, ha a rezgés amplitúdója nagy, akár milliméteres nagyságrendű, a frekvencia pedig relatíve magas. Egy ipari feladat kapcsán szembesültünk egy ilyen esettel, amely során egy vibrációs műanyaghegesztő berendezés állapotfelmérő vizsgálata során meg kellett vizsgálni a rezgetőfej működését. A berendezést PLC vezérli,

kezelőfelületén beállítható többek között a rezgés amplitúdója, frekvenciája, időtartama, amely paraméterek döntően befolyásolják a hegesztés minőségét. Az előírt paraméterektől való eltérés jelentős minőségromlást okoz, az alkatrészek a minőségvizsgálaton megbuknak, így jelentős veszteséget okoz. Mivel az illető cég autóiipari beszállító, a hegesztés minőségére magas követelmények vannak előírva. A feladat megoldása során először a hagyományos módszerrel próbáltuk elvégezni a mérést egy piezoelektromos rezgésmérő fejjel, mágneses rögzítéssel. A folyamat elindulásakor a mérőfej szinte azonnal leesett a rezgetőfejről. Ezért merült fel egy érintkezésmentes mérési módszer kialakításának szükségessége.

### 2. ÉRINTKEZÉSMENTES MÉRÉS

A hagyományos rezgésmérési módszerekkel kapcsolatban két probléma merül fel ilyen speciális körülmények között: a tehetetlenségi erők miatt a mérőfej rögzítése nehéz, vagy lehetetlen, illetve egyes esetekben a mérőfej tömege – mivel együtt mozog a mérendő tárggyal – befolyásolhatja a mérést. Ezekben az esetekben más mérési módszert kell keresni a feladat elvégzéséhez. Az érintkezésmentes rezgésmérési módszerek általában elmozdulás mérésen alapulnak és valamilyen optikai szenzort alkalmaznak, általában háromszögletes lézeres távolságmérő szenzort, vagy lézer interferométert. A háromszögletes (triangularizációs) lézeres mérőeszköz egy félvezető lézer fényforrásból és egy fényérzékelő szenzorból áll. Ez a mérési mód megfelel céljainknak, azonban kiegészítő berendezéseket igényel (mérőerősítő, mérésadatgyűjtő, számítógép, vagy laptop a kiértékeléshez). A tökéletes megoldás egy kis doboz lenne, amelyhez nincs szükség sok kábelre és nincs szükség érzékeny eszközökre, amit betehetünk a gép munkaterébe, ahol mér, gyűjti és kiértékeli az adatokat.

#### 2.1. Háromszögletes lézeres távolságmérő

A lézeres háromszögletes szenzorok a kibocsátott, majd a céltárgyról visszavert fény – általában lézersugár – segítségével mérnek távolságot. Az „adó” – általában félvezető lézerdióda – egy fénypöttyöt vetít a céltárgy felületére, a visszavert fény sugarat pedig egy fényérzékelő szenzorra – a

\* tanársegéd, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Tanszék

„vevőre” – fókuszálja megfelelő lencsékkel. Mivel a lézersugár kis szöveget zár be a célfelület normálisával, ha a távolság változik az eszköz és a céltárgy között, a fényfolt pozíciója is megváltozik a vevő szenzoron. Az eszközbe integrált jelfeldolgozó elektronika érzékeli a fényfolt pozícióját és – linearizáció és jelkondicionálás után – kimenőjelet állít elő, amely arányos a céltárgy távolságával. A legfontosabb eleme az eszköznek a fényérzékelő, amely kétféle lehet: PSD (Position Sensitive Device) vagy CCD (Charge Coupled Device). Ideális körülmények között a PSD szenzor megfelelően teljesít, bár megbízhatóságát és pontosságát nagyban befolyásolja a céltárgy felülete, színe, mintázata és a fényerősség. A CCD szenzorok újabb, fejlettebb eszközök, sok tekintetben felülmúlják a PSD szenzorokat, de a mozgásra és a felület változására való reagálásának sebességét korlátozza az alkalmazott mikrovezérlő, vagy mikroprocesszor

## 2.2. Lézer interferométer

A lézer interferométer egy nagy pontosságú berendezés nanométer nagyságrendű felbontással és több méteres mérési tartománnyal. Az eszköz működése az ún. Michelson interferométer elvén alapul: egy fénysugarat két egyenlő félre osztanak egy fénysugár-osztó féligáteresztő tükör segítségével. Az egyik sugarat egy fixen rögzített tükröre vetítik, majd onnan az érzékelőbe. Ez a referencia sugár. A másik sugarat egy másik tükröre vetítik, amely a céltárgyhoz van rögzítve. A második sugár extra távolságot tesz meg a referencia sugárhoz képest, így fáziskülönbség lesz a két sugár között. Amikor a két fénysugár találkozik a szenzoron, interferencia jön létre. Ez lehet konstruktív (a sugarak összeadódnak), vagy destruktív (kioltják egymást). A jelprocesszor számolja az interferenciákat és átszámolja elmozdulásra. Ebből adódóan az eszköz csak elmozdulás mérésére alkalmas, abszolút távolságmérésre nem. Rezgésméréskor elég az amplitúdót mérni, így ez megfelel céljainknak, azonban a lézer interferométer nagyon drága eszköz.

## 2.3. Vonalkamera (Line scan camera)

A vonalkamerák képrögzítő eszközök, amelyek olyan CCD, vagy CMOS szenzorokat tartalmaznak, amelyek egyetlen vonalból álló fényérzékeny elemet foglalnak magukban. Ebből adódóan a hagyományos kameráktól eltérően a kép egyetlen vonalból áll. Gyakorlatilag ugyanolyanok, mint a hagyományos képérzékelők, amelyek sok képpont-oszlopot – általában 1024-2048 – de egyetlen képpont-sort tartalmaznak. A vonalkamera egyetlen képsora megfelel a megfigyelt vonal minden egyes pontjában a fényerő értékének egydimenziós leképezésének. A szürkeárnyalat (vagy szín) minden hirtelen változása megfelel a célobjektum egy élén levő pontnak. Ezen változás érzékelésével precíz mérést végezhetünk, köszönhetően a szenzor

magas felbontásának, ami általában nagyobb a hagyományos (terület) szenzorok felbontásánál. Másik kiemelkedő tulajdonsága a vonalkamerának a nagy sebesség. A hagyományos kétdimenziós képszenzorok általában csak néhány száz képet tudnak készíteni másodpercenként, különösen nagy felbontás esetén, míg a vonalszenzorok több ezer „kép” készítésére képesek ezen idő alatt. A nagy érzékelési sebesség alkalmassá teszi ezeket az eszközöket rezgésmérésre, ha a frekvencia 1 kHz alatt van és az amplitúdó elég nagy – a szenzor felbontásának megfelelően – a tizedmilliméteres tartománytól néhány milliméterig. A vonalkamerás méréshez szükség van kiegészítő eszközökre, egy megfelelő teljesítményű számítógépre, megfelelő szoftverekre és a kamera típusától függően esetleg illesztőkártyára (frame grabber) is. Hátránya, hogy ipari környezetben nem túl praktikus egy számítógépet és kábeleket elhelyezni egy termelő gép munkaterében. [2]

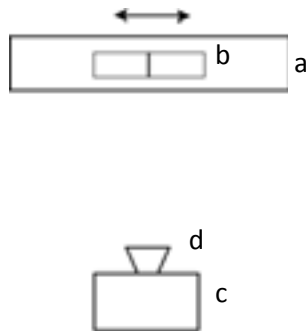
## 2.4. Speciális eszközök

A vonalkamerás mérési módszer továbbfejlesztéseként egy egyedi mérőeszköz fejlesztésébe kezdtem, amely képes elmozdulás- és rezgésmérésre néhány milliméteres amplitúdó esetén, 0.01 mm felbontással és kb. 5 kHz maximális frekvencia mellett. Az eszköz alapja egy Xilinx Spartan 3E FPGA, egy CCD jelprocesszor és egy Toshiba 2048 képpontos vonal-CCD szenzor. A rezgésmérés eredményei egy LCD kijelzőn kerülnek megjelenítésre és a későbbi feldolgozás és tárolás céljára microSD memóriakártyára menthetők. Az FPGA (Field Programmable Gate Array) egy speciális integrált áramkör, amely egy adott feladatnak megfelelően szabadon programozható. A programozás (konfiguráció) speciális, ún. hardver leíró nyelven (HDL, Hardware Description Language) történik. Az FPGA programozható logikai komponenseket tartalmaz, melyek programozható (átkonfigurálható) kapcsolat hierarchiával köthetők össze. Minden ún. logikai blokk komplex kombinatorikai függvények elvégzésére képes, vagy egyszerű logikai kapuként működik. A legtöbb FPGA-ban a logikai blokkok között megtalálhatók memória egységek, flip-flopok, illetve komplett memória blokkok.

## 3. A TERVEZETT ESZKÖZ

A tervezett eszköz alapvető feladata egy jelzés érzékelése a rezgő felületen. Az elrendezés az 1. ábrán látható. A célfelületen elhelyezett jelzés képe – egy vékony vonal – egy megfelelő optikán keresztül a vonalszenzorra kerül. A szenzor analóg kimenőjelét egy 16 bites adattá konvertálja a CCD jelprocesszor, amely ebben az esetben gyakorlatilag analóg-digitális

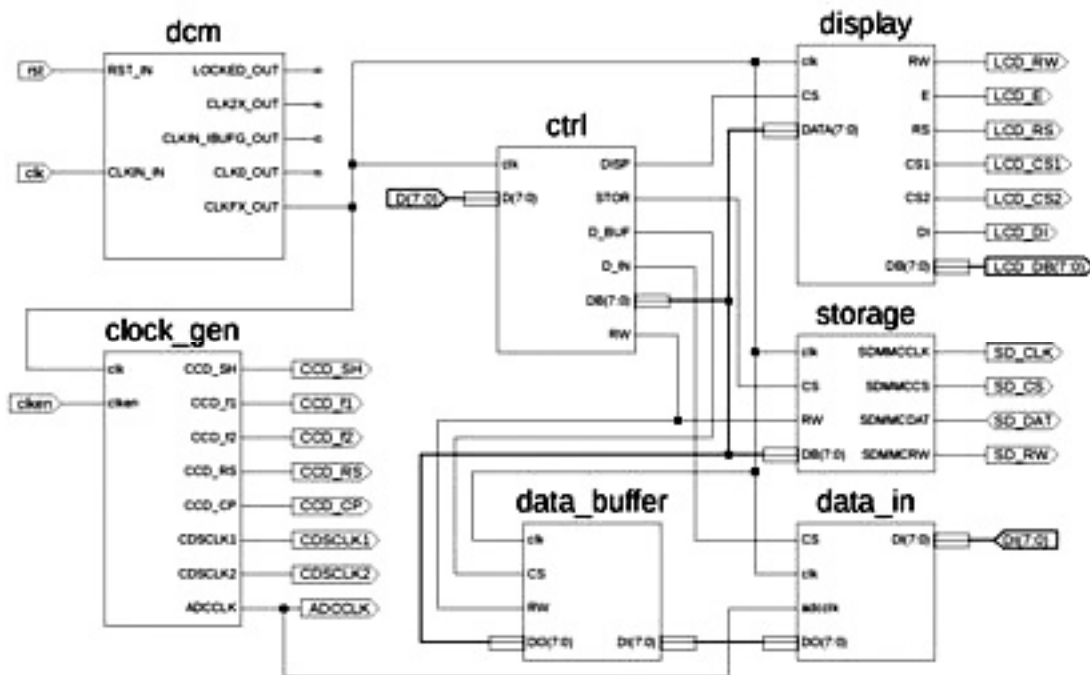
átalakítóként (ADC) üzemel. Ezt a digitális jelet dolgozza fel az FPGA-ba programozott egyik modul. Megkeresi a jelzést a képen és meghatározza annak pozícióját. Mivel az optika paraméterei ismertek, a képpont pozíciók átszámíthatók pontos pozíciókká.



1. ábra. A tervezett mérési elrendezés (a: céltárgy, b: jelzés, c: mérőeszköz, d: optika)

Megfelelő számú kép elemzése alapján a rezgés paraméterei megállapíthatók, ezek az eredmények megjeleníthetők és tárolhatók. Mivel az eszköz nem

tárol minden képpont-adatot, csak képenként – azaz adott időközönként – egyetlen pozícióadatot, a kapott adatmennyiség könnyen tárolható és továbbítható, nem igényel nagy sávszélességet. A munka első lépése a CCD szenzorhoz szükséges órajelek és szinkronjelek előállítás. A következő lépés az adat kiolvasása a CCD jelprocesszorból, amely a szenzor analóg jelét digitalizálja nagy sebességgel. Ez után a lépés után előáll a képpontokat reprezentáló tömb. Eddig a lépésig az eszköz nagyjából egy hétköznapi vonalkamerának felel meg. A vonalkamerák a képszennorről leolvasott adatokat egy átmeneti tárolóban tárolják, majd továbbítják valamilyen illesztőfelületen a számítógéphez, mely az adatokat feldolgozza. Az összes képpont adatának továbbítása rendkívül nagy adatátviteli sebességet és nagy adattároló kapacitást követel meg. A tervezett eszköz legfontosabb tulajdonsága, hogy okos, vagyis a szenzorról kapott adatokat feldolgozza, elemzi és a mérés eredményét adja vissza kijelzőjén, vagy a memóriakártyán. A tervezett eszköz blokkdiagramja a 2. ábrán látható.



2. ábra. Az eszköz tervezett blokkdiagramja

Az eszköz néhány modulját az alábbiakban ismertetem. Az egyik legfontosabb modul a „clock\_gen” nevű órajelek-generátor egység. Ez állítja elő a CCD képszennor számára szükséges órajeleket, valamint a jelprocesszor működéséhez és szinkronizálásához szükséges szinkronjeleket. A második fontos egység a „ctrl” nevezetű, amely összefogja, összehangolja a többi

modul működését és elosztja a feladatokat. Az adatok mintavételezéséért a „data\_in” egység a felelős, ez veszi az adatokat a jelprocesszortól, ellenőrzi azokat, illetve szükség esetén átmeneti tárolóba helyezi azokat. Az átmeneti tárolót a „buffer” nevű modul szolgáltatja, mely nagy sebességű, ún. Block RAM-ból kialakított memória egység. Az adatok kijelzését a „display”

modul végzi, ez kezeli az LCD kijelzőt és néhány – a kezeléshez szükséges – nyomógombot. A mérés során gyűjtött és feldolgozott adatok, azaz a mérés eredménye memóriakártyára menthető, ennek kezelését végzi a „storage” modul. Az eszköz fizikailag két nyomtatott áramkörtől áll, az egyik tartalmazza az FPGA-t és a hozzá szükséges órajel- és tápáramköröket, a másik pedig a vonal-CCD szenzort, a jelprocesszort és néhány jelszint-illesztő áramkört. Az alkalmazott Toshiba TCD1209 vonal-CCD képszensor egy nagysebességű, 2048 képpontot tartalmazó, nagy érzékenységgel rendelkező áramkör, képpont elemei  $14 \times 14 \mu\text{m}$  méretűek [3]. A jelprocesszor egy Analog Devices AD9826 integrált áramkör, amely képes szürkeárnyalatos, vagy színes CCD képérzékelők analóg jelének fogadására és digitalizálására [4].

#### 4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A leírt munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt támogatásával az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében készült el. A megvalósítást az Európai Unió és az Európai Szociális Alap támogatta.

#### 5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A. Kovács, “Roncsolásmentes vizsgálatok, azok megbízhatósága és következményei, rezgésmérések és rezgésvizsgálatok” Miskolci Egyetem, Hungary, 1999.
- [2] “Basler Runner user's manual for GigE Vision cameras”, Basler Vision Technologies, Inc, 2011.
- [3] Toshiba TCD1209D CCD Linear Image Sensor datasheet, Toshiba Corporation, Japan, 2001.
- [4] AD9826 Imaging Signal Processor datasheet, Analog Devices, Inc, Norwood, MA, USA, 2001.

## KÖNYVISMERTETÉS

A kolozsvári székhelyű Erdélyi Múzeum-Egyesület 2009-ben ünnepelte alapításának 150. évfordulóját és tevékenységi körén belül, a Műszaki Tudományos Füzetek sorozatban rendszeresen ad ki színvonalas könyveket. Az elmúlt évben jelent meg Kolozsvárott **Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő: Hegesztéstechnológia I. (Eljárások és gépesítés, ISBN 978-606-8178-06-6), Bagyinszki Gyula, Bitay Enikő: Hegesztéstechnika II. (Berendezések és mérések, ISBN 978-606-8178-06-6),** valamint **Máté Márton: Műszaki mechanika – Kinematika (ISBN 978-606-8178-10-3)** című könyve. A Hegesztéstechnológia első kötete ismerteti a hegesztési és vele rokon technológiákat (forrasztás, felületbevonás). Ezt követi a hegesztés gépesítési lehetőségeinek bemutatása, melynek keretén belül foglalkozik a hegesztő robotokkal, a hegesztőkészülékekkel és a hegesztés automatizálásával. A második kötet az elektromosságtani ismeretek után részletesen bemutatja a hegesztés elektromos berendezéseit, majd ezt követően tárgyalja a hegesztéshez kapcsolódó mérés-, irányítás- és biztonságtechnikai tématerületeket. Mindkét kötetet gazdag ábraanyag illusztrálja és bőséges irodalmi hivatkozás egészíti ki. A kiadványokat eredményesen használhatják felsőfokú intézmények hallgatói, valamint gyakorlati szakemberek.

A műszaki mechanika kinematika fejezetével foglalkozó könyv három fejezetre tagolódik. Az első rész az anyagi pont kinematikájával, a második a merev testek kinematikájával és a harmadik a relatív mozgással foglalkozik. Az ismeretek elsajátítását szemléletes ábraanyag segíti. A könyv hasznos segítséget nyújt egyetemi hallgatóknak a tananyag elsajátításában, illetve a tématerület iránt érdeklődők számára.

A sorozat eddig megjelent kötetei: Jodál Endre: *Számítástechnika az ezredforduló küszöbén*, Pálfalvi Attila: *Porkohászat*, Bagyinszki Gyula-Bitay Enikő: *Bevezetés az anyagtudományok informatikájába*, Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés és modellezés*, Bagyinszki Gyula-Bitay Enikő: *Felületkezelés*, Forgó Zoltán: *Bevezetés a mechatronikába*, Tolvaly-Roska Ferenc: *A számítógépes tervezés alapjai. AutoLisp és Autodesk Inventor alapismeretek*.

Dr. Timár Imre

# NÉGY SZABADSÁGFOKÚ ROBOT INVERZ KINEMATIKAI VIZSGÁLATA

## INVERSE KINEMATICS OF A 4 DOF ROBOT

Olasz Attila<sup>\*</sup>, Dr. Szabó Tamás<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

*This paper deals with the inverse kinematics of a 4 DOF hydraulic robot to provide the reference inputs for the control system. The solutions are given both for upper and lower elbow positions. The reference values are the rotation angles of the four joints. The motion of the end effector can be prescribed with straight lines and arcs. Computer code has been developed in SCILAB program system.*

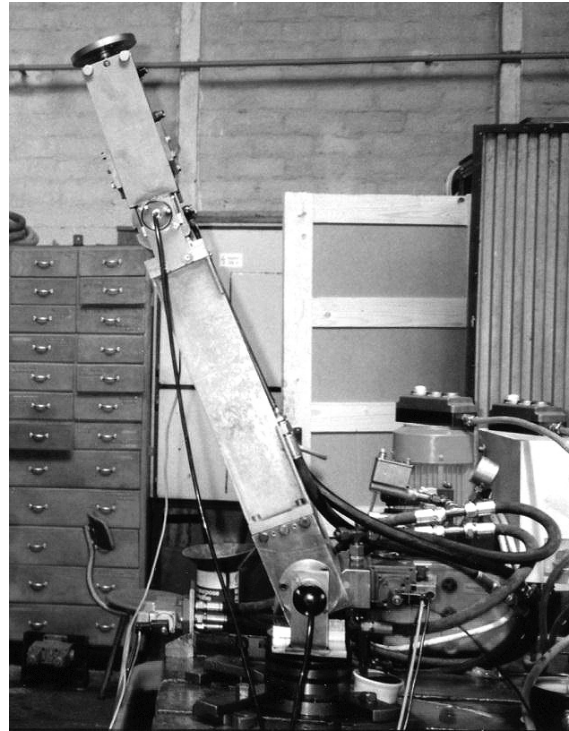
### 1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke rendelkezik egy saját készítésű, hidraulikusan vezérelt robottal, mely négy szabadságfokú. A robot előírt pályán való mozgását a csuklók megfelelő szögelfordulásaival érhetjük el. Ezen szögelfordulások szolgáltatják a vezérlés számára az alapjeleket. Az alapjelek meghatározása az inverz kinematikai feladat megoldására épül. A cikkben az adott robot direkt kinematikai és az inverz kinematikai feladat analitikus megoldásával foglalkozunk. A kinematikai leíráshoz a Denavit-Hartenberg paramétereket alkalmazzuk. A robot négy szabadságfokú mozgását négy csukló valósítja meg, melynek szimbolikus jelölése: RRRR (R - Rotation). A kinematikai leírás végső célja a robot vezérlés működtetése.

A cikk harmadik pontjában a Denavit-Hartenberg paraméterek felhasználásával előállítjuk a robot helyzetét meghatározó helyzetmátrixokat. A negyedik pontban a robot inverz kinematikai feladatát analitikusan vizsgáljuk. A csuklók szögét egyszerű geometriai megfontolások alapján állítjuk elő trigonometrikus függvények segítségével. Az ötödik pontban egy példát mutatunk be a robot lehetséges alkalmazására.

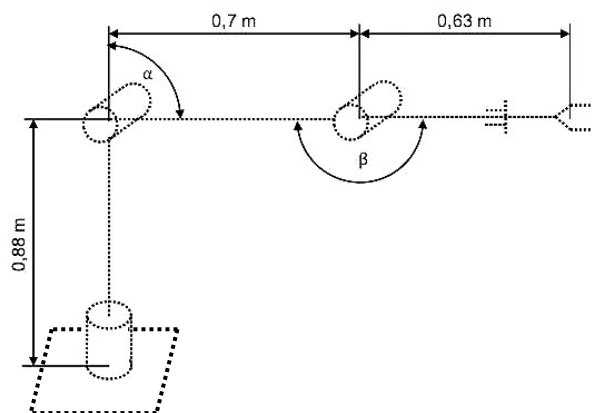
### 2. A ROBOT BEMUTATÁSA

A hidraulikus vezérlésű robot az 1. ábrán látható négy csukló segítségével valósítja meg a mozgásokat. Az ábrán látható robot alapján készítettünk egy egyszerűsített vázlatot (2. ábra), amely megmutatja a robot csuklóinak helyzetét és az egyes karok méretét.



1. ábra. A vizsgált hidraulikus robot

A mechanizmus a mozgása során nem tudja lefedni az egész szögtartományt, csak az  $\alpha = 0..90^\circ$  és  $\beta = 90^\circ..180^\circ$  intervallumot. Ebből következik, hogy a robot csak korlátozott mozgásmegvalósításra képes.



2. ábra. A robot egyszerűsített modellje

<sup>\*</sup> MSc-s hallgató, Miskolci Egyetem

<sup>\*\*</sup> egyetemi docens, Robert Bosch Mechatronikai Tanszék, ME

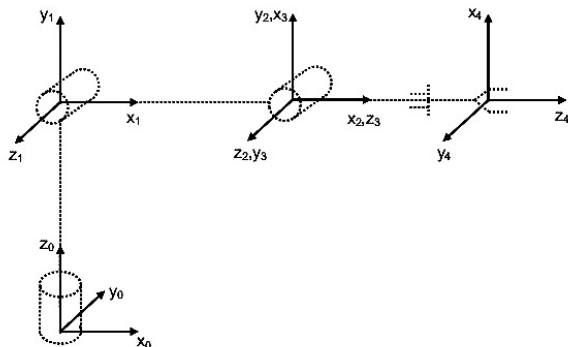
Az egyes csuklók és tagok tömegét a [3] irodalomból vettük át:

- az első tag tömege:  $m_1 = 20$  kg,
- a harmadik csukló tömege:  $m_2 = 15$  kg,
- a második tag tömege:  $m_3 = 12$  kg,
- a negyedik csukló tömege:  $m_4 = 5$  kg,
- a megfogó tömege:  $m_5 = 5$  kg.

A 2. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy ez egy RRRR felépítésű robot, hiszen a mozgásokat négy csuklóval valósíthatjuk meg. Az ilyen egyszerű robotot szokás könyök-robotnak (elbow manipulator, [2]) is nevezni.

### 3. A ROBOT DIREKT KINEMATIKÁJA

A robotkarok egymáshoz viszonyított helyzetének megadása érdekében minden robotkarhoz rögzítünk egy ún. belső koordináta-rendszert. A karok egymáshoz viszonyított helyzetét a 3. ábrán látható koordináta-rendszerek közötti transzformációval írjuk le.



3. ábra. A robot belső koordináta-rendszere

A koordináta-rendszerek helyzetének leírására az ún. Denavit-Hartenberg paramétereket használjuk ([1]), melyek értelmezése a következő:

- $s_k$  a  $z_{k-1}$  és  $x_k$  tengelyek metszéspontjának  $z_{k-1}$  koordinátája;
- $\Theta_k$  a  $z_{k-1}$  tengely körüli forgás előjeles szöge, amely az  $x_{k-1}$  tengelyt az  $x_k$  tengelybe viszi;
- $\alpha_k$  az  $x_k$  tengely körüli forgás előjeles szöge, amely a  $z_{k-1}$  tengelyt a  $z_k$  tengelybe viszi;
- $a_k$  a  $z_{k-1}$  és  $z_k$  tengelyek távolsága.

A Denavit-Hartenberg paraméterek rendre a következő négy egymás utáni merevtestszerű relatív mozgásnak felelnek meg:

1. eltolás a  $z_{k-1}$  tengely irányában ( $s_k$  értékkel);
2. forgás a  $z_{k-1}$  tengely körül ( $\Theta_k$  szöggel);
3. forgás az  $x_k$  tengely körül ( $\alpha_k$  értékkel);
4. eltolás az  $x_k$  tengely irányában ( $a_k$  értékkel).

Ezek a mozgások a fentiek szerint a  $\underline{\underline{H}}_{s_k}$ ,  $\underline{\underline{H}}_{\Theta_k}$ ,  $\underline{\underline{H}}_{\alpha_k}$ ,  $\underline{\underline{H}}_{a_k}$  transzformációs mátrixokkal írhatók le, melyeknek az ugyanebben a sorrendben vett szorzata a

$$\underline{\underline{H}}_{k-1,k} = \underline{\underline{H}}_{s_k} \underline{\underline{H}}_{\Theta_k} \underline{\underline{H}}_{\alpha_k} \underline{\underline{H}}_{a_k} \quad (1)$$

kifejezéssel írható le.

A mátrixszorzásokat elvégezve egy egyszerűbb alakhoz jutunk [1], ahol a  $c = \cos$ ,  $s = \sin$  rövidítéseket alkalmazzuk:

$$\underline{\underline{H}}_{k-1,k} = \begin{bmatrix} h & r & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{k-1,k} = \begin{bmatrix} c\Theta_k & -s\Theta_k c\alpha_k & s\Theta_k s\alpha_k & a_k c\Theta_k \\ s\Theta_k & c\Theta_k c\alpha_k & -c\Theta_k s\alpha_k & a_k s\Theta_k \\ 0 & s\alpha_k & c\alpha_k & s_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A  $k$ -adik tag állványhoz viszonyított helyzete a relatív helyzetmátrixok szorzataként nyert

$$\underline{\underline{H}}_{0k} = \underline{\underline{H}}_{01} \underline{\underline{H}}_{12} \dots \underline{\underline{H}}_{k-1,k} = \prod_{j=1}^k \underline{\underline{H}}_{j-1,j} \quad (3)$$

helyzetmátrixszal adható meg. Ebből  $k = n$  behelyettesítésével a zárótag  $\underline{\underline{H}}_{0n}$  helyzetmátrixát kapjuk, ahol esetünkben  $n = 4$ .

A zárótag bármely  $\underline{\underline{R}}_n$  helyvektorának az állványhoz kötött koordináta-rendszerre vonatkozó koordinátái az  $\underline{\underline{R}}_0 = \underline{\underline{H}}_{0n} \underline{\underline{R}}_n$  összefüggéssel számíthatók.

### 4. INVERZ KINEMATIKAI FELADAT

Ebben a pontban a zárótaghoz kötött koordináta-rendszer-origó helyzetének és a koordináta-rendszer  $\underline{\underline{R}}$  orientációjának ismeretében keressük az egyes csuklók  $\Theta_k$  szögelfordulásait.

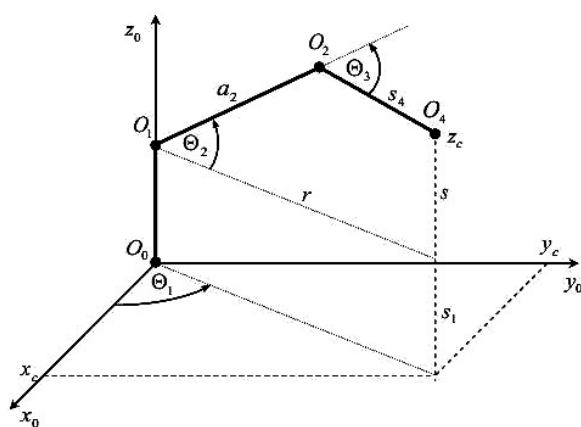
Az inverz kinematikai feladatot általános esetben numerikusan szokás kezelni [1]. Az ipari robotok gyakran hat szabadságfokúak, az első három csukló a zárótag helyzetét határozza meg, míg az utolsó három a zárótag orientációját. A robot helyzetét és orientációját egymástól függetlenül vizsgálhatjuk. Azoknál a robotoknál, melyeknek hat csuklója van, és az utolsó három csukló tengelye egy pontban keresztezi egymást - így gömbcsuklót alkotnak - a feladatot felbontjuk inverz kinematikai helyzetre és inverz kinematikai orientációra. Az

általunk vizsgált robot négy szabadságfokú, így a kinematikai szétválasztás nem szükséges. A negyedik csukló szögelfordulása a zárótag koordináta-rendszer origójának helyzetét nem befolyásolja. Így az első három csukló szögelfordulását kell meghatároznunk.

A szögek meghatározásához a trigonometrikus függvényeket hívjuk segítségül. A  $\Theta_1$  kiszámítását a 4. ábra alapján végezzük el, mely a csuklókat és a tagokat az  $x_0 - y_0$  síkban ábrázolja. A  $\Theta_1$ -re a következő trigonometrikus alakot írhatjuk fel:

$$\Theta_1 = a \tan 2(y_c, x_c). \quad (4)$$

Az  $a \tan 2$  függvény alkalmas arra, hogy egy síkvektor  $y$  és  $x$  koordinátáiból kiszámítsuk a vektor irányszögét.



4. ábra. A robot az  $x_0 - y_0 - z_0$  térben

Az  $O_1$ ,  $O_2$  és  $O_4$  pontok által meghatározott háromszögre a koszinusztételt alkalmazzuk. Megjegyezzük, hogy a háromszög  $O_2$  pontjában lévő szög negatív koszinusza megegyezik a  $\Theta_3$  szög koszinuszával. Így

$$\cos \Theta_3 = \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - s_4^2}{2a_2s_4}. \quad (5)$$

Mivel  $r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$  és  $s = z_c - s_1$ , az előző egyenlet a következő alakban is felírható:

$$\cos \Theta_3 = \frac{r^2 + (z_c - s_1)^2 - a_2^2 - s_4^2}{2a_2s_4} = D. \quad (6)$$

Ezek után a  $\Theta_3$  szög:

$$\Theta_3 = a \tan 2\left(\pm \sqrt{1 - D^2}, D\right) \quad (7)$$

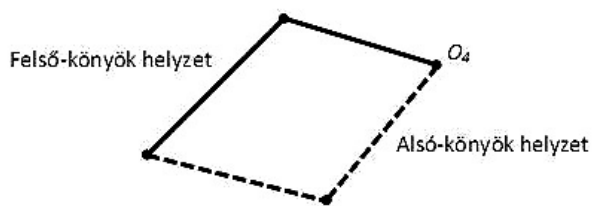
Azért lehetséges két megoldás, mert a kar állhat felső-könyök helyzetben vagy alsó-könyök helyzetben, attól

függően, hogy a célpontot felülről vagy alulról szeretnénk megközelíteni (5. ábra). Felső-könyök állás esetén

$$\Theta_3 = a \tan 2\left(-\sqrt{1 - D^2}, D\right),$$

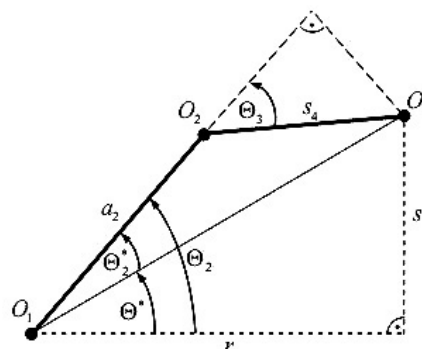
$$\text{alsó-könyök állás esetén}$$

$$\text{pedig } \Theta_3 = a \tan 2\left(+\sqrt{1 - D^2}, D\right).$$



5. ábra. Könyök helyzetek

Az előzőhöz hasonlóan a  $\Theta_2$ -t is geometriai úton kaphatjuk meg a 6. ábra alapján.



6. ábra. A második tag helyzetének geometriai viszonyai

$$\Theta_2 = \Theta^* - \Theta_2^* \quad (8)$$

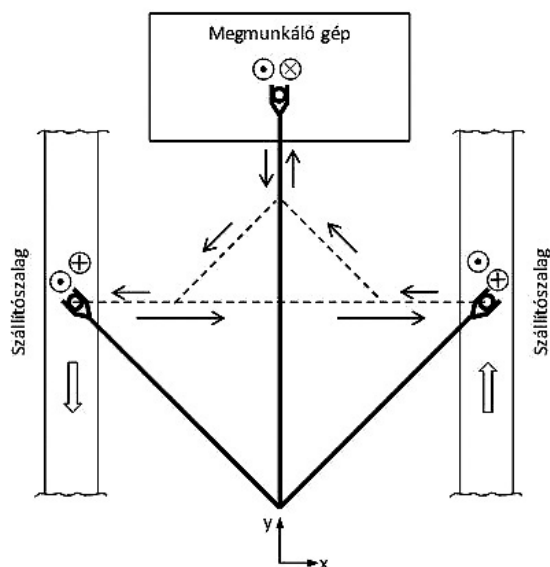
$$\Theta_2 = a \tan 2(s, r) - a \tan 2(s_4 \sin \Theta_3, a_2 + s_4 \cos \Theta_3) \quad (9)$$

## 5. PÉLDA

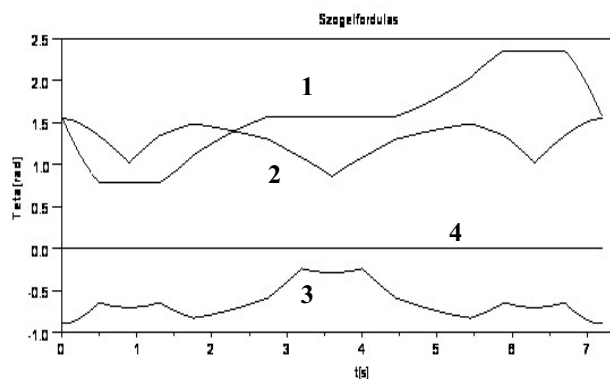
Az ismertett elméletek alapján számítógépi programot készítettünk SCILAB 5.2.1 rendszer alatt. A program alkalmas a zárótag előírt pályája és orientációja alapján a robot helyzeteinek, sebességállapotainak és nyomatékainak meghatározására. A továbbiakban egy olyan mintafeladatot vizsgálunk, amelyben előírjuk a robot zárótagjának pályáját.

A 7. ábrának megfelelően, a robot egy háromszög alakú pályán halad végig. Alaphelyzetéből elindul a szállítószalag felé, ahol egy  $z$  tengelyirányú mozgással megfog egy munkadarabot. A munkadarabot a szaggatott vonal mentél elviszi a megmunkáló gépbe. A megmunkálás után egy másik szállítószalagra viszi a munkadara-

bot, ahol az alkatrész távozik a munkatérből. A robot a mozgása során végig felső-könyök helyzetben mozog.



7. ábra. A robot előírt pályája

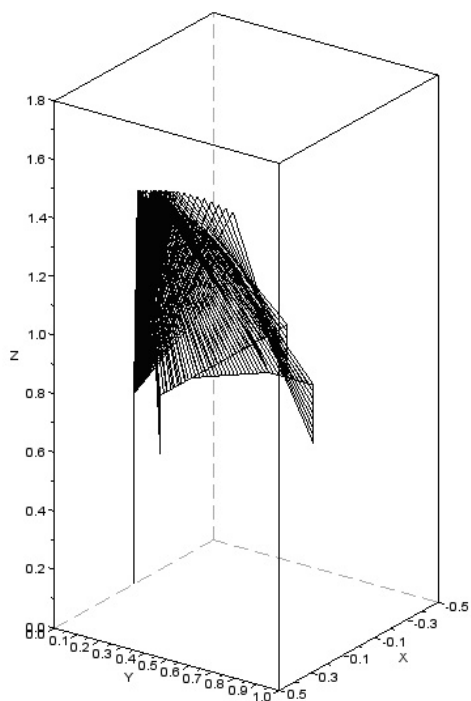


8. ábra. A csuklók szögelfordulásai

A 7. ábrán vázolt előírt elmozdulást a csuklók 8. ábrán bemutatott szögelfordulásai valósíthatók meg, ahol az egyes csuklók szögelfordulásait rendre 1, 2, 3, 4-el jelöljük. Ezek a szögelfordulás függvények a robot vezérlésének az alapjelei.

A csuklók szögelfordulásainak ismeretében a program képes meghatározni a direkt kinematikai feladatot, azaz a robot egyes helyzetait, amelyet a 9. ábra szemléltet. Az ábra a felső-könyök helyzethez tartozó megoldásokat mutatja. A robot konstrukciója kizárja az alsó-könyök helyzetű mozgások megvalósítását.

Megjegyezzük, hogy a szögelfordulási függvények idő szerinti numerikus deriválásával előállíthatók a csuklók szögsebességei és szöggyorsulásai is. Ezen kinematikai mennyiségek ismeretében a merev testekből álló rendszer dinamikai feladata is vizsgálhatóvá válik.



9. ábra. A robot helyzetei  $(x, y, z [m])$

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy négy szabadságfokú robot inverz kinematikai feladának megoldásával foglalkozott. A csuklók szögelfordulásait zárt alakú formulákkal adtuk meg. A bemutatott elmélet alapján SCILAB rendszer alatt egy program került kidolgozásra, amely meghatározza a robot előírt mozgásait biztosító alapjeleket a vezérlés számára.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B.10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 8. IRODALOM

- [1] KIRÁLY B.: Ipari robotok kinematikai és dinamikai elemzése, Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem, Miskolc, 1995.
- [2] MARK W. SPONG, SETH HUTCHINSON, M. VIDYASAGAR: Robot Modeling and Control
- [3] KILLER L.: Hidraulikus robotkar átalakítása, Szakdolgozat, SZG-2009-07., Szerszámgépek Tanszéke, 2007.

# CNC LEMEZMEGMUNKÁLÓ GÉPEK

## CNC SHEET METAL MACHINES

Dr. Jakab Endre\*, Lénárt József\*

### ABSTRACT

In recent times, the significance of CNC sheet metal machines and devices has increased because of the growing use of components made of sheet metal. In this article we introduce the plate shears and plate bending machines.

### 1. ELŐZMÉNYEK

A cikkben a táblalemez ollókat és lemez hajlítógépeket mutatjuk be az [1] cikk folytatásaként. Ezeket a berendezéseket széles körben alkalmazzák a különböző sorozatnagyságú lemezalkatrészek gyártásában.

### 2. CNC LEMEZMEGMUNKÁLÓ GÉPEK

#### 2.1. Táblalemez ollók

A síklemezek vágását legtöbbször mozgó ferde élű és álló egyenes élű szerszámok között végzik. A táblalemez ollók síklemezek egyelőketű, egyvonalú nyíróvágására szolgálnak, és viszonylag egyszerű berendezések. A vágókés mozgása egyenes vonalú, vagy köríves. A ma gyártott gépek többsége hidraulikus működtetésű. A lemezvágás legnagyobb erőszükséglete pl. az alábbiak szerint közölt összefüggéssel [3] határozható meg:

$$F_v = k_v \tau_m A_{ny} = k_v \tau_m \cdot 0,5 \cdot s^2 \cdot \text{ctg} \alpha, \text{ ahol} \quad (3.1),$$

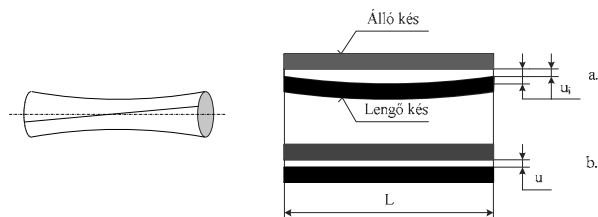
$k_v$	korrekciós tényező	$k_v = (1 + 0,05 \cdot \alpha)$
$\tau_m$	lemezanyag nyírószilárdsága	(MPa),
$A_{ny}$	nyírt keresztmetszet	(mm <sup>2</sup> ),
$s$	lemezvastagság	(mm),
$\alpha$	vágószög	(°).

Legnagyobb vágóerő  $B > 10 \cdot s$ -nél adódik. Az  $\alpha$  vágószög értéke szerkezeti acél lemezek vágásánál általában  $1^\circ 30' - 3^\circ$  közötti, ezért a  $\text{ctg} \alpha \approx 1/\alpha$  rad helyettesítés megtehető. A helyes  $\alpha = \alpha_n$  vágószög beállítástól függ az, hogy a vágott lemez sík, vagy görbült lesz (1. ábra).



1. ábra. Vágószög hatása a lemez alakjára

Köríves (lengő) vágásnál, hasonlóan az ún. repülő ollós vágásokhoz, az újonnan felszerelt mozgó kés élének beállítása szükséges az egyenes  $u$  vágórés (késhez) biztosításához. A forgástengelyhez képest kívül és ferdén elhelyezkedő késél  $u_i$  forgási hiperboloidot írna le, ezért az  $u_i$  vágórés a kés hossza mentén változna (2.a ábra). Kiküszöbölésére a mozgó kést a vágó él mentén a szükséges mértékben előfeszítik (2.b ábra). A ma gyártott táblalemez ollók többségénél az egyenes vonalú gerendamozgatást két párhuzamvezérelt hidraulikus henger végzi. A vágórés és vágószög, lökethossz beállítások automatikusak és ellenőrzöttek.



2. ábra. Vágórés alakulása lengő vágásnál



3. ábra. Paraméterek beállítása (Trumpf)

\* tanársegéd, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Tanszék

Egy CNC olló képernyője (3. ábra) szerint a vágórés 0,10 mm-re való beállítását végzik, majd hátsó lemezütközö helyzetének beállítása következhet az előírt lemez-hosszúságnak megfelelően. A 4. ábra egy korszerű táblalemez olló nézeti képét mutatja [4]. Az ollókat különböző biztonsági- és segédberendezésekkel szerelik fel az igényeknek és a sorozatnagyságoknak megfelelően. Lemezrendező rendszerekkel kiegészítve gyártócellák hozhatók létre.



4. ábra. Táblalemez olló (Trumpf-EHT)

## 2.2. Lemezhajlító gépek

### 2.2.1. Lemez élhajlító gépek

A hajlítóüreges lemez élhajlító gépek paramétertartománya igen széles. A CNC lemez élhajlító gépeken változatos munkadarab alakok állíthatók elő. A gépek többsége „C” állványos és hidraulikus működtetésű, mint az 5. ábra szerinti gép is. A rugalmas automatizálás eredményeként nőtt:

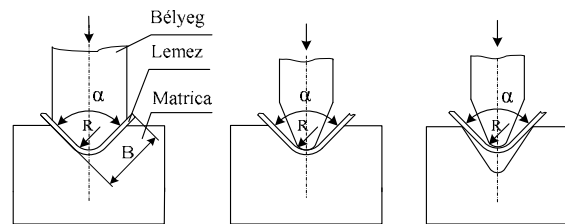
- az élhajlító gépek egyetemességi foka, a technológiai lehetőségek kiszélesedtek,
- az irányított tengelyek és funkciók száma,
- a termelékenység és gazdaságosság,
- a megmunkálások pontossága,
- ugyanakkor csökkent a raktárkészlet (ütemezett gyártás), a szubjektív tényezők szerepe, a lemez mozgatóból adódó fizikai terhelés.



5. ábra. Lemez élhajlító gép (Trumpf)

A gép hegesztett tartószerkezete kétoldali főtartóból és azokat összekötő merevítő gerendákból áll. A felső merevítő elem a hidraulikus tartálynak és hajtásnak ad helyet, az alsó merevítésre épül a matricát hordozó asztal. Az állványra épülnek továbbá:

- a hidraulika tápegységről működtetett hidraulikus hengerek (2, ritkábban 4 db), amelyek a bélyeget hordozó gerendát mozgatják,
- a matrica és a matricát hordozó készülékek,
- a hajlítás helyét biztosító ütközőrendszer,
- a hajlítást segítő támaszok és ütközők,
- további kiegészítő egységek (pl. fényrács, matrica állító, vagy matrica előfeszítő egységek).



6. ábra: Hajlítóüreges lemezhajlítás típusai

A 6. ábra szerinti hajlító üreges hajlítások típusai balról jobbra: sülyesztékes, felsőszülyesztékes és szabad hajlítás [3]. Megmunkáláskor a hajlítás *szögét* és *helyét* kell biztosítani. A hajlítás szögét a matrica rögzített helyzete és alakja mellett a hajlító gerenda-bélyeg együttes alsó véghelyzete határozza meg lökethossz, vagy lökethelyzet állítással, amelynek megoldásai igen változatosak. A 6. ábra baloldala szerinti zárt hajlításoknál a hengerek dugattyúi nem mennek le alsó véghelyzetükbe, ui. az alsó helyzetet a szerszámok és a lemez zárt kapcsolódása határozza meg. A mai gépeken a két henger párhuzamfutását elektro-hidraulikus szabályozóköörökkel és legtöbbször két irányított tengellyel (Y1 és Y2) oldják meg. A szabad hajlítás erőszükséglete pl. az alábbi összefüggéssel határozható meg [3]:

$$F_h = \frac{k_s \cdot L \cdot R_m \cdot s^2}{b} = \frac{(1,33 - 1,6) \cdot L \cdot R_m \cdot s^2}{b} \quad (3.2)$$

ahol

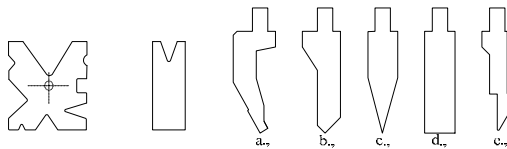
- $k_s$  korrekciós tényező (1,33-1,6),
- $L$  lemez szélesség (mm),
- $R_m$  lemezanyag szakítószilárdsága (MPa),
- $s$  lemez vastagság (mm),
- $b$  matrica hajlítóéleinek távolsága (mm).

A gyártók a V-alakú zárt hajlításra vonatkozó  $F_h$  erőszükségletet rendszerint 1000 mm szélességű, 400 MPa szakítószilárdságú acéllemezre táblázatban adják meg.

Egy gép vásárlása, telepítése előtt számos feltételt kell biztosítani, mint pl. a kezelő személyzet kijelölése, kiképzése, telepítési hely kiválasztása, szállítási útvonalak, tárolóhelyek meghatározása, gépalapozás előkészítése, energiaellátás megtervezése és kiépítése, szerszámok, üzemeltetési anyagok biztosítása. Legfontosabb azonban a gyártmányok biztosítása a beruházás megtérülése érdekében, és az ehhez szükséges és elégséges gép konfiguráció meghatározása. Itt kell megemlíteni a legújabb fejlesztésű és sikeres, elektromechanikus működetésű élhajlító-gépeket, amelyek gerendáját két szinkronizált villamos motor hajtásán keresztül működtetik.

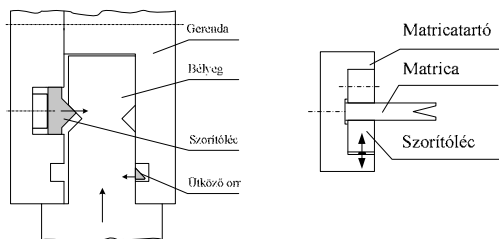
### Szerszámozás

A 7. ábra eltérő matrica és bélyeg alakokat mutat. A négyoldalas, több pofányulású matricák helyett egyre inkább az egy, vagy két pofányulású matricákat használják. Ezeket szélességükben moduláris méretsor szerint alakítják ki, amelyek könnyen kezelhetők és kézzel a szerszámtartókba helyezhetők, majd automatikusan rögzíthetők. Ezzel pl. egy dobozhajlítás összes szükséges oldalhosszának szerszámozása összeállítható az élhajlítógépen, és az egymás utáni hajlítások sorozata elvégezhető.



7. ábra: Matrica és bélyeg alakok

A 8. ábrán korszerű és automatikus bélyeg és matrica felfogás vázlatja látható, amit pl. a Trumpf cég alkalmaz. A bélyegek leesését a felhelyezés után egy rugóval működtetett szerkezet ütköző orra akadályozza meg. A hajlító erőt felveheti a gerendán feltámaszkodó bélyeg végfelülete, vagy az ábra szerint kétoldali válla. A szerszámbehajlás és az ebből adódó hajlítás hibák kiküszöbölésére szolgál az matrica alatti előfeszítő berendezés.



8. ábra: Bélyeg és matrica felfogás

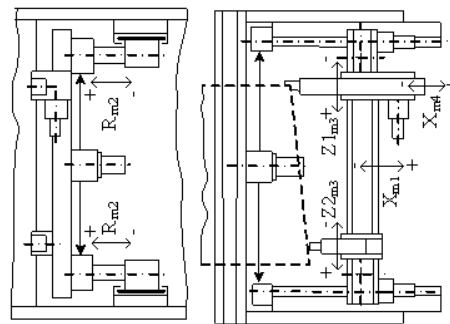
### Hátsó ütközőrendszerek

A hajlítás helyét a hátsó ütközőrendszer határozza meg, amelynek moduláris szerkezetei kialakítása lehetővé teszi a feladatoknak legkedvezőbb és gazdaságos meg-

oldás kiválasztását. Az alapvető beállító mozgások jelölése X, Z és R, amelyek sorrendben a hajlítás helyét, az ütköztetés szélességét és magasságát határozzák meg. Ezek sorrendi változatait az 1. táblázat mutatja [5]. A kódok jelentése: **m**-munkadarab ütköztetése, **1,2,3**-első-, másod- és harmadrendű szán. Az elsőrendű szán a tartóelemre, a másodrendű az elsőrendű szánra, stb. épül. Az irányított tengelyek nagyobb számát a szánok kétszeresítése (pl. Z1 és Z2), továbbá az ütközők kibillentése (B tengely/ek) adhatja. Az X<sub>m1</sub> R<sub>m2</sub> Z1<sub>m3</sub> Z2<sub>m3</sub> X<sub>m4</sub> kódú ütközőrendszer vázlatja a 9. ábrán látható.

1. X <sub>m1</sub> R <sub>m2</sub> Z <sub>m3</sub>	3. Z <sub>m1</sub> R <sub>m2</sub> X <sub>m3</sub>	5. R <sub>m1</sub> X <sub>m2</sub> Z <sub>m3</sub>
2. X <sub>m1</sub> Z <sub>m2</sub> R <sub>m3</sub>	4. Z <sub>m1</sub> X <sub>m2</sub> R <sub>m3</sub>	6. R <sub>m1</sub> Z <sub>m2</sub> X <sub>m3</sub>

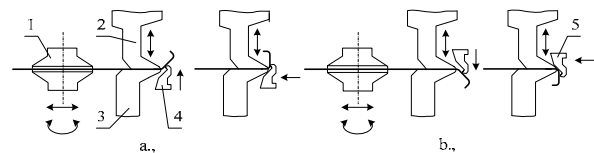
1. táblázat



9. ábra: Hátsó ütközőrendszer példa

### 2.2.2 Lengő mozgású lemez élhajlítógépek

A számítógépes irányítás, a rugalmas automatizálás lehetővé tette a bonyolult, többirányú és többoldali hajlításokat igénylő munkadarabok előállítását teljesen automatizált lemez hajlító központokon, amelynek centrumában a lengő lemez élhajlító gép áll [4]. A lengő lemez hajlítás alapelvét a 10. ábra szemlélteti, amelynek jelölései: 1 -manipulátor, 2 -felső leszorító gerenda, 3 - alsó fix gerenda, 4,5 -hajlító gerenda.



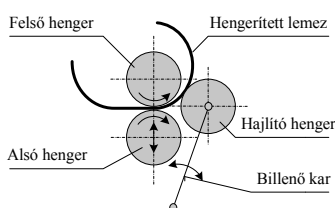
10. ábra: Egy oldalon végzett lengő hajlítás

Az ilyen gépen 2-3 mm vastagságú alkatrészek készülhetnek, mint például elektronikus vezérlőegységek házai, fémajtók- és ablakok, klímaberendezések, világítótestek, konyhai berendezések, orvosi műszerek, pénzkidő automaták fémburkolatai. A lengő mozgású lemez élhajlítógépek alkalmazásának előnyei: igen vékony

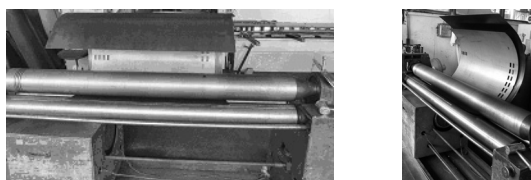
peremek visszahajlíthatók, kivágások közelében is jó minőségű a hajlítás, egymás utáni kismértékű hajlítások sorozatával tetszés szerint sugarak és burkoló profilok hajlíthatók egy kis sugarú szerszámon is, továbbá finom felületű, vagy festett felületű lemezek karcolás és sérülésmentesen hajlíthatók gördülő hajlítással.

### 2.2.3 Lemezhengerítő gépek

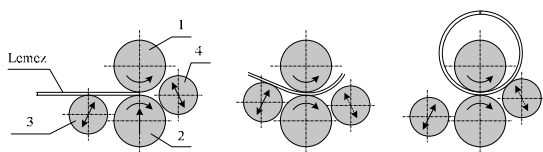
A síklemezek folyamatos hajlító alakítása (szabadalakítása) forgó szerszámmozgással, merev hengerekkel történik. A hengerítés gépein kör keresztmetszetű hengeres (pl. tartályokhoz) és kúp palástú alkatrészeket állítanak elő. A gépek általában 3-4 méter szélesek és azokon max. 10-15 mm vastag lemezek hajlíthatók. A három hengeres hajlítás többféle kinematikai megoldással is kivitelezhető. Leggyakrabban két görgő kap hajtást, ami célszerűen kétirányú az oda-vissza hengerítés érdekében. A görgők állítása lineáris, vagy íves lehet. Egyfajta elrendezést a mozgásokkal a 11. ábra szemléltet. A már kivágásokkal ellátott lemezek hengerítésekor a gyűrődések, repedések elkerülésére külső hajlító segédlemez használtnak (12. ábra), amely visszahengerítés után újra használható.



11. ábra: Három hengeres hajlítási példa



12. ábra: Kivágásokkal rendelkező lemez hengerhajlítása (Fireplace Kft.)

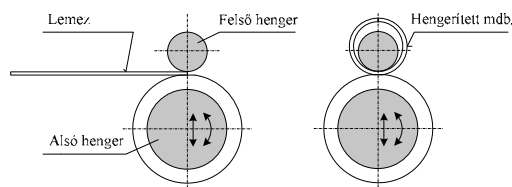


13. ábra: Négyhengeres hajlítás működési elve

A teljesen körívre zárt hajlítás négyhengeres gépeken lehetséges (13. ábra). A hengerhajlító gépek, a hengerek végére szerelt megfelelő hajlító görgőkkel, alkalmasak idomacélok, csövek, kamraprofilok alakítására is. 2

### 2.2.4 Hengerítés merev-rugalmas hengerrel

A 14. ábra merev-rugalmas hengerpárral végzett lemezhengerítés elvét mutatja be. Az alsó hajtott hengert polyurethán réteggel vonják be, amelynek előfeszítése és rugalmas alakváltozása biztosítja a lemez megfelelő sugarú hengerítését. A technológia vékony lemezek (1-5 mm) hengerítését teszi lehetővé, a lemez szélessége általában 500-1500 mm. Különböző átmérők készítéséhez a felső hengert cserélik.



14. ábra: Lemezhengerítés merev-rugalmas hengerrel

## 3. ÖSSZEFOGLALÁS

A technikai megoldásokat a gépészet, elektronika-elektrotechnika, irányítás- és vezérléstechnika és az informatika szinergikus együttműködése jelentősen megváltoztatta a CNC lemezmegmunkáló gépeknél is, ami a piaci versenyben való helytállás esélyeit megnövelte.

### Köszönetnyilvánítás

A kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2 /KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Ezúton is köszönjük a DINAS Kft., Fireplace Kft., VILATI Gyártó Zrt. gyáraknak, hogy náluk üzemi tapasztalatokat gyűjthettünk, továbbá a gépgyártóknak a papíralapú és elektronikus szakmai dokumentációkat.

## 4. IRODALOM

- [1] JAKAB, E., LÉNÁRT, J.: *CNC lemezmegmunkáló gépek*, Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII szemináriuma, Miskolc 2011. nov. I./ p. 68-71.
- [2] JAKAB, E.: *CNC lemezmegmunkáló gépek* Kézirat, Miskolc, 2012.
- [3] BALOGH, A., SCHÄFFER, J., TISZA, M.: *Mechanikai technológiák*, Miskolc, 2007. p. 290
- [4] TRUMPF, WEINBRENNER SALVAGNINI, FIREPLACE: *Papír alapú és elektronikus dokumentációk*
- [5] TAJNAFŐI, J.: *Szerszámgép tervezés II*. Struktúra-képzések Tankönyvkiadó, Budapest, 1990 J14-1688

# NAGY MENETEMELKEDÉSŰ GOLYÓSANYA CNC ESZTERGÁN TÖRTÉNŐ MEGMUNKÁLÁSI LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

## EXAMINATION OF THE MANUFACTURING POSSIBILITIES OF A HIGH PITCH BALL NUT ON CNC LATHE

Kiss Dániel\*, Csáki Tibor\*\*, Makó Ildikó\*\*

### ABSTRACT

*The machining of high pitch ball nuts brings on several problems. For a possible solution we bring out a series of experiments. In the first phase of these experiments we are trying to produce some profile on an outer surface in order to find an appropriate cycle, because suitable cycle can not be accessible*

### 1. BEVEZETÉS

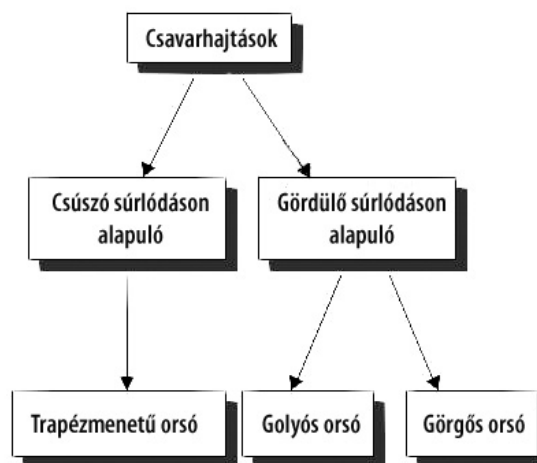
Napjainkban fokozódik az igény a különböző berendezésekben, szerszámgépekben a mozgások sebességének fokozására, elsősorban a mellékidők csökkentése miatt. A fejlesztések mind a mozgást létrehozó motorok sebességének, fordulatszámának növelésére, mind pedig a mozgásátalakítók tulajdonságainak javítására irányulnak. A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékén az igényes pozicionáló rendszerekben gyakran alkalmazott mozgásátalakító, a golyósorsó-golyósanya tulajdonságainak fejlesztésével kapcsolatosan folynak kutatások, együttműködve az eszközök hazai gyártójával, a SZIMIKRON Kft-vel. A kimenő sebesség növelésének egyik módja a menetemelkedés növelése.

Nagy menetemelkedésű golyósorsó gyártása nem jelent különösebb nehézséget a szokványos orsókéhoz képest. Nagy menetemelkedésű golyósanya gyártásánál azonban a hagyományos módszerekkel nagyon könnyen geometriai korlátokba ütközünk: a kőszőrűkő profilját olyan mértékben kellene módosítani, ami már a biztonságos működést veszélyezteti.

A szakirodalomban a probléma megoldására nagyoló megmunkálásként az esztergálást, befejező megmunkálásként a keményesztergálást találtuk. Ebben a dolgozatban azt tűztük ki célunk, hogy megvizsgáljuk,

hogya a rendelkezésünkre álló szerszámgépek tulajdonságai, paraméterei lehetővé teszik-e a golyósanya gyártását, milyen fejlesztések (például speciális szerszám tervezése) szükségesek, illetve milyen pontosság várható a kísérletek során. [3][5][6]

A szerszámgépeken való megmunkálás során a pozicionálás biztosítása a legfontosabb követelmény a munkadarab minősége szempontjából. A munkadarab – gép – szerszám kapcsolatban a szerszám gép szánok mozgásának pontossága függ a szerszám gép kinematikai láncában szereplő vezetékelemek, vezetékek, vezetékekrendszerek kialakításának és beépítésének minőségétől. Azonban nemcsak ezekből - a vezetésből, megtámasztásból származó - hibák, pontatlanságok adódnak át közvetlenül a munkadarabnak vagy a szerszámnak. A munkadarab hibáinak okozója lehet az előtölő hajtás, illetve az azt alkotó gépelemek hibája is.



1. ábra Csavarhajtások csoportosítása

Azt a golyósorsó-golyósanya kapcsolatot, amelyben a golyókat görgőszerű elemek helyettesítik, a további-

\*doktorandusz, Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke

\*\*PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke

akban megfelelő terminológia hiányában görgős orsónak fogjuk nevezni.

## 2. POZICIONÁLÁS

A pozicionáló rendszerek 1-es típusú szabályozókörök, amelyekben állandó sebességgel változó alapjel esetén az alapjel és a szabályozott jel, a kimenő jel közötti különbség, a követési hiba állandósult állapotban az alapjel sebességétől és a szabályozókör körerősítésétől függ. Jól beállított szabályozókörök esetén a programozott pont pályája nem vagy csak nagyon kiértékben tér el a kívánt pályától, csak időbeli eltérés van az alapjelek által meghatározott pont és a programozott pont tényleges helyzete között.

Amikor azonban nem idő-alapú az alapjelpépzés, hanem elektronikus kinematikai láncot hozunk létre a főorsó és a szánok között, mint például menetvágás esetén, akkor ez az időbeli késés nem engedhető meg. A CNC vezérlések ebben az esetben a programozott paraméterek alapján Feed Forward (FF, sebességarányos előreccatolás) algoritmussal biztosítják a nulla követési hibát. Annak eldöntésére, hogy a tanszéken található CTX alpha CNC esztergán ez az algoritmus megfelelően működik-e, forgácsolási kísérletet végeztünk. A kísérletet az egyszerűbb megvalósíthatóság és a könnyebb ellenőrizhetőség érdekében nem anyán, hanem orsó modellen végeztük, a fő célunk a követési hiba sebességfüggetlenségének megállapítása volt.

A kísérlet során 45mm átmérőjű munkadarabon 25 mm menetemelkedésű menetet programoztunk, 300 és 600 fordulat/perc orsófordulattal. Ez 7500 és 15000 mm/perc előtolást jelent, ami egy átlagosnál nagyobb, de még megvalósítható körerősítésnél 2,5 illetve 5 mm követési hibát jelent, vagyis ha nincs FF, akkor mérés nélkül, szemmel láthatóan eltérő pályán halad a szerszám. A kísérleteknél azt tapasztaltuk, hogy a két fordulatszámra a szerszám pályája megegyezik, tehát a sebességarányos előtolás megfelelően van megvalósítva.

A tényleges megmunkálásnál a vágósebesség a fentieknél még nagyobb is lehet, ezért a Z irányú előtolási sebesség is nagyobb. A forgácsolási paraméterek megválasztásánál ügyelni kell arra, hogy az adott gépen érvényes sebességhatárt ne lépjük át, illetve megfelelő biztonsági tartalék is maradjon.

## 3. A FORGÁCSOLÁSI KÍSÉRLET LEÍRÁSA

Következő célunk a megfelelő menetprofil megvalósíthatóságának vizsgálata volt. A kísérleteket külső hengeres felületen végeztük, mert így könnyebben programozható, illetve egyszerűbben ellenőrizhető, hogy a megfelelő profilt képeztük le, és a pozicionáló

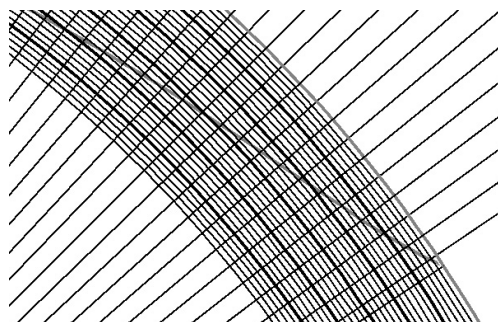
rendszer tesztelésére ez is alkalmas. A beépített menetvágó ciklusok csak szabványos menetprofilok létrehozására alkalmasak, de nem használhatók alakos felületek létrehozására.

A kívánt golyópályát előállító NC program megírására több lehetőség is adódik. Kísérleteinknél azt a megoldást választottuk, hogy a vezérlés (Sinumerik 840D) beépített menetvágó ciklusait alkalmazzuk (mert ezek megfelelő működését a vezérlés gyártója garantálja), de olyan módon, hogy minden ciklust csak 1 fogással hajtunk végre, majd a következő fogáshoz újabb felparaméterezett ciklus hívása következik.

A menetvágó ciklus programozásához szükségünk volt azon indítási pontokra, melyekből a szerszámot indítva, több kis lépésből alakítjuk ki a kívánt golyópályát, mely a kísérlet során egyszerű körprofil (a tényleges golyópálya profilja természetesen ettől eltérő, de a megvalósíthatósághoz szükséges kísérleteket ez az eltérés nem befolyásolja, ezért az egyszerűbb körprofil is elegendő volt). A programozáshoz meg kell adnunk a kezdő, illetve végátmérőt, a fogásvételi mélységet és a szögeltolási értéket. A szögeltolási érték azt jelenti, hogy a főorsó (a C tengely) 0°-os helyzetéhez képest milyen szöggel eltolva kezdődjön az adott fogáshoz tartozó menet.

Ezen pontok meghatározásának lépései a következők voltak:

- 1) 3D modell elkészítése UGS NX 7.5 program használatával
- 2) A szükséges metszetek létrehozása: mivel a szerszám a darab hossz tengelyével párhuzamosan mozog, így nekünk a hossz tengelyre merőleges metszetre van szükségünk, nem pedig a kialakítandó profilra merőleges metszetre.
- 3) Az így kapott metszetet AutoCAD programba exportálva a szükséges szögeltolási és fogásvételi értékekkel ábrázolva megkapjuk a szerszámindítási paramétereket



4. ábra. A kiszerkesztett fogásvételi és szögeltolási értékek metszetei adják a szükséges pontokat

A fogásvételek a menet közepéről indultak 0,5mm fogással és 2° szögeltolással fogásonként, mindaddig, amíg meg nem közelítették a létrehozni kívánt profilt, ekkor 1° szögeltolásra és 0,1mm-rel csökkenő fogásvételekre váltottunk a program írása során. Ezután egy újabb 0,5mm-rel nagyobb fogás következett középről indulva, a profil közelítésekor megegyező stratégiát alkalmazva.

A programozás során ügyelni kellett a be- és kifutási útra, amelyen felgyorsul, illetve lefékeződik a szerszám, és értéke legalább egy menetemelkedésnyi.

A fenti módszerrel kapott eredményeket a Sinumerik 840D vezérlés menetvágó ciklusaiba kézi programozással vittük be. A ciklusban az alábbi paramétereket kell meghatározni:

PIT (valós)	menetemelkedés értéként (előjel nélkül adandó be)
MPIT (valós)	menetemelkedés menetszámként. Értéktartomány: 3 (M3-ra) ... 60 (M60-ra)
SPL (valós)	menet-kezdőpont a hossz tengelyben
FPL (valós)	menet-végpont a hossz tengelyben
DM1 (valós)	menetátmérő a kezdőponton
DM2 (valós)	menetátmérő a végponton
APP (valós)	befutási út (előjel nélkül adandó be)
ROP (valós)	kifutási út (előjel nélkül adandó be)
TDEP (valós)	menetmélység (előjel nélkül adandó be)
FAL (valós)	simításráhagyás (előjel nélkül adandó be)
IANG (valós)	fogásvételi szög Értéktartomány: "+" (oldal fogásvétel a homlokoldalon) "- " (váltakozó oldal fogásvételre)
NSP (valós)	indításpont-eltolás az első csavarmenetre (előjel nélkül adandó be)
NRC (egész)	nagyolási vágások száma (előjel nélkül adandó be)
NID (egész)	üres vágások száma (előjel nélkül adandó be)
VARI (egész)	a menet megmunkálási jellegének meghatározása Értéktartomány: 1 ... 4
NUMTH (egész)	csavarmenetek száma (előjel nélkül adandó be)

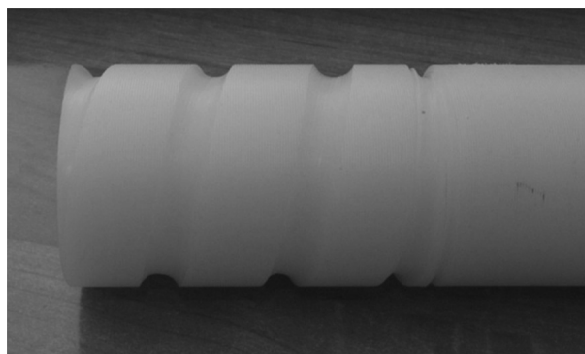
Látható, hogy a ciklusnak sok paramétert kell megadni, amelyek jelentős része a speciális profil miatt kihasználatlan lesz. Tervezzük olyan kísérletek végrehajtását is, amikor nem a menetvágó ciklussal, hanem a G33 menetvágó utasítás használatával forgácsoljuk le a próbadarabot. Ebben az esetben elmarad a fölös-

leges, kihasználatlan paraméterek megadása, rövidebb programmal megoldható a feladat.

Egy további lehetőség a MASTERCAM\* program szolgáltatásainak felhasználásával végzett programírás. Természetesen ez a program sem tudja közvetlenül a szükséges szolgáltatásokat, azonban a profil megadásával és beszűrő művelet választásával a menetvágás célpontjai kellő sűrűséggel meghatározhatók ezzel a módszerrel is.

A forgácsolási tapasztalataink alapján a nagyszámú adat miatt elég sok adathiba volt, aminek jelentős részét a vezérlés szimulációs üzemmódjában sikerült felderíteni, így a megmunkálásnál ez nem okozott gondot. A továbbiakban azonban valamilyen automatizált megoldást fogunk használni, olyan számítógépes program felhasználásával, amely az AUTOCAD-ból kapott adatokat automatikusan beépíti a Sinumerik 840D vezérlés által igényelt formátumú CNC programba, így elkerülve a hibásan megadott adatokat. Erre a célra olyan programcsomaghoz kell egy beépülő modult alkotni, mely fejlett 3D modellező felülettel rendelkezik, illetve tartalmaz CAM programrészt is. Így megfelelő posztprocesszorok segítségével könnyedén elkészíthetjük az NC programot akár többféle vezérléshez is.

Az 5. ábrán az első kísérletekhez használt alkatrész látható. Ekkor a program még tartalmazott olyan hibákat, amelyeket szimulációval nem sikerült felderíteni. Fém próbadarab esetén ez a szerszám törését okozta volna, a műanyagban viszont nem okozott ilyen problémát.



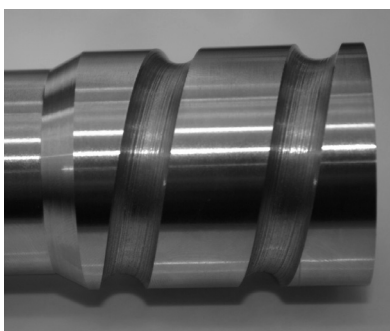
5. ábra. Forgácsolási kísérlet műanyag próbadarabbal.

A további kísérleteket fém munkadarabon végeztük. A 6. ábrán látható az elkészült próbadarab. A golyópálya modell felületi minősége láthatóan nem elég jó, de a módszer alkalmazhatóságát be lehetett mutatni vele.

\* A CNC Software Inc., USA cég terméke

A minőség a fogásvételi paraméterek finomításával javítható lesz.

További kísérletekkel kell majd megtalálni a megfelelő kompromisszumot a felületminőség (egyelőre nagyolásról van szó, tehát nincsenek extra követelmények) és a megmunkálási idő között. Habár a geometria és a technológiai követelmények miatt a szán forgácsoláskor is közel a megengedett legnagyobb sebességgel mozog, a nagyszámú fogás miatt a megmunkálási idő elég hosszú lesz.



6. ábra. Az elkészült próbatest.

Eddigi forgácsolási kísérleteinkben a szerszámgép és a programozási módszer alkalmazhatóságát vizsgáltuk a golyósanya nagyoló esztergálásában. Minden kísérleti gyártásnál fontos szempont, hogy az elkészült munkadarabot minősíteni tudjunk, meg tudjuk mérni a geometriai jellemzőit, össze tudjuk hasonlítani a tervezett és a megvalósított darabot. A golyópálya viszonylag bonyolult geometriája miatt mérési, ellenőrzési módszernek a 3D-s szkennelést és az így kapott felület és a CAD rendszerben megtervezett felület összehasonlítását választottuk. A Tanszéken rendelkezünk egy Breuckmann smartSCAN<sup>3D</sup>-HE szkennelvel [6] és a Geomagic Studio programmal [7], amikkel az összehasonlítás elvégezhető.

A kísérleti munkadarab méretei miatt a legkisebb látószögű, és így a legpontosabb objektív választható a szkenneléshez. A próbadarab szkennelését a kézirat leadásáig még nem végeztük el, de terveink között szerepel a mérés és összehasonlítás.

A külső menet szkennelésénél problémát jelenthet a vizsgálandó profil „mélyedés” jellege, mert a szkennelvel működési elvéből következően azokat a pontokat tudja feldolgozni, amelyeket mindkét objektívvel egyszerre lát. Ez elsősorban felvétel készítési és nem kép illesztési probléma, néhány próbálkozással meg lehet találni a megfelelő felvételi irányokat.

A forgácsolási kísérleteknél, tehát amikor külső felületet munkáltunk meg, ez a módszer jól alkalmazható, azonban belső felületnél a szkennelvel működési elvéből és felépítéséből adódóan csak nagyon kis mértékben képes „belelátni” a golyósanyába. A meg-

oldás az lehet, hogy létrehozzuk az anya negatívját, az elkészült anyát öntőformának használva kiöntjük megfelelően választott anyaggal, és a szkennelést ezen hajtjuk végre. Ezzel a módszerrel elsősorban a golyópálya profil alakja vizsgálható, bár megfelelő kalibráció után a szkennelvel pontossága a geometriai méretek ellenőrzésére is alkalmas. A „negatív anyán” a mérendő felület már kiemelkedés jellegű, ezért a szkennelésnél kevésbé kényes a láthatósága, ezért gyorsabban, kevesebb felvétellel megoldható a mérés.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ezen kísérletnek, illetve további jövőbeni kísérleteknek célja, hogy a Szerszámgépek Tanszékén lehetővé tegye a golyósanyák gyártását, az új fejlesztések prototípusainak helyben történő legyártását.

A jelenleg a tanszéken üzemelő DMG CTX alpha 500 típusú szerszámgép alkalmas nagy menetemelkedésű golyósanyák nagyoló megmunkálására, a tervezett mérések elvégzése után pedig meghatározhatóvá válik a pontosság, illetve annak a simítási ráhagyás értéknek a megállapítása, mely a befejező megmunkálás elvégzéséhez szükséges.

*Jelen publikáció a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.*

#### 5. IRODALOM

- [1] N. TANAGUCHI: CIRP Annals Vol.32/2/2983. pp.: 573-582
- [2] FAG Präzisions-Kugelgewindetriebe, Nr.1154
- [3] KUNDRÁK J.: Gépkatrészek működő felületeinek élettartam növelő megmunkálása, II. Magyar Karbantartási Konferencia, Dunaújváros 2010.
- [4] Soroka: Hard Turning and the Machine Tool Hardinge Inc.
- [5] Wickmann: Threading Tool, Threading Insert, and Method of Forming a Thread, Letöltés dátuma: 2012.04.05.  
<http://osdir.com/patents/Cutters/Threading-tool-threading-insert-method-forming-thread-07476063.html>.
- [6] Breuckmann smartSCAN<sup>3D</sup> HE szkennelvel ismertetője. Letöltés dátuma: 2012. 04. 05.  
<http://www.breuckmann.com/en/industry-technology/products/smartsan.html>
- [7] Geomagic Studio 2012. Letöltés dátuma: 2012. 04. 05. <http://www.geomagic.com/en/products/studio/overview/>

# ROBOTTECHNIKAI OKTATÓ LABORATÓRIUM FEJLESZTÉSI TERVE

## DEVELOPMENT PLAN OF AN EDUCATIONAL ROBOTIC LABORATORY

Csáki Tibor\*, Makó Ildikó\*, Hegedűs György\*\*

### ABSTRACT

*The Department of Machine Tools of University of Miskolc, Hungary has an educational robotic laboratory. This article describes the development plan of this laboratory. The complex path programming of a robot requires some knowledge on the environment of the robot. Modelling of this environment needs sophisticated tools, such as Mastercam/Robotmaster. If we don't have a CAD model of the part to be machined, we have to scan the part in order to make robot program by means of CAM software. An example is described below.*

### 1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékén évek óta foglalkozunk a robottechnikával, NC gépek számítógéppel segített programozásának módszereivel és eszközeivel, számítógéppel segített tervezéssel, szerszámgépek karbantartásával, reverse engineering módszerekkel, mind kutatási, mind pedig oktatási szinten. Az utóbbi években sikerült felújítani a laboratóriumainkat, és pályázatok segítségével néhány új eszközt, gépet, programot is be tudtunk szerezni.

Az alábbiakban megújuló robottechnikai oktató laboratóriumunk fejlesztési koncepcióját mutatjuk be.

### 2. CÉLKITŰZÉS

Hallgatóink komplex felkészítése érdekében fontosnak tartjuk a gyakorlati képzést is, ezért azt szeretnénk elérni, hogy az általuk megírt programok lehetőleg „élőben” is fussanak, például az NC programok eredménye legalább a vezérlés képernyőjén megjelenjen (arra sajnos nincs lehetőség, hogy minden hallgató le is forgácsolja az általa programozott munkadarabot), a robot pedig valós mozgásokat végezzen.

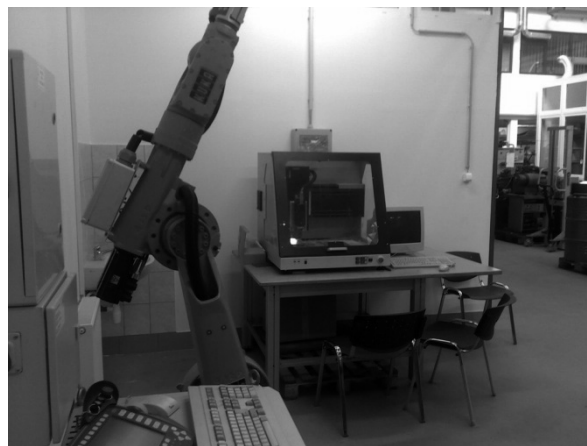
\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

A robotok programozásánál nagyon fontos a környezet figyelembe vétele, ezért az olyan programozási eszközök, amelyek modellezni képesek a környezetet is, nagyon hasznos segítséget jelentenek. Robotos megmunkálásoknál (pl. sorjázás, csiszolás) összetett, bonyolult mozgások programozására lehet szükség, ahol a munkadarab alakját valamilyen CAD rendszerből származó fájlból vagy szkenneléssel előállítható fájlból kapjuk. Robotos oktató laboratóriumunkban ennek a feltételeit kívánjuk megteremteni.

### 3. ESZKÖZÖK

Egy robotos oktató laboratórium egyik legfontosabb eszköze maga a robot. Tanszékünkön évek óta üzemel egy KUKA KR15/2\* robot (1. ábra), amit eddig főleg kézi programozással programoztunk.



1. ábra. KUKA robot a laboratóriumban

Bonyolult pályák mentén történő mozgások programozása általában valamilyen számítógépes segítséget igényel, bár egyszerűbb esetekben a helyszíni betanítás is megoldás lehet. Tanszékünknek sikerült az elmúlt években megvásárolnia a MASTERCAM†

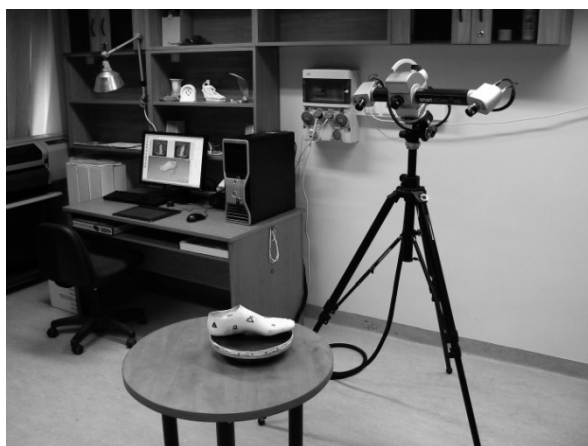
\* A KUKA Robotics terméke

† A CNC Software Inc. terméke

program oktatási verzióját, ami a statisztikák szerint a világon a legnagyobb példányszámban eladott CAM szoftver. CNC gépeink programozása mellett ez a program alkalmas arra is, hogy a Robotmaster<sup>‡</sup> nevű programmal együttműködve a robotok programozásának oktatásába is be tudjuk vonni. A Robotmaster előző verziójával nagyon jó és hasznos tapasztalatokat szereztünk, oktatásba való bevonása jó eredményekkel járt. Didaktikai szempontból hasznos hallgatói feladatok elkészítésére, és szimulációjára nyílt lehetőség. Az újabb, hamarosan megérkező verzió a még nagyobb tudásával várhatóan hasznos segítség lesz az oktatásban.

A MASTERCAM/Robotmaster rendszer gyakorlatilag az összes használatos CAD rendszertől képes CAD modellt átvenni valamilyen formátumban, ezért ha egy alkatrészt megtervezünk (vagy megterveztetünk a hallgatóinkkal), a kívánt megmunkáláshoz tartozó pályák meghatározhatók a programok segítségével, és a megfelelő robotprogramot a rendszer generálja. Ezt a programot azután számítógépes hálózaton a robot vezérlőjébe juttatva, és lefuttatva a megoldás jósága közvetlenül ellenőrizhető.

Lehetőségünk van reverse engineering feladatok bemutatására is, vagyis arra, hogy ha nem áll rendelkezésre CAD fájl egy munkadarabról, a számítógépes programozási segítséget akkor is igénybe lehet venni. Tanszékünk rendelkezik egy Breuckmann smartScan<sup>3D</sup> HE<sup>§</sup> szkennelőrrel (és természetesen a hozzá tartozó meghajtó és feldolgozó szoftverrel) (2. ábra), amelynek segítségével „tetszőleges” munkadarab modellje előállítható olyan formában, amit a MASTERCAM/Robotmaster programok fogadni és kezelni tudnak.



2. ábra. Szkenner

<sup>‡</sup> A Jabez Technologies Inc. terméke

<sup>§</sup> A Breuckmann GmbH terméke

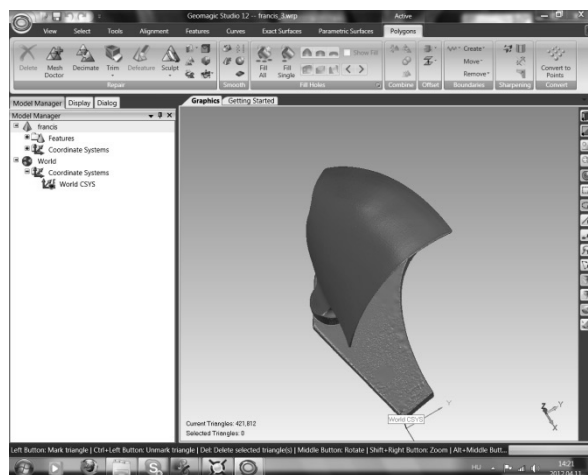
Hallgatóink robotprogramozási oktatása a tanszéki CAD/CAM laboratóriumban (3. ábra) fog folyni, ahol a más tantárgyak keretében megismert CAD rendszerek és a MASTERCAM rendszer oktatása is történik.

A laboratóriumban 12 hallgatói és egy oktatói munkahely áll rendelkezésre a programok használatához, így a kiscsoportos gyakorlatorientált képzés feltételei adottak.



3. ábra: CAD/CAM labor

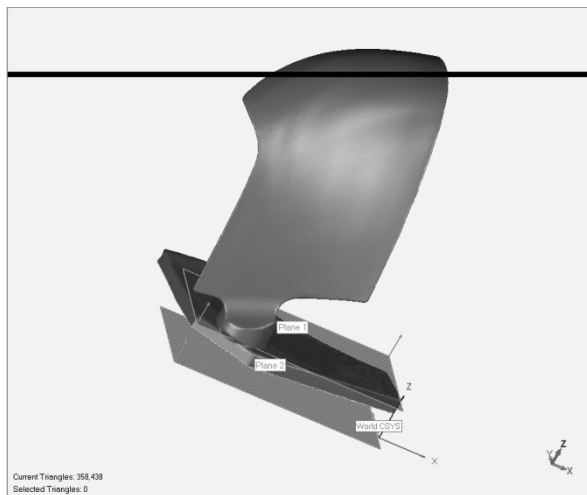
A beszkenntelt alkatrészről a szkennert vezérlő Optocat szoftver egy STL formátumú fájlt készít, amelynek további feldolgozása a Geomagic Studio<sup>\*\*</sup> program segítségével történik (4. ábra), melynek segítségével a szkennelés hibái javíthatók, a modell módosítható, koordináta-rendszer rendelhető hozzá, és további szerkesztések is elvégezhetők.



4. ábra. Geomagic Studio a modell feldolgozásához.

<sup>\*\*</sup> A Geomagic cég terméke

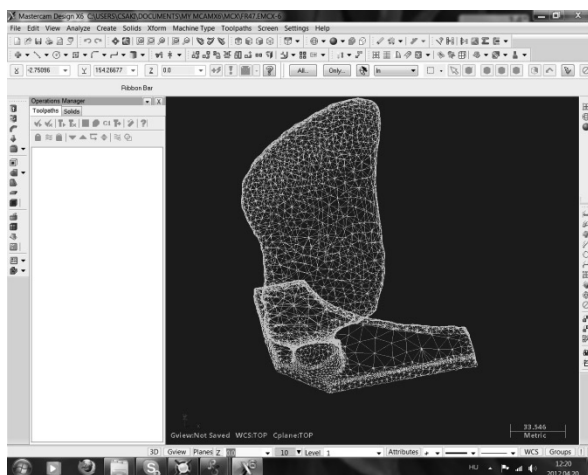




8. ábra. A javított modell.

Az ábrán az is látható, hogy koordináta-rendszert is rendelt a lapáthoz a program, ami azért fontos, mert így a Mastercam-ben sokkal könnyebb mozgatni és helyezni a munkadarabot, és egyszerűbb a szükséges nullponteltolásokot meghatározni.

A MASTERCAM által fogadott kép a 9. ábrán látható.



9. ábra. A MASTERCAM-be beolvasott lapátfelület.

A későbbiekben megoldandó feladat a Mastercam/Robotmaster rendszerben a tanszéki robot, a robotra szerelhető szerszám (vagy szerszámok) modellezése, a megfelelő műveletek kiválasztása, a műveletekhez a geometriai elemek (egyenesek, görbék, szplájnok, felületek) megadása, a kiválasztott elemek mentén a szerszám pályák generálása, a program letöltése a robotvezérlőbe és a robotprogram futtatása. Ezt a feladatot bemutató jelleggel tervezzük, de természetesen a továbbiakban hallgatói feladatok hasonló megoldása is szándékunk.

Ennek ellenére a robotos oktató laboratórium fejlesztésébe célszerűnek tartanánk a hallgatók bevonását már a mostani fázisban is, egyrészt mert fiatalos ötletekkel újabb hasznos dolgokat javasolhatnak, másrészt szükségünk lenne az effektív tevékenységükre is a megoldások kidolgozásában. A munkában résztvevő 2-3 hallgató is jól járna, hiszen egy olyan területen szereznének tapasztalatokat, amely várhatóan nagy és dinamikus fejlődés előtt áll. E tekintetben vannak pozitív visszajelzéseink.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A jelenleg rendelkezésre álló (Breuckmann smartScan<sup>3D</sup> HE szkennerek, Geomagic Studio szoftver, KUKA KR15/2 robot, Mastercam X6 szoftver) és a közeljövőben fejlesztésre kerülő (Robotmaster v6, illetve saját fejlesztésű illesztő hardver) eszközök segítségével a Robottechnikai oktató laboratóriumunkat szeretnénk olyanná fejleszteni, ami hallgatóink érdeklődését felkeltve bonyolult feladatok, bonyolult térbeli mozgások programozásának oktatását teszi lehetővé. Egy ilyen laboratórium maximálisan támogatja az elvárt gyakorlatorientált képzést, és korszerű ismeretek megszerzéséhez segíti hallgatóinkat.

Ugyanakkor ez a laboratórium, mint korszerű eszközök bemutatására szolgáló referenciahely, egyéb célokat is szolgálhat. Későbbi terveink között szerepel az oktató laboratórium szolgáltatásainak hasznosítása a környékbeli ipari vállalatok számára a robottechnika elterjesztésében, népszerűsítésében, a programozás oktatásában.

Ilyen vállalatok lehetnek például a Sanmina, Sanofi Aventis, Betatherm, Exir Hungária.

Jelen publikáció a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## IRODALOM

- [1] Mastercam X6 ismertető. Letöltés dátuma: 2012.02.02. <http://www.mastercam.com>
- [2] Robotmaster ismertető. Letöltés dátuma: 2012.03.05. <http://www.robotmaster.com>
- [3] Geomagic ismertető. Letöltés dátuma: 2011.05.03. <http://geomagic.com/en>
- [4] Breuckmann smartScan<sup>3D</sup> HE szkennerek ismertetője. Letöltés dátuma: 2012.04.12. <http://www.breuckmann.com/en/industry-technology/products/smartsan.html>
- [5] Optocat ismertető. Letöltés dátuma: 2012.04.23. <http://www.exactmetrology.com/products/breuckmann/optocat/>

# KOPOTT CSAPÁGYHÁZAK FELÚJÍTÁSA FÉMPOLIMER ANYAGOK FELHASZNÁLÁSÁVAL

## RENEWING WORN-OUT BEARING HOUSINGS USING METAL-POLYMER MATERIALS

Iscsenko A.A.\* , Barna Balázs\*\* , Molnár László\*\*\*

### ABSTRACT

*The renewing of bearing housings using metal-polymer materials is a novel method that provides the restoration of the bearing housing's original size without any post-fabrication method. This technology was adapted several times before, for example in integrated iron-and-steel works "Azovsztal" and "Iljics" in Ukraine. The lifetime of the renewed surfaces is equal to the lifetime of the new surfaces. The economical efficiency can be also indicated regarding the renewing can be done on-site; there is no need of disassembling and transporting big machinery for chipping operations.*

*The method is fast and efficient, and can be used in cases when the renewal time is limited. The suggested technology can be widely adapted for repairing other surfaces. It has stood the proof in industrial circumstances and proven as an efficient repairing method.*

### 1. BEVEZETÉS

A fémpolimer anyagokat hosszú ideje sikerrel használgják különböző gépalkatrészek felújítására, elkopott felületek pótlására, olyan hagyományos technológiák helyett, mint például a felrakó hegesztés vagy fémszórás.

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke (Magyarország) valamint az Azovi Állami Műszaki Egyetem Kohógéptani Tanszéke (Ukrajna) jelentős tapasztalatokkal rendelkezik golyóscsapágyak kopott csapágy fészkeinek fémpolimer anyagok felhasználásával való felújításában. A megszerzett tapasztalatok jól hasznosíthatók a gépek üzemeltetése során jelentkező különféle anyaghiányos hibák javítása esetén. A fémpolimer anyagok széles választékából csapágyfészkek javítására a Multimetall Stahl nevű anyagot

\* a műszaki tudomány doktora, Azovi Állami Műszaki Egyetem, Marjupol, Ukrajna

\*\* dr. univ., Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* dr. univ., Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

célszerű használni, amelynek a nyomószilárdsága 160 MPa és rugalmassági modulusza 6000 MPa.[3]

### 2. FELÚJÍTÁSI TECHNOLÓGIA

A tönkrement csapágyfészkek kopásának mértékétől függően két jellegzetes eset különböztethető meg:

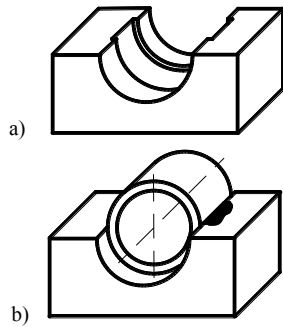
Az elsőre az a jellemző, hogy a fészkek jelentősen megkopott, a kopás mértéke eléri az 1 mm-t, vagy akár annál több is lehet. A második csoportba azok a meghibásodások tartoznak, amikor a kopás mértéke csak néhány tized mm.

A későbbiekben ismertetésre kerülő javítási módszerek akkor alkalmazhatóak, ha a tönkremenetel mértéke az első csoportnak megfelelő. Ez jellemzően olyan helyeken fordul elő, ahol a gépek terhelése nagy, és folyamatosan üzemelnek, mint például a kohászatban. Az alkatrész működőképességének helyreállításakor hagyományos módon felrakó hegesztéssel pótolják a hiányzó anyagot, majd ezt követően megmunkálják a felületet a csapágy méretének megfelelően, vagy persellyel állítják vissza a csapágyfészkek eredeti méretét. Nem minden esetben lehet azonban a csapágyház meghibásodott részeit kiszerelni, ekkor az üzemelés helyén kell a javítást elvégezni. Nagy méretű berendezések esetén a helyszíni megmunkálás igen sok nehézséget okoz és drága különleges eszközöket igényel. Ilyen esetekben a fémpolimer anyagok használatára épülő javítási technológia különösen hatékony lehet, mert ennek az eljárásnak alkalmazásával utólagos megmunkálás nélkül, egy formázó felület (sablon) alkalmazásával, készül el a méretpontos csapágyfészkek.

A fémpolimer anyagok terheléses vizsgálata során megállapítottuk, hogy ha az anyag zárt fészkekben helyezkedik el, annak teherviselő képessége lényegesen nagyobb, mintha szabad térben lenne, nyomószilárdsága megnő 2-2,5 szeresére. Ennek a beépítési módnak felel meg a csapágy által létrehozott kopási vajatba felhordott javítóanyag. [2]

Az osztott csapágyfészkek javítása során a formázó felület lehet egy, a csapágy külső gyűrűjével azonos átmérőjű, a kész fészkeknek megfelelő felületi minőség-

gú sablon, vagy maga a csapágy gyűrű. A sablonnal való javítás elrendezését mutatja az 1.-es ábra.



1. ábra. Sablonnal végzett csapágyfészek felújítás

a./ A csapágy által kikoptatott csapágyfészek

b./ A sablon felhelyezése és a felesleges anyag kinyomódása

Az előkészítő műveletek során a javítandó fészket fel kell tisztítani, a kellő tapadás biztosítására az elkenődött anyagrészeket el kell távolítani. Ez a művelet nem igényel pontos megmunkálást, egyszerű eszközökkel (csiszoló vászon, reszelő, kézi köszörű stb.) elvégezhető. Nagyon fontos, hogy kellő figyelmet fordítsunk a javítandó felület mechanikus és vegyszeres tisztítására, a zsíros és poros szennyezőanyagok eltávolítására, mert különben nem lesz megfelelő a javítóanyag tapadása és idővel, a működés közben keletkező terhelések hatására leválás jöhet létre. Ügyeljünk rá, hogy a javítóanyag felhordásakor a javítandó felület pormentes és száraz legyen. A környezeti hőmérséklet +5 és +45 °C között legyen. [3] A fémpolimerek kétkomponensű anyagok. A javítóanyag kikeményedése vegyi reakció következtében jön létre. A katalógusban megadott fázis- és kikeményedési idők +20 °C-ra vonatkoznak. Az alacsonyabb munkahőmérséklet lassítja (+5 °C alatt le is áll), a magasabb gyorsítja a kikeményedési folyamatot. A megfelelő tapadás biztosítására figyelni kell arra is, hogy a levegő relatív páratartalma ne haladja meg az 1.-es táblázatban megadott értékeket. [1]

A sablont formaelválasztó szerrel (taszító jellegű, antiadhéziós anyag) kell bevonni, azért, hogy a javítóanyag ne tapadjon a sablonra, szétszereléskor a javított felület ne sérüljön.

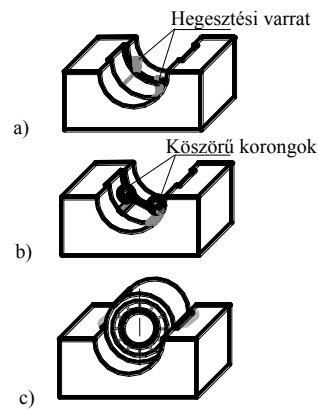
A két komponens alapos összekeverése után a csapágy fészekben a csapágy által tönkretett felületet fel kell tölteni a pasztaszerű fémpolimer anyaggal úgy, hogy a javítóanyag mennyisége több legyen, mint a hiányzó anyag. A felhordás során először egy vékony adhéziós réteg kell készíteni. Ehhez a spatulyával erősen rányomva kenjük fel a javító anyagot egy néhány tized mm-es rétegvastagságban, majd közvetle-

nül utána felhordjuk a szükséges vastagságú réteget. A sablon felhelyezése után a felesleges anyag kinyomódik, mint ahogy az 1. ábrán is látható. A fémpolimer anyag kikeményedése után (16-24 óra), a sablon kivehető és a fészek megtisztítható a kinyomódott felesleges anyagtól.

Felületi hőmérséklet	Relatív páratartalom
16-20 °C	< 55 %
21-25 °C	< 70 %
26-31 °C	< 75 %
32-38 °C	< 80 %

1. táblázat. Relatív páratartalom megengedett értékek

Azokban az esetekben, amikor sablonkészítés nem megoldható a csapágyfészket felújítható a csapágygyűrű palástfelületének felhasználásával is. Ehhez a fészekben támasztó felületet kell kialakítani. A támasztó felület tartja a csapagyat a kívánt helyzetben a javítóanyag kikeményedéséig. Ezt a támasztó felületet létre lehet hozni pl. két támasztó csikkal, amelyek mindkét csapágyfélben az osztósíkhöz képest 45-50 fokban helyezkednek el, ahogy ez a 2. ábrán is látható.



2. ábra. Sablon nélkül végzett csapágyfészek felújítás

a./ támasztó csíkok felhegesztése

b./ köszörülés a névleges méretre

c./ a csapágy behelyezése

Nagyméretű csapagyak esetén ezeket a csíkokat leggyakrabban felrakó hegesztéssel alakítják ki, amit aztán, pl. kézi köszörüléssel, a névleges (eredeti, kopásmentes) méretre munkálnak meg. Természetesen a támasztó csíkok kialakíthatók megfelelő méretű fém

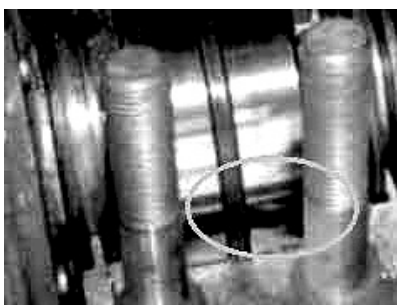
betétek felragasztásával is. Ezt követi az ellenőrzés, amelynek során meg kell győződni arról, hogy a támasztócsíkokra helyezett csapágy az elvárt pontossággal a helyén van-e. A következő műveletben csapágyat és a csapágyház osztósíkját formaelválasztóval vonják be, a fészkekbe felkenik a fémpolimer anyagot olyan rétegvastagságban, hogy a javító-anyag rétegvastagsága nagyobb legyen, mint a hiányzó anyagrétegé. A csapágyat behelyezik az alsó csapágyfészkekbe és a csapágyház felső részének felszerelésével azt a támasztófelületre szorítják. A felesleges javítóanyag kinyomódik. A kikeményedés után szétszerelik a csapágyházat, kiszedik a csapágyat és a fészket megtisztítják a felesleges, kinyomódott anyagtól.

Egy magnezittörő berendezés főtengelyének javításra előkészített csapágyfészke látható az 1.-es fényképen.



1. fénykép. Magnezittörő berendezés főtengely csapágyfészkek

A javítóanyag alsó csapágyfészkek részbe való felhordása után a csapágyakkal szerelt főtengelyt helyére teszik. A kinyomódott anyag felesleg a 2. fényképen látható.



2. fénykép. Kinyomódott anyag felesleg

A javítás befejező művelete során a csapágyház felső részét is fel kell tölteni a kívánt rétegvastagságú javító anyaggal és helyére rakni és az összefogó csavarokkal rögzíteni (3. fénykép).

A kötési idő leteltével, ha szükséges, a csapágyazás szétszerelhető és a fölösleges, kinyomott javítóanyag eltávolíthat. Ha nem tapasztalható nagyobb mértékű kinyomódás, ill. a kinyomódott anyag nem okozhat

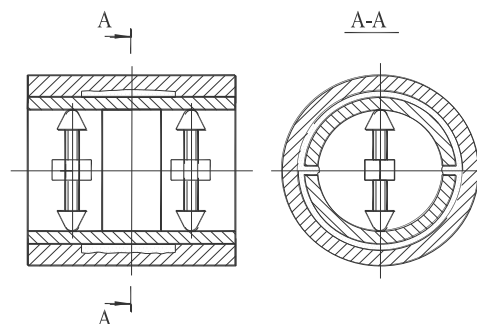
működési rendellenességet, akkor ez a művelet el is maradhat.



3. fénykép. Csapágyház felső fél helyrerakása

Osztatlan csapágyfészkek felújítása esetén is szükség van egy formázó elemre, azaz sablonra. A javítás befejezésekor esedékes sablon kiserelést nagyban megkönnyíti, ha az szerelt kivitelű. A 3. ábrán látható példa ilyen feladat megoldására egy osztott kivitelű sablont és két feszítő elemet használ.

A módszer hátránya, hogy a sablon kiserelése után a sablon osztási síkjában sorja marad, amelyet utólagos, rendszerint kézi, megmunkálással kell eltávolítani.



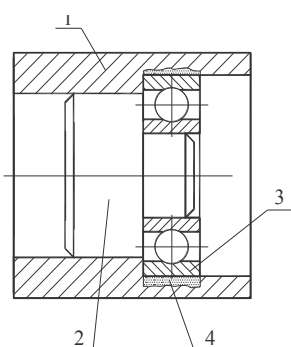
3. ábra. Osztatlan kivitelű csapágyház felfekvő felületének felújítása osztott sablonnal és feszítő elemekkel

Ha a csapágyfészkek nem teljes keresztmetszetében sérült, akkor szerelt sablon alkalmazásával lehetőség van a fészkek részleges javítására is (4. fénykép).



4. fénykép. Szerelt sablon alkalmazása

Az osztatlan csapágyházak felújítására egy másik lehetőséget mutat be a 4. ábra. Itt egy központosító csap segítségével a csapágygyűrű külső felülete szolgál formázó felületként. A sérült felületet hígabb javítóanyaggal töltő furaton keresztüli injektálással – feltöltő fecskendőből való kiperéléssel – töltik ki. Ha pasztaszerű javítóanyagot használnak, akkor azt először fel kell vinni a kopott fészek zsírtalanított felületére és a csapágy (sablon) formaelválasztóval kezelt külső gyűrűjére, majd ezután a központosító csapot a csapággal együtt be kell tolni tengely irányban ütközésig. Betolás közben köríves úsztató mozgatással lehet biztosítani a javítóanyag egyenletes, kihordás mentes eloszlását. A javító anyag kikeményedése után a csapágyat ki kell venni a fészekből és el kell távolítani a felesleges fémpolimer anyagot.



4. ábra. Osztatlan csapágyfészek felületének felújítása központosító csap segítségével.

1-ház, 2-központosító csap, 3-csapágy, 4-fémpolimer anyag

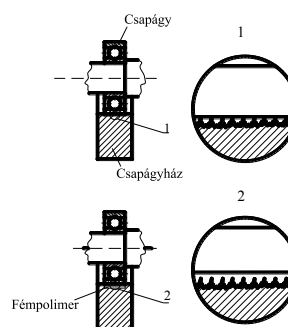
### 3. ÉRTÉKELÉS ÉS KÖVETKEZMÉNYEK

Az előzőekben ismertetett formaleképző technológiával felújított csapágyházakkal dolgozó gépek üzemeleti tapasztalatai azt mutatják, hogy a javított csapágyfészek élettartama általában eléri, esetekként meghaladja a hagyományos technológiával felújított gépeknél tapasztalt értékeket.

Ez a jó eredmény, amint a felújított gépek üzemeltetési gyakorlata is igazol, elsősorban az érintkezési felület – a csapágy tényleges felfekvő felülete - növekedéssel magyarázható, mert ezáltal a csapágyfészkekre eső fajlagos terhelés csökken. Az 5/1. ábrán a csapágy felfekvése látható egy új, forgácsolással készült fészkekben. A külső gyűrű kőszőrült felülete a csapágyfészkek forgácsolása során keletkezett érdességi csúcsokon támaszkodik fel. A dinamikus terhelések hatására ezek az érdességi csúcsok kisimulnak, de ezzel a csapágyvillesztés mérete is megváltozik.

A csapágyfészek felületének hengerlésével vagy görgözésével (felületi plasztikus kezelés) az érdességi

csúcsok „kivasalhatók” és ezáltal elkerülhető a csapágyfészkek beszerelés utáni méretváltozása. Ez egy meglehetősen drága megoldás, ezért a gyakorlatban ritkán alkalmazzák.



5. ábra. Csapágyfészek felülete

1, Forgácsolással készített csapágyfészek  
2, fémpolimerrel felújított csapágyfészek

Fémpolimer anyagok alkalmazása esetén csökken a fajlagos terhelés, mert a formázó felület (sablon vagy csapágygyűrű felülete) jobb minőségben készíthető el, mint a belső felület forgácsolásával készített csapágyfészek, ezért nagyobb felfekvő felületet biztosít a csapágy számára. (5/2. ábra)

Dinamikus terhelések esetén további előnye a javított megoldásnak, hogy a fémpolimer réteg csillapítja az ütésből adódó dinamikus hatásokat.

Az előzőek alapján megállapítható, hogy a fémpolimer anyagok csapágyfészek felújítására és javítására való felhasználása az ipar különböző területein célszerű és hatékony.

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

### 4. IRODALOM

- [1] BASTIN, W.: Erfahrungen mit zwei Komponenten Reparaturwerkstoffen in Stahl und Walzwerken. Stahl und Eisen 20. sz. 1987. p. 45-48.
- [2] ISCSENKO, A.A.: Tehnologicseszkije osznovi vosztanovlenija promislennovo oborudovanija szovremennimi remontnimi materialami. Ucebnoje poszobie, Marjupol, 2007. 250 p.
- [3] Multimetal Műszaki adatlap, Diamant Metallplastic GmbH, 03-TD-220408-HU

# SZERSZÁMGÉPEK SZÁMÍTÓGÉPPEL SEGÍTETT KARBANTARTÁSA

## COMPUTER AIDED MAINTENANCE OF MACHINE TOOLS

Takács György\*, Hegedűs György\*\*, Szilágyi Norbert\*\*\*

### ABSTRACT

Nowadays machine tools are complicated mechatronic devices. Operating modern machine tools needs professional technical knowledge. Choosing the correct maintenance strategy that makes balance between the costs and the availability is the central question during the operation of these devices. This paper introduces a software-package that aids the maintenance mainly of expensive machine tools.

### 1. BEVEZETÉS

Az utóbbi két évtizedben a magyar ipar gyártóeszközeinek összetétele jelentősen megváltozott. Az átalakulás elsősorban a számjegyvezérlésű szerszámgépek elterjedésében mutatkozott meg. Ezzel párhuzamosan a vállalatoknál alkalmazott gyártási stratégiák is jelentősen átalakultak. Míg a korábban alkalmazott gyártelepítési filozófia szerint a gyártóeszközöket homogén gépcsoportokba igyekeztek telepíteni, napjainkban, főleg a gyártási folyamatokat előtérbe helyező LEAN rendszerek elterjedése miatt, a konkrét gyártmányhoz köthető technológiai sorban vegyesen telepítik a szükséges gyártóeszközöket. Ez a helyzet a gyártóeszközök karbantartásával foglalkozó szakembereket a korábbiakhoz képest új kihívások elé állítja, mely egyrészt a konkrét gyártmányokhoz igazodó gyártási sorba szervezett gyártóeszközök nagyobb üzembiztonságának biztosításában, másrészt a gyártmánystruktúra időszakos megváltozása miatt a gyártóeszközök gyakori áttelepítésében nyilvánul meg.

A szerszámgép fejlesztők a korszerű CNC szerszámgépeket az új alkalmazási trendeknek megfelelően merevebb gépvázalattal tervezik és a gépek fő funkcióit csereszabatos részegységek alkalmazásával igyekeznek megvalósítani.

\* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

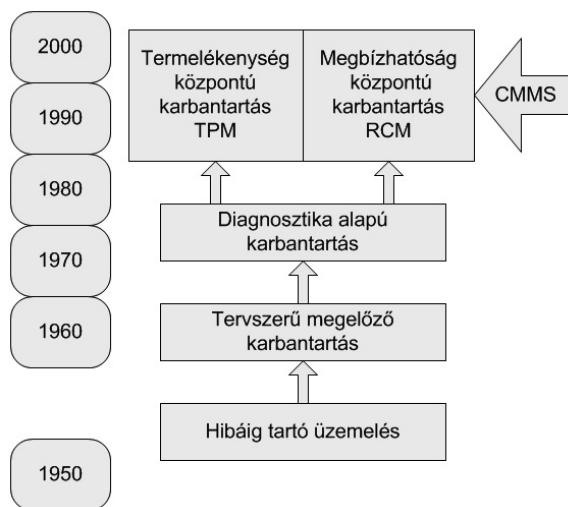
\*\* adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\*okleveles gépészmérnök

### 2. KORSZERŰ KARBANTARTÁSI RENDSZEREK

A gyártóeszközökkel kapcsolatos karbantartási feladatok megítélése az elmúlt fél évszázadban sokat változott (1. ábra). Az 1950-es évekig lényegében nem lehetett a mai értelemben vett karbantartásról beszélni, mert a technológiai berendezéseken csak a legegyszerűbb karbantartási feladatokat (pl. tisztítások, kenések) végezték el. Emiatt a gépleállások előre nem tervezett módon következtek be.

Az első karbantartási stratégia a TMK (Tervszerű Megelőző Karbantartás) volt, mely a váratlan gépleállások számát képes volt csökkenteni, de gazdaságtalansága miatt újabb lehetőségeket kellett keresni.



1. ábra. A karbantartási szemléletek fejlődése

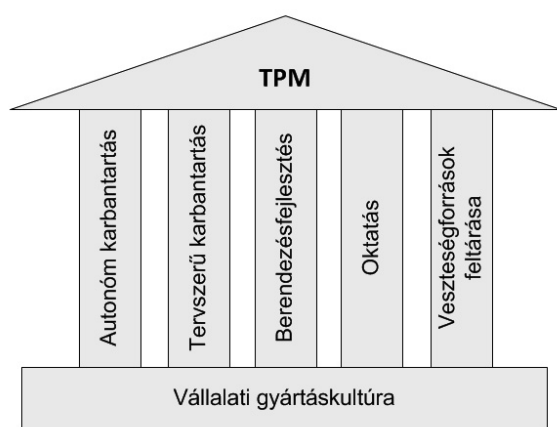
A következő fejlődési szint az 1970-es években kialakuló, a mért értékekre támaszkodó, műszeres diagnosztikán alapuló karbantartási stratégia volt. A diagnosztikai szemlélet alkalmazásával a nagy értékű alkatrészek, részegységek használata élettartamuk végéig biztosítható. Ennek ellenére jelentős megtakarítás csak speciális esetekben érhető el alkalmazásával, a szükséges drága eszközrendszer alkalmazása miatt.

A nagy értékű számjegyvezérlésű szerszámgépek esetén ugyanakkor a diagnosztikai módszerek alkalmazása gazdaságos megoldást jelenthet, mivel a rend-

szer egyes elemei a korszerű szerszámgépeken más funkciók ellátása miatt már egyébként is rendelkezésre állnak. Az 1980-as években a Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke a „VILMOS” szerszámgép-felügyeleti rendszer fejlesztésén keresztül kapcsolódott be a magyar szerszámgépgyárak kutatási feladatainak megoldásába [2]. Az állapotfelügyelet csak eszköz a karbantartási célok elérése érdekében, mert olyan lokális karbantartási információt ad, amit a karbantartási szervezetnek kell arra a gyártási rendszerre származtatni, melyben a diagnosztizált szerszámgép üzemel.

Mivel a korszerű ipari üzemekben az egyes gyártási folyamatokat egymással szimbiózisban együttműködő gyártóeszközök halmaza alkotja, a karbantartási feladatokat a gyártási folyamatok szintjén, rendszerben célszerű kezelni. Az 1970-as években kialakultak és a 90-es évekre széles körűen elterjedtek a vállalati karbantartás rendszer szintű szemléletei, melyek közül a termelékenységre központosított TPM (*Total Productive Maintenance*) és a megbízhatóságra központosított RCM (*Reliability Centered Maintenance*) szemléletek terjedtek el.

A TPM a Toyota termelési rendszer részeként alakult ki, mely témával kapcsolatban először *Seiichi Nakajima* publikált [4]. A TPM egy rendkívül rugalmas komplex rendszer, melynek fogalmát is nehéz egyértelműen definiálni [5].



2. ábra. A TPM struktúrája

A 2. ábra a TPM egyszerűsített struktúráját mutatja. A TPM rendszer az 5S módszernek megfelelő gyártáskultúrájú vállalatoknál működik hatékonyan (*Seiri* → *Szelektálás*, *Seiton* → *Elrendezés*, *Seiso* → *Takarítás*, *Seiketsu* → *Rendszeresség*, *Shitsuke* → *Fegyelem*). A TPM legfontosabb célja a hatékonyság szempontjából optimális termelőszerkezet kialakítása, a termelékenységre monoton növelése, a selejt és fennakadások nélküli termelés, melyhez a géppark teljes tervezett élettartamát átfogó és kiterjedt megelőző karbantartás megszervezésére van szükség.

A megbízhatóság központosított karbantartás (RCM) az üzemfenntartási költségeinek csökkentésére fókuszál az üzemfenntartás hiányosságaira visszavezethető hibák csökkentésén keresztül. Míg a korábbi karbantartási szemléletek a géphibák megelőzését, tervezett-nél korábbi bekövetkezését, vagy előrejelzését tartották fontosnak, az RCM, egy elemzési módszerrel keresztül a hibák következményeit igyekeznek feltárni és csökkenteni.

Az RCM zártabb, merevebb rendszer, mint a TPM filozófiára épülő karbantartási rendszerek, melyek hatékonyabban képesek magukba integrálni a modern karbantartási módszereket és eszközrendszereket is (pl.: *műszaki diagnosztika*, *CMMS*, *stb.*).

### 3. CMMS

Számítógépes karbantartási rendszerek 2-3 évtizede léteznek. A CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) nem önálló karbantartási rendszer, hanem egy olyan számítógépes eszköz, mely hatékonyan képes támogatni a karbantartási személyzet munkáját és képes információt szolgáltatni egyes vezetői döntésekhez.

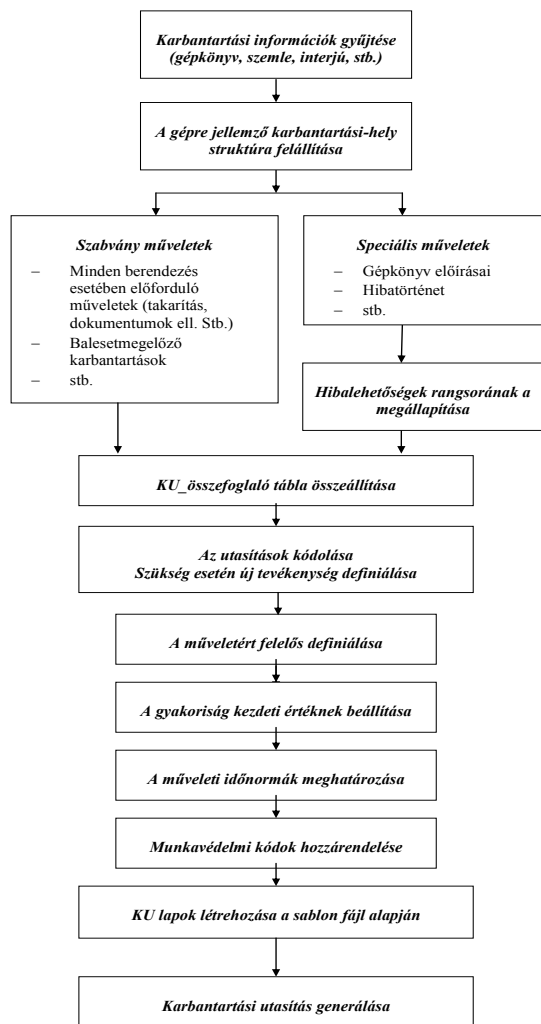
Mivel a CMMS által kezelt feladatok közvetlenül a konkrét gyártási folyamatokhoz kapcsolódnak, a gyakorlatban nem lehet univerzális, minden vállalat igényét teljes körűen kielégítő szoftvereket fejleszteni. Csak az USA-ban több mint ezer CMMS fejlesztő és forgalmazó cég működik.

CMMS szoftverek jellemzői:

- egységes rendszerben kezeli az ütemezett karbantartási feladatokat és váratlan meghibásodásokat,
- hatékonyan támogatja, esetleg automatizálja a karbantartási utasítások létrehozását,
- segítségével könnyen ütemezhető és tervezhető a szükséges karbantartási feladatok,
- maximalizálható a berendezések rendelkezésre állása,
- minimalizálható a termelés kiesések,
- diagnosztikák alapján előre megtervezhetőek a karbantartási feladatok és azok költségei,
- csökkenti a karbantartók adminisztrációs feladatait,
- kezeli a karbantartási szolgáltatással megbízott külső cégek szerződéseit,
- a garanciához kötött feladatokat a karbantartási utasításoktól függetlenül kezeli,
- statisztikákon keresztül optimalizálja a karbantartási forrásokat, csökkenti a költségeket,
- vezetői döntésekhez jelentéseket, kimutatásokat készít,
- adat exportálásra és importálásra alkalmas, illeszthető a vállalat egyéb rendszereihez.

#### 4. CNC SZERSZÁMGÉPEK KARBANTARTÁSI KÉRDÉSEI

Egy ország iparának fejlettségét döntően befolyásolja az alkalmazott gyártóeszközök - *elsősorban szerszámgépek* – műszaki színvonala, fejlettsége. A különféle gyártóeszközökön belül jelentős hányadot képviselnek a szerszámgépek, melyek összetétele utóbbi években jelentősen megváltozott Magyarországon, a számjegyzvezlésű gépek javára. Az új gyártóeszköz-szerkezet a korábitól eltérő összetételű mérnöki ismereteket igényel a szerszámgépek karbantartása, üzemeltetése szempontjából.



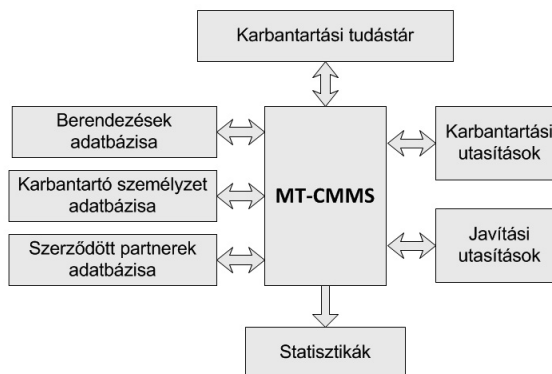
3. ábra. A Karbantartási utasítások (KU) kidolgozásának menete egy adott berendezés estén

Forgácsoló szerszámgépek hatékony üzemeltetésének egyik feltétele, hogy az üzem bevezetett és jól működő karbantartási rendszer felügyelete alatt működjön, melynek legfontosabb építőkövei a dinamikus paraméterekkel beszabályozott karbantartási utasítások. A dinamikus paraméterezés azt jelenti, hogy

számos paramétert figyelve (pl. *karbantartó személyzet kapacitása, a berendezés igénybevétele, a gépkezelők képzettsége, stb.*) a karbantartási rendszerből nyert statisztikai elemzésekre alapozva meg kell találni a karbantartásra fordított idők olyan minimális értékét, mely még képes biztosítani a gépek szükséges rendelkezésre állását. A 3. ábra egy olyan vázlatot mutat be mely szerszámgépek karbantartási utasításainak kidolgozása során alkalmazható.

#### 5. AZ MT-CMMS PROGRAMCSOMAG

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke az elmúlt években több, döntően forgácsoló szerszámgépeket üzemeltető vállalatnál közreműködött meglévő karbantartási rendszereik felülvizsgálatában és korszerűsítésében. E feladatok során feltártuk azokat az igényeket, amelyeket a CNC szerszámgépeket üzemeltető vállalatok elvárnak a karbantartási feladataikat támogató MT-CMMS (*Machine-tools Computerized Maintenance Management System*) programcsomagtól.



4. ábra. Az MT-CMMS vázlat

A 4. ábra egy a korábbi tapasztalatok alapján kidolgozott és szerszámgépekre pozicionált CMMS rendszer leegyszerűsített vázlatát mutatja be. A rendszer tesztelhető prototípusa MS-VisualBasic fejlesztő környezetben elkészült el (5-7. ábra). A programrendszer csatolt adatbázisokban kezeli a vállalatnál üzemelő, az MT-CMMS rendszer alá vont szerszámgépek, a karbantartó személyzet és a gépek eseti javítására és szervizelésére szerződött partnerek adatait.

A CMMS rendszer kialakítása során a karbantartási utasítások azonosítására egy kódrendszert is ki kell alakítani:

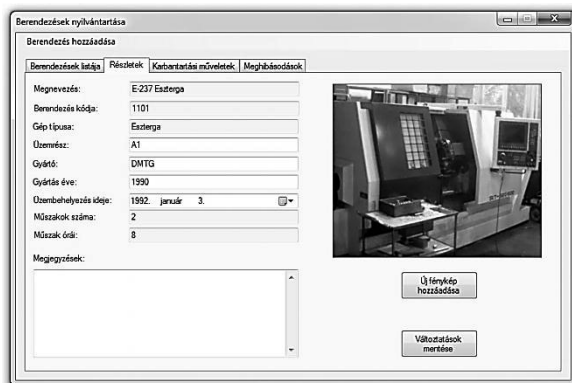
*oooo-bbss-hhhh-tttt(-v),*

ahol:

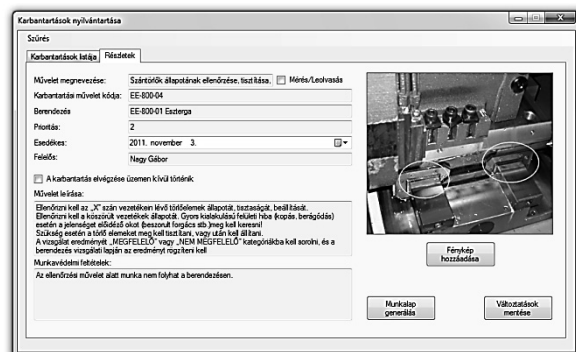
- *oooo* a szervezeti egység kódja,
- *bb* a berendezések kódja,

- ss azonos típusú berendezések esetén, a berendezés sorszáma,
- hhhh a karbantartási hely kódja,
- tttt a karbantartási tevékenység kódja,
- v a karbantartási lap verziószáma, sorszáma.

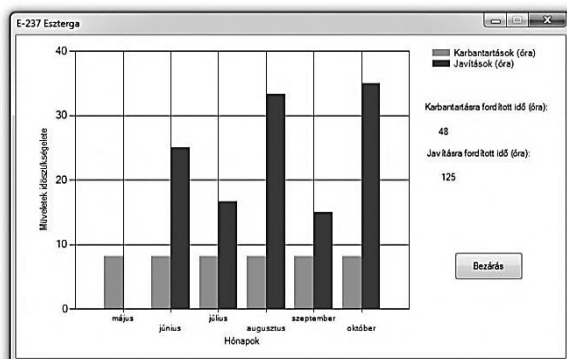
A kódrendszert felhasználva egyértelműen azonosítani lehet, hogy melyik berendezésen, annak mely helyén (részegységén), milyen karbantartási feladatot kell elvégezni.



5. ábra. Az MT-CMMS programrendszer „berendezés” adatlapja



6. ábra. Az MT-CMMS programrendszer „karbantartási utasítások” adatlapja



7. ábra. Az MT-CMMS programrendszer karbantartás-javítás statisztikai ablaka

A programrendszer naponta listázza a karbantartó személyzet részére az elvégzendő feladatokat. A ténylegesen elvégzett karbantartási és javítási feladatokat a program archiválja, továbbá statisztikai elemzéseket készít a karbantartási feladatok hatékonyságának fokozása és a karbantartási költségek csökkentése miatt.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A karbantartási személyzet munkáját támogató korszerű karbantartási rendszerek mára már Magyarországon is jelen vannak, bár e rendszerek aránya elmarad a fejlettebb ipari államokhoz képest. A korszerű számjegyzérlésű szerszámgépek karbantartási feladatainak megtervezése, megszervezése és végrehajtása a gépipari átlagtól lényegesen magasabb felkészültséget igényel.

A döntően számjegyzérlésű szerszámgépeket alkalmazó vállalatok számára jelentős segítséget nyújthat egy olyan MT-CMMS programcsomag, mely elsősorban a korszerű szerszámgépek karbantartási feladatait támogatja.

A programcsomag fejlesztésében mérnökhallgatók is közreműködtek, több szakdolgozat, TDK dolgozat is született ebben a témában.

"A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"

"This research was carried out as part of the TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project with support by the European Union, co-financed by the European Social Fund."

## 7. IRODALOM

- [1] PÉCZELY, GY.: A karbantartás korszerű irányzatai. *Karbantartás és diagnosztika, 2000 II., pp: 4 – 46.*
- [2] ERDÉLYI, F., SÁNTHA, CS., CSÁKI, T.: A "VILMOS" - egy CNC-be integrált szerszámgép felügyeleti rendszer, *XI. Szerszámgép Kollokvium, Budapest, p.: 138-148, Gépgyártástechnológia, Budapest, 1989. 7. szám p.:292-295.*
- [3] LIPOVSZKY, SÓLYOMVÁRI, VARGA: Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartás, *Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1981.*
- [4] NAKAJIMA, S.: Introduction to TPM, *Productivity Press, Cambridge, 1988*
- [5] GAÁL, Z., KOVÁCS, Z.: Megbízhatóság, karbantartás, *Veszprémi Egyetemi Kiadó, 1994.*

# SZUPERFINISELŐ BERENDEZÉS EGY LEHETSÉGES NEMLINEÁRIS DINAMIKAI MODELLJE

## A POSSIBLE NONLINEAR MODEL OF A SUPERFINISHING DEVICE

Dr. Szilágyi Attila\*, Dr. Patkó Gyula\*\*

### ABSTRACT

*This article concerns the investigations on a nonlinear dynamic model of a vibratory superfinishing device. As the nonlinearity, the Coulomb-type damping is considered, which is supposed to be the model of the superfinishing process. The approximation solutions of the nonlinear governing equations are established by the method of linearization above the phase curve, thus the amplitude-frequency expressions in function of the system parameters can be set up. The results obtained analytically, have been proven and supported numerically. This article demonstrates the correlation between the analytical and the numerical results, pointing out the comfortable and accurate application of the applied approximation method.*

### 1. BEVEZETÉS

A szuperfiniselés – más néven tükörsímítás – befejező finomfelületi megmunkálás, általában hengeres felületek, például gördülőcsapágyak futófelületeinek megmunkálására használják. A finiselési műveletet egy célberendezés végzi, amely rendszerint pótlólagosan kerül az alapgépre. Általában a felület simaságát az alapgépbe fogott gyártmány forgatásával és a csiszoló kövek rövid löketű rezgőmozgásával érik el. A kövek mozgása történhet mozgásátalakító merev kinematikával vagy közvetlenül, pneumatikus, hidraulikus, valamint villamos hajtás segítségével.

A szuperfiniselés rezgés- és hőmérsékleti zavaroktól mentes megmunkálói környezetet igényel, és az adaptálhatóság következtében a berendezés befoglaló méreteit is körültekintően kell megválasztani. A befoglaló méreteket meghatározzák a berendezés energetikai viszonyai. Ezt, valamint a rezgésviszonyokat dinamikai vizsgálat segítségével tárhatjuk fel. A dinamikai

\* PhD, egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

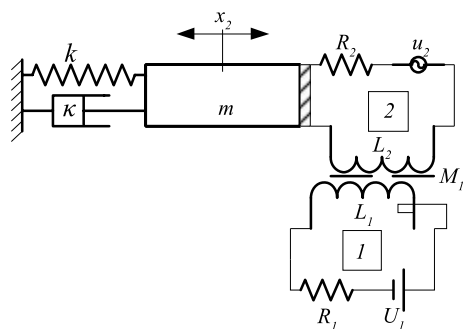
vizsgálatot számos mechanikai modell alapján végezhetjük. Jelen cikk egy ultraprecíz keménysztergáló berendezésre pótlólagosan felszerelhető egyfázisú, villamos hajtású szuperfiniselő berendezés egy lehetséges nemlineáris modelljének dinamikai vizsgálatával foglalkozik, és bemutatja a vizsgálatok során alkalmazott közelítő módszert.

### 2. ELVI ALAPOK

A berendezés kifejlesztésének elvi alapjait az alábbi megfontolások jelentették. A szuperfiniselő berendezést csillapított gerjesztett rezgőrendszernek tekintve kimutatható, hogy adott frekvenciára hangolt és ehhez közeli frekvenciával gerjesztett rendszer kedvező energetikai viszonyok mellett működhet. A vizsgált modell energetikai viszonyait előre felállított szempontok szerint ítéltük meg. Amennyiben ezek a szempontok egy adott munkapont esetén egyidejűleg teljesülnek, úgy a modell a legkedvezőbb energetikai viszonyok között működik.

### 3. MECHANIKAI MODELL ÉS A MOZGÁSEGYENLET-RENDSZER

A vizsgált berendezés – eredetileg két villamos ( $i_1, i_2$ ) és egy mechanikai ( $x_2$ ) szabadsági fokkal rendelkező – elektromechanikai modelljét az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A mechanikai modell [2]

Az ábrán  $m$  a mozgó tekercs és a hozzá kapcsolódó rezgő alkatrészek együttes tömegét,  $k$  a rugóállandót,  $F_s$  pedig a szuperfiniselési folyamatból származó, Coulomb-féle súrlódásnak feltételezett csillapítás abszolút értékét jelöli. Az áramkörü elemek közül  $R_1$ ,  $R_2$  a villamos körök teljes ohmos ellenállását,  $L_1$ ,  $L_2$  a tekercsek önindukciós,  $M_{12}$  pedig a tekercsek kölcsönös indukciós együtthatóit jelöli.  $U_1$  és  $u_2$  jelöli a megfelelő tekercsek egyen, valamint időben változó tápfeszültségeit. A vizsgált modell mozgásegyenlet-rendszerét a Lagrange-féle másodfajú mozgásegyenletekből, egyszerűsítő feltevések figyelembevételével származtatjuk, és a számítások során feltételeztük, hogy az 1 villamoskör állapota független a 2 villamoskör állapotától. Vizsgálataink során a szuperfiniselési folyamatot a Coulomb-féle száraz súrlódási modell írja le, melynek karakterisztikáját az  $S = -F_s \operatorname{sgn}(\dot{x})$  szakadós függvény alakjában vettük figyelembe, ahol  $F_s$  az S súrlódási erő abszolút értéke. Ennek alapján a rendszer mozgásegyenlet-rendszere

$$m\ddot{x} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{x}) + kx - \alpha i = 0$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \Gamma \dot{x} = U_0 \cos \Omega t \quad (1)$$

alakú, ahol  $x = x_2$ , továbbá  $L$ ,  $U_0$ ,  $R$  és  $\Omega$  a 2 tekercs önindukciós tényezője, illetve a gerjesztő feszültségének amplitúdója, ohmos ellenállása, valamint körfrekvenciája.  $\alpha$  és  $\Gamma$  a villamos hajtás erő- és motor-konstansa, melyek az egyszerűsítő feltevések eredményeként adódnak.

#### 4. A KÖZELÍTŐ MEGOLDÁSOK ELŐÁLLÍTÁSA

Az előző fejezetben bemutatott linearizálási módszer segítségével meghatároztuk az eredeti mozgásegyenlet-rendszer

$$m\ddot{x} + \frac{4F_s}{\pi a_1 \Omega} \dot{x} + kx - \alpha i = 0 \quad (2)$$

kvivalens lineáris mozgásegyenlet-rendszerét, ahol feltételeztük, hogy  $x(t) = a_1 \cos(\Omega t + \varphi_A)$  alakú, és  $a_1$  egyelőre ismeretlen amplitúdó. Ehhez hasonlóan,  $i(t) = i_0 \cos(\Omega t + \varphi_i)$  alakban tételeztük fel a 2 villamoskörben folyó áram erősségének idő függvényét, ahol  $i_0$  az áramerősség egyelőre ismeretlen amplitúdója.  $\varphi_A$  és  $\varphi_i$  a gerjesztő feszültséghez képesti

egyelőre ismeretlen fázisszögek. Az  $x(t)$  és  $i(t)$  megoldásalakokat (2)-be behelyettesítve, elvégezve az algebrai átalakításokat, majd az így kapott összefüggéseket rendezve, adódnak a keresett  $a_1$ ,  $i_0$ ,  $\varphi_A$ ,  $\varphi_i$  mennyiségek analitikus kifejezései a rendszerparaméterek és a gerjesztő körfrekvencia függvényében. Az új  $\frac{k}{m} = \nu^2$ ,  $\frac{\Omega}{\nu} = \eta$ ,  $\eta^2 = \xi$  változók bevezetését követően az elmozdulás-amplitúdóra a

$$a_1^\pm(\eta) = -\frac{\frac{8F_s}{\pi} \alpha \Gamma R \nu \eta \pm \sqrt{[\dots]}}{2 \left\{ [mR\nu^2(1-\eta^2)]^2 + \nu^2 \eta^2 [mL\nu^2(1-\eta^2) + \alpha \Gamma]^2 \right\}} \quad (3)$$

kifejezés adódik (részletesen lásd: [2]), ahol  $a_1^+$  a négyzetgyök jel előtt álló pozitív előjelnek,  $a_1^-$  pedig a negatív előjelnek megfelelő görbeágot jelöli,  $\nu$  a rezgőrendszer saját körfrekvenciája,  $\eta$  pedig dimenziótlanított körfrekvencia.

#### 5. NUMERIKUS ELLENŐRZÉS

A numerikus ellenőrzés során a

$$F_s = 60 \text{ N}; m = 6 \text{ kg}; k = 213183 \frac{\text{N}}{\text{m}};$$

$$\Omega \approx 188,5 \frac{1}{\text{s}}; L = 0,0035 \text{ H}; R = 6,8 \Omega; \quad (4)$$

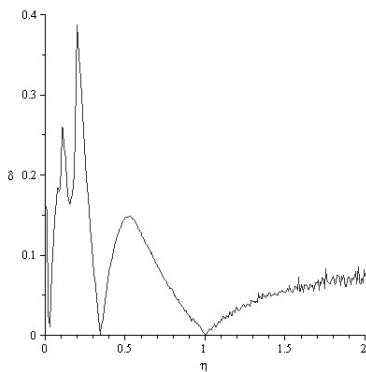
$$\alpha = 20,4 \frac{\text{N}}{\text{A}}; \Gamma = 20,4 \frac{\text{Vs}}{\text{m}}; U_0 = 47 \text{ V}$$

szám adatok [2] mellett, diszkrét  $\eta$  helyeken kiszámolt  $a_1^\pm$ , valamint ugyanitt numerikus módon, 4-ed rendű Runge-Kutta módszerrel meghatározott  $a_{1_{RK}}$  értékeket vetettünk össze. A számítást rezonancia frekvenciánál ( $\eta = 1$ ), valamint alá ( $\eta > 1$ ) és fölé hangolt ( $\eta < 1$ ) esetekben is elvégeztük. Az egyes  $\eta$  értékek mellett elvégzett számítások eredményeit az alábbi táblázat foglalja össze.

		Elmozdulás-amplitúdó [mm]		
		$a_{1_{RK}}$	Linearizálás	
			$a_1^+$	$ a_1^- $
Főléhangolt	$\eta=0,44$	0,77	0,67	0,70
	$\eta=0,83$	1,70	1,61	1,94
Rezonancia	$\eta=1$	5,55	5,58	18,81
Aláhangolt	$\eta=2$	0,16	0,17	0,18
	$\eta=3,46$	0,05	0,05	0,052

1. táblázat. Az analitikus és numerikus eredmények összevetése

Látható, hogy rezonancia frekvenciánál, és aláhangozott esetekben a  $a_1^+$  görbeág függvényértékei közelítik jobban a numerikusan kiszámolt értékeket. Föléhangolt esetekben – az elhanyagolt stick-slip jelenség okaként – a közelítés mértéke már nem annyira egyértelmű, mert egyik esetben  $a_1^+$ , másik esetben pedig  $a_1^-$  függvényértékei közelítik jobban a numerikusan nagy pontossággal kiszámolt amplitúdó értékeket. Diszkrét értékek után egy szélesebb frekvenciatartományon, az  $\eta \in (0; 2]$  intervallumon is megvizsgáltuk a lineáris közelítés pontosságát, csak  $a_1^+$  esetén. A 2. ábra diagramja a  $\delta = \left| 1 - \frac{|a_1^+|}{a_{1RK}} \right|$  kifejezéssel definiált relatív hiba görbét mutatja a dimenziótlanított frekvencia függvényében.



2. ábra. Az analitikus és numerikus értékek eltérése a frekvencia függvényében

Megfigyelhető, hogy az  $a_1^+$  és az  $a_{1RK}$  értékei – a számunkra lényeges – rezonancia frekvencia környezetében jól közelítik egymást, és a közelítés mértéke még nagymértékben aláhangozott rendszerek esetén is kielégítőnek (<10%) mondható. A föléhangolt rendszer esetén tapasztalt nagyfokú eltérése azzal magyarázható, hogy a közelítő megoldással szemben a Runge-Kutta módszer nem tekint el a „stick-slip” jelenségtől, amely nagymértékben föléhangolt esetekben – például  $\eta = 0,44$  esetén – jelentkezik számottevően.

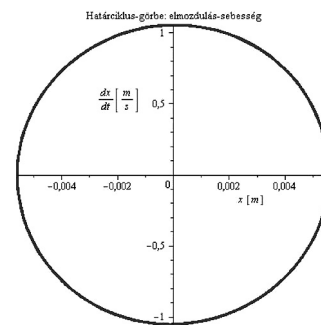
Ezt követően stabilitásvizsgálat segítségével megmutattuk, hogy a (3) kifejezés  $a_1^+$  görbeágához tartozó amplitúdó értékek valósulnak meg tartósan, és meghatároztuk a stabilitási kritériumokat. A kapott analitikus eredmények numerikus ellenőrzését rezonancia frekvencia ( $\eta = 1$ ) esetre végeztük el, mert úgy véltük, és ezt később igazoltuk is, hogy ilyen gerjesztés során valósul meg a legkedvezőbb energetikai állapot. Így

tehát, amennyiben a rendszerben fellépő súrlódási terhelésre teljesül a

$$F_S (\eta = 1) < F_{S_0} = \frac{\pi \alpha U_0}{4 L v} \left[ 1 + \left( \frac{R}{L v} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

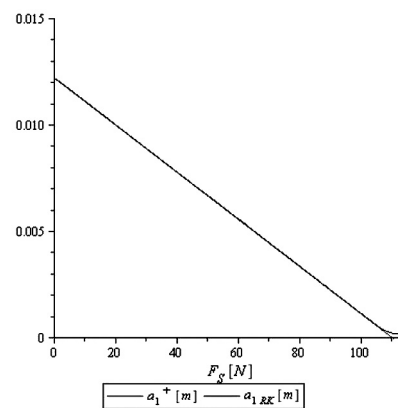
reláció, úgy abban az esetben stabil, periodikus rezgés alakul ki. Az alábbiakban a (4) szám adatok mellett, numerikus számítások segítségével igazoljuk a fenti megállapításokat. Ekkor az elmélet szerint  $F_S < F_{S_0} = 110 N$  esetén adódnak stabil rezgések.

Ebben az esetben (3) alapján  $a_1^+ = 5,58 mm$ , numerikus számítások alapján, a 4-ed rendű Runge-Kutta módszerrel  $a_{1RK} \approx 5,5 - 5,6 mm$  értékek adódnak. Az alábbi, 3. ábra az állandósult rezgés fázisdiagramját mutatja.



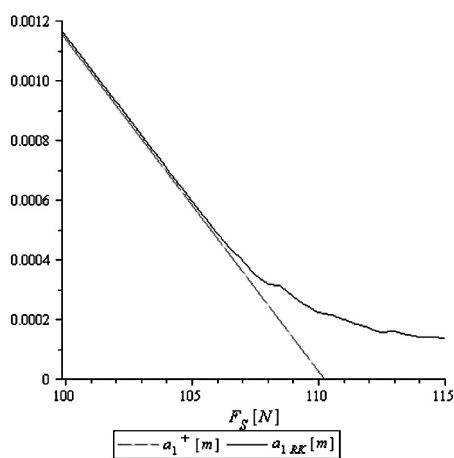
3. ábra. Az állandósult rezgés fázisdiagramja

Az analitikus és numerikus eredmények előzőek során bemutatott összevetését a súrlódási terhelés egy szélesebb intervallumán is elvégeztük. Ezt mutatja a 4. ábra. Látható az analitikus és numerikus értékek egyezése az előre jelzett  $F_S < F_{S_0} = 110 N$  intervallumon.



4. ábra. A numerikus és az analitikus eredmények összevetése

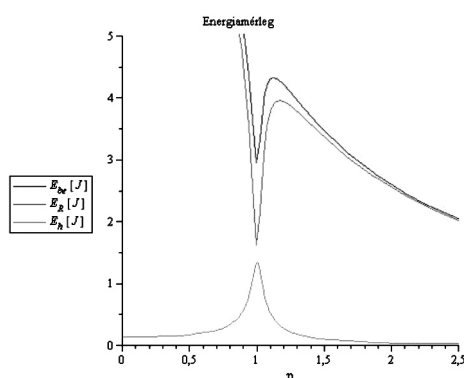
Megfigyelhető továbbá, hogy  $F_{S_0}$  kicsiny környezetében és  $F_{S_0} < F_S$  esetén a lineáris közelítés pontossága rohamosan csökken (5.ábra).



5. ábra. Az analitikus és numerikus értékek eltérése  $F_{S_0}$  kicsiny környezetében

## 6. AZ ENERGETIKAI ÁLLAPOT

A stabil görbeág ismeretében elvégeztük a modell energetikai állapotának feltárását. Ennek során kimutattuk, hogy bizonyos paraméterkombinációk esetén, rezonancia frekvencián gerjesztve a rendszert, az a legkedvezőbb energetikai viszonyok között működik. Az analitikus eredményeket most is numerikusan ellenőriztük. Az alábbi diagramon – a (4) számú adatokra vonatkozóan – megfigyelhetők az energetikai mennyiségek legkedvezőbb energetikai viszonyokra vonatkozó szélsőértékei.



6. ábra. Az energiamennyiségek szélsőértékei rezonancia frekvenciánál

Az energetikai jellemzők ebben a munkapontban kialakuló számértékei lehetővé teszik olyan – az alapberendezés munkateréhez képest – kisméretű szuperfini-

selő berendezés kialakítását, amely könnyen és kényelmesen adaptálható egy, a rezgésekre és a hőhatásokra érzékeny munkaterű alapgépre, elképzelésünk szerint egy ultraprecíziós keményesztergáló berendezésre.

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy szuperfiniselő prototípus berendezés továbbfejlesztésével kapcsolatos nemlineáris dinamikai és energetikai számítások eredményeit foglalja össze. Megmutattuk, hogy alkalmasan megválasztott rugalmas tagot alkalmazva, így a berendezést az előírt szuperfiniselési paraméterekre hangolva, majd a rendszert rezonancia frekvencián gerjesztve, a rendszer a legkedvezőbb energetikai viszonyok között működik. Ennek következtében a megmunkálási paraméterek egy, az alapgép munkateréhez képest kis méretű, viszonylag kis tömegű, gazdaságosan üzemelő berendezéssel teljesíthetők.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen publikáció a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## IRODALOM

- [1] PATKÓ, Gy.: Közelítő módszer nemlineáris rezgések vizsgálatára. Kandidátusi értekezés, Miskolc, 1984.
- [2] SZILÁGYI, A.: Szuperfiniselő berendezés dinamikai vizsgálata. PhD értekezés. Miskolci Egyetem, 2012.

# TRAPÉZMENETES ÉS GOLYÓSORSÓS HAJTÁSOK EGYENÉRTÉKŰSÉGE

## EQUIVALENCE BETWEEN TRAPEZOIDAL- AND BALL- SCREW DRIVES

Dr. Szilágyi Attila\*, Dr. Patkó Gyula\*\*, Dr. Takács György\*\*\*

### ABSTRACT

*The feeding motion of traditional cutting machines is generated by trapezoid-screw drives, so when it comes to the maintenance process of such machines, the replacement of the trapezoid-screw by a ball-screw drive sometimes can be a demand. Some questions can be emerging in connection with the aspects when the replacement of the trapezoid drive is demanded. This article is a brief summary of a method that gives instructions for such a replacement.*

### 1. BEVEZETÉS

Hagyományos forgácsoló berendezések előtoló mozgását trapézmenetes orsóval oldották meg. Így, az ilyen gépek karbantartása, felújítása során gyakran igényként jelentkezik a korszerűtlen trapézmenetes hajtás korszerű, CNC berendezéseken előforduló golyósorsós hajtással történő cseréje. Ekkor kérdésként merülhet fel, hogy melyek azok a szempontok, amelyek alapján eldönthető, hogy az adott trapézmenetes hajtás milyen méretű és típusú golyósorsós hajtással helyettesíthető. Cikkünkben egy ilyen kiválasztási módszer elvi lehetőségét mutatjuk be.

### 2. ELVI ALAPOK

Egy trapézmenetes hajtás orsója négy jellemző igénybevételnek van kitéve: összetett (húzó-nyomó+csavaró), felületi, kihajlás, menettő hajlítás. Az igénybevételi anyagjellemzők értékei, valamint a hajtás jellemzői – geometria, anyagtulajdonságok, mozgásmennyiségek szélsőértékei – alapján minden egyes igénybevétel esetén kiszámítható egy-egy előtoló érték. Ezek közül véve a legkisebbet, majd ezt az

előtoló erő értéket felhasználva, és egy algoritmus segítségével kiválasztott golyóshajtás felületi és élettartam jellemzőit kiszámítva, meghatározhatjuk azt a golyósorsó-anya kombinációt, amely ugyanazokat a terhelési és élettartam követelményeket elégíti ki, mint az eredeti trapézmenetes hajtás.

### 3. A TRAPÉZMENETES ORSÓK IGÉNYBEVÉTELEI

Az alábbiakban az egyes igénybevételekhez tartozó maximális előtoló értékek kifejezéseit soroljuk fel a szükséges bemeneti paraméterekkel együtt. A menettő hajlításból eredő igénybevételt elhanyagoljuk.

Összetett húzó-nyomó+csavaró igénybevétel esetén az előtoló erő maximális értéke

$$F_{e_{max,össz}} = \frac{\pi d_3^2 \sigma_{meg}}{4 \sqrt{1 + 12 \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2 \left[ \frac{\pi d_2 \mu + P \cos(\beta / 2)}{\pi d_2 \cos(\beta / 2) - \mu P} \right]^2}}$$

ahol  $d_2$ ,  $d_3$  és  $P$  az orsó magátmérője, középátmérője, menetemelkedése,  $\beta$  a profilszög,  $\mu$  az orsó anya anyagpárosításra jellemző csúszási súrlódási együttható.  $\sigma_{meg} = \frac{R_{eH}}{n}$ , ahol  $R_{eH}$  az orsó anyagjellemzője,  $n$  pedig a biztonsági tényező.

Hasonló módon adjuk meg a felületi igénybevételhez tartozó maximális előtoló erő értéket.

$$F_{e_{max,felületi}} = \frac{L p_{meg} d_2 \pi H_1 z}{P}$$

ahol  $L$  az anya hossza,  $H_1$  az anya és az orsó meteteinek átfedési hossza,  $z$  a menetbekezdések száma,  $p_{meg}$  a megengedett maximális felületi nyomás, amely függ az anyagpárosítástól és a maximális előto-

\* PhD, egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

ló sebesség nagyságától. Ezekre az adatokra vonatkozóan utalunk a szakirodalomra [3][7].

Az orsó kihajlása az

$$F_{e_{max,kihajlás}} = \frac{21 \cdot 10^4 d_3^4 \pi^3 f_k}{64 L_k^2}$$

kifejezésből számítható, ahol  $f_k$  az orsó megtámasztásától függő korrekciós tényező [4],  $L_k$  a támasztási hossz.

A fenti erők közül általában a felületi igénybevétel-nél meghatározott  $F_{e_{max,felületi}}$  előtoló erő értéke a mérvadó, rendszerint a három érték közül ez adódik a legkisebbre. Ez lesz az irányadó előtoló erő érték a golyósorsós hajtás kiválasztásakor.

#### 4. AZ EGYENÉRTÉKŰ GOLYÓSORSÓS HAJTÁS KIVÁLASZTÁSA

Ehhez a folyamathoz az imént meghatározott előtoló érték és maximális előtoló sebesség mellett rendelkezésre áll a felújítást végző cég által gyártott golyósorsós hajtás választéka. Amennyiben minden egyes választékot – a geometriai és anyagjellemzőivel együtt – egy rekordtömb egyes elemeinek fogjuk fel, úgy például intervallumfelező eljárással – itt az egyes rekordok sorszámára hivatkozva indexként – indítható egy iteratív kiválasztó eljárás. Ennek során először kiválasztásra kerül egy rekord a tömb közepéről, és figyelembe véve rekord elemeit (geometriai és anyagjellemzők, gördülőelemek száma, stb.), valamint az  $F_{e_{max,felületi}}$  előtoló erő értéket, meghatározzuk a kiválasztott golyósorsós konstrukció elemei közötti Hertz-feszültségeket, valamint az élettartamot. A számított Hertz-feszültség értékeket szakirodalomból származó felületi nyomás értékekkel vetjük össze. Amennyiben az összevetés eredménye pozitív, úgy a fenti eljárást a tömbben található, következő kisebb átmérőjű golyósormentes hajtásra is alkalmazzuk mindaddig, míg az összevetés eredménye nem válik megfelelővé. Amennyiben az eljárás első összevetésének az eredménye negatív, úgy felezve a kiválasztott tömbelemhez képest nagyobb átmérőjű orsókat tartalmazó tömbelemek intervallumát az eljárást előlről kezdjük.

Az imént bemutatott algoritmus az alábbiakban tárgyalásra kerülő számítási módszert alkalmazza a Hertz-feszültségre, valamint az élettartam jellemzőkre vonatkozó becsléseket, ellenőrzéseket illetően.

#### 5. ELLENŐRZÉS HERTZ-FESZÜLTÉSRE

Mivel a Hertz-feszültségre történő ellenőrzés során szükségünk van az egymással érintkező felületpárok érintkezési pontbeli görbületi jellemzőire, ezért először ezeket állítjuk elő. Ehhez differenciál geometriai eszközöket alkalmazunk [1][2]. Elsőként felírtuk az anya és az orsómenet felületének paraméteres egyenletrendszerét, amely

$$x(\varphi, \vartheta) = \left( \frac{d_{oI}}{2} + r_p \cos \vartheta \right) \cos \varphi + r_p \sin \alpha \sin \vartheta \sin \varphi$$

$$y(\varphi, \vartheta) = \left( \frac{d_{oI}}{2} + r_p \cos \vartheta \right) \sin \varphi - r_p \sin \alpha \sin \vartheta \cos \varphi$$

$$z(\varphi, \vartheta) = r_p \cos \alpha \sin \vartheta + \frac{h\varphi}{2\pi}$$

alakú, és ahol  $d_{oI}$ ,  $r_p$ ,  $h$  rendre a csavarvonal átmérője, a menetprofil sugara és a menetemelkedés,  $\alpha$ ,  $\vartheta$  pedig szögparaméterek. Ezt követően deriválással előállítottuk a felületi koordinátarendszer

$$\mathbf{g}_1 = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi}; \quad \mathbf{g}_2 = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \vartheta}$$

kovariáns bázisvektorait és a

$$\mathbf{g}^{\mu\beta} = \mathbf{g}^\mu \cdot \mathbf{g}^\beta; \quad (\mu, \beta = 1, 2)$$

kontravariáns mértéktenzort. Ezekből adódnak a görbületi tenzor elemei, amely értékek a Hertz-feszültségek kiszámításához szükségesek. Az érintkezésponthban a csavar felület  $H$  közepes görbületét és a  $K$  Gauss-féle görbületét a görbületi tenzor egyik indexének emelésével nyert vegyes indexű mennyiséggel fejezhetjük ki a

$$b^\mu_\gamma = \mathbf{g}^{\mu\beta} b_{\beta\gamma}; \quad (\mu, \beta, \gamma = 1, 2)$$

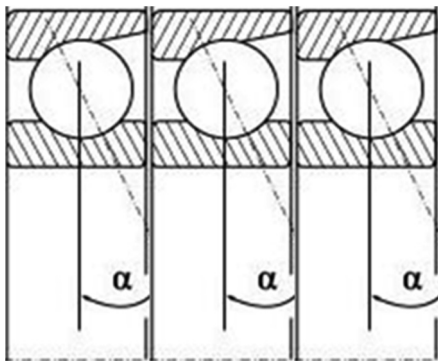
összefüggésnek megfelelően, melyből adódnak a

$$H = \frac{1}{2}(\kappa_I + \kappa_{II}) = \frac{1}{2} b^\mu_\mu; \quad K = \kappa_I \kappa_{II} = \det(b^\mu_\gamma)$$

közepes és a Gauss-féle görbületet, amelyek alapján egy másodfokú egyenlet származtatja a  $\kappa_I$ ,  $\kappa_{II}$  főgörbületet, valamint a

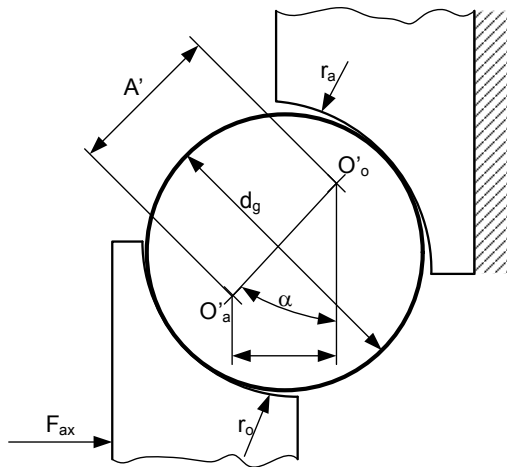
$$R_I = \frac{I}{|\kappa_I|}; \quad R_{II} = \frac{I}{|\kappa_{II}|}$$

hányadosok szolgáltatják a gördülőelem és a menetfelületek főgörbületi sugarait. Szükségünk van továbbá az egyes gördülőelemekre ható erőkre. Feltételezzük, hogy ezek minden gördülő elem esetén azonosak, és ezt a 3. fejezetben meghatározott előtoló erő ismeretében felírhatjuk az alábbiak szerint. A golyósanyagördülőelem-orsó kapcsolatról feltételezzük, hogy jó közelítéssel megfelel egymás mögött elhelyezkedő, ferde hatásvonalú golyóscsapágyak sorozatának (1. ábra).



1. ábra. A golyósorsós hajtás ferde hatásvonalú csapágymodellje

Ezek alapján egyetlen gördülőelem erőjátékát az alábbi ábra részletezi (2. ábra).



2. ábra. Egyetlen gördülőelem erőjátéka

Feltesszük, hogy a golyósorsót csak axiálisan terheljük. Az axiális terhelés hatására az anyánál  $\delta_a$ , az orsónál  $\delta_o$  rugalmas elmozdulás jön létre, melyek

hatására a kezdeti  $\alpha_o$  hatásszög megnő. A ' -vel jelölt mennyiségek a deformációt követő állapotra vonatkoznak. Itt nem részletezett számítások szerint a deformációt követően kialakuló hatásszög értéke az

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{\sin \alpha_o + \frac{\delta_{ax}}{A}}{\sqrt{\cos^2 \alpha_o + \left( \sin \alpha_o + \frac{\delta_{ax}}{A} \right)^2} - 1} \right)$$

összefüggés alapján határozható meg. Egyetlen gördülőelem erőjátékát az

$$F_a = Z F_g \sin \alpha$$

egyenlet írja le, ahol  $F_a$  az axiális terhelés,  $Z$  a terhelésben résztvevő gördülőtestek száma,  $F_g$  pedig a gördülőelem terhelés. Az egyetlen gördülőelemre ható terhelés az előző összefüggésből határozható meg, amely egyéb más jellemzők mellett szükséges adat a golyósorsó rendszer Hertz-feszültségek alapján történő élettartam megítéléséhez. Az axiális terhelés az orsóra ható megmunkálási terhelés mellett a golyósanyát előfeszítő erőt is tartalmazza.

Az előzőekben meghatározott görbületi jellemzők és terhelések alapján – az anyagjellemzőket is figyelembe véve – felírhatjuk az érintkező elemek közötti, ellipszis alakúnak feltételezett kontakt zónák kis- és nagytengelyeinek

$$a_a = n_{aa} \sqrt[3]{\frac{3\eta F_g}{2(\kappa_{11g} + \kappa_{12g} + \kappa_{21a} + \kappa_{22a})}}$$

$$b_a = n_{ba} \sqrt[3]{\frac{3\eta F_g}{2(\kappa_{11g} + \kappa_{12g} + \kappa_{21a} + \kappa_{22a})}}$$

összefüggéseit, ahol a  $\kappa$  értékek a megfelelő főgörbületek az érintkezési pontokban (esetünkben az anya és a gördülő test érintkezési pontjában),

$$\eta = \frac{2(1-\nu^2)}{E}$$

anyagjellemző, az  $(n_a, n_b)$  értékek

a szakirodalomból kereshetők ki [6]. Hasonló mennyiségek írhatók fel az orsó és a gördülő elemek érintkezési viszonyaira. Ezek alapján az orsón és az anyán jelentkező érintkezési nyomások a

$$p_{0o} = n_{po} \sqrt[3]{\frac{3\eta F_g}{2(\kappa_{11g} + \kappa_{12g} + \kappa_{21o} + \kappa_{22o})}}$$

$$p_{0a} = n_{pa} \sqrt[3]{\frac{3\eta F_g}{2(\kappa_{11g} + \kappa_{12g} + \kappa_{21a} + \kappa_{22a})}}$$

kifejezésekkel számíthatók, ahol az  $n_p$  értékek az előzőleg hivatkozott [6] szakirodalom alapján veendő figyelembe.

Az érintkezési nyomás maximum értékei lehetővé teszik a gördülőpályák élettartamának hozzávetőleges minősítését. A szakirodalomban szokás megkülönböztetni a statikus, illetve a dinamikus igénybevételeket. Statikus igénybevételre a szakirodalom a  $p_0 = 4600 \text{ MPa}$  értéket javasolja a legnagyobb megengedett érintkezési nyomásnak. Dinamikus igénybevétel esetén a legnagyobb megengedett érintkezési nyomást az [6] szakirodalom szerint  $p_0 = 3500 \text{ MPa}$ , a [5] szakirodalom szerint pedig  $p_0 = 5,25 \text{ HB}$ , ahol  $[p_0] = \text{MPa}$ , HB pedig az orsó és anya alapanyagának Brinell-keménysége.

Az élettartam számítás az ismert

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

összefüggés alapján becsülhető, ahol  $C$  a dinamikus alapterherbírás,  $P$  az egyenértékű axiális terhelés, amely a 3. Fejezetben kiszámolt előtölő erők közül a minimális. Ez az összefüggés üzemórára és megtett útra is átszámítható. Értéke a gyártói katalógusban feltüntetett elvárt élettartam értékek alapján ítéhető meg.

Jelenleg folyik egy olyan szoftver kifejlesztése, amely a fenti részlejárások mindegyikét, egységes programba integrálva tartalmazza.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben röviden bemutatunk egy olyan módszert, melynek segítségével lehetővé válik trapézmenetes és golyósorsós hajtások terhelhetőségének és élettartamának összevetése, így egymással történő helyettesítése, amely egyébként hagyományos trapézmenetes mellékhajtással ellátott megmunkálógépek esetén sokszor felmerül igényként.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg

This research was carried out as part of the TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project with support by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

## IRODALOM

- [1] BÉDA, Gy., KOZÁK, I.: Rugalmas testek mechanikája. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- [2] Dr. SZABÓ, T., SZILÁGYI, A., Dr. TAKÁCS, Gy.: Golyósorsó konstrukciók élettartamának meghatározása. XXV. microCAD International Scientific Conference, 31st March – 1st April 2011. Miskolc – Egyetemváros, pp: 45 – 50.
- [3] Dr. TERPLÁN, Z.: Gépelemek I. Tankönyvkiadó, Budapest. 1990.
- [4] <http://www.scribd.com/farhadfakurian/d/60174920-Kammerer-Engels>
- [5] MOLNÁR, L., dr. VARGA, L.: Gördülő csapágyazások tervezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [6] PONOMARJOV, SZ. D.: Szilárdsági számítások a gépészetben, III. Kötet. Lemezek. Héjak. Vastagfalú csövek. Érintkezési Feszültség. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
- [7] UNGÁR, T., VIDA, A.: Segédlet a Gépelemek I-II. kötetéhez. Tankönyvkiadó, Budapest 1989.

# HIDROPLASZTIKUS SZORÍTÓEGYSÉG MECHANIKAI VIZSGÁLATA

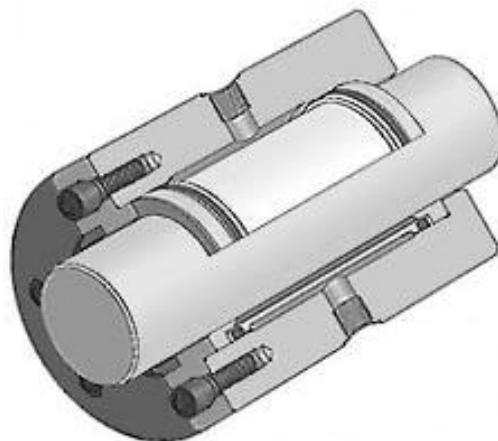
## MECHANICAL ANALYSIS OF A HYDROPLASTIC CLAMPING DEVICE

*Dr. Szilágyi Attila\*, Dr. Takács György\*\*, Dr. Barna Balázs\*\*\*, Demeter Péter\*\*\*\**

### ABSTRACT

*This article is the brief summary of the mechanical backgrounds of a hydroplastic clamping device. This device might be an option for clamping the continuous indexed rotary tables at certain positions.*

*Some analytical and numerical methods of mechanics are applied in order to investigate and calculate the clamping capability of such devices.*



1. ábra. Hidroplasztikus szorítóegység [1]

### 1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években a komplex szerszámgép-részegységek között fontos szerepet töltenek be a körasztalok, melyekkel szemben – a dinamikusan terjedő szimultán többtengelyes megmunkálások miatt – egyre fokozódó elvárások vannak.

A statikus merevség mellett egy körasztal további lényeges jellemzője a megmunkálás során, a forgácsolási folyamatból származó forgató nyomatékkal szembeni ellenállás. Ezt valamilyen – erő- vagy alakzáró elven működő – beépített fékberendezéssel biztosítják. Diszkrét osztású körasztalok esetén erre szolgál a Hirth-fogazat, folytonos körasztalok esetén lehetőségként merül fel a hidroplasztikus szorítóegység működése.

Cikkünkben egy ilyen szorítóegység működésének mechanikai hátterét mutatjuk be röviden, először a mechanika analitikus, majd numerikus eszközeit felhasználva.

### 2. A SZORÍTÓEGYSÉG MŰKÖDÉSI ELVE

A körasztal rögzítését hidroplasztikus elvi szorítóegység alkalmazásával kívánjuk elvégezni. Ennek működési elvét az 1. ábra alapján érthetjük meg.

\* PhD, Egyetemi adjunktus, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* Tanszéki mérnök, ME, Szerszámgépek Tanszéke

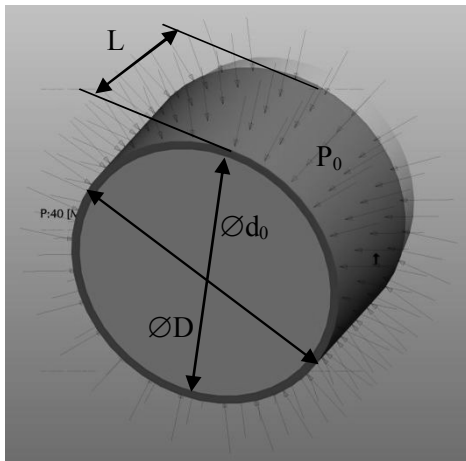
\*\*\*\* Egyetemi adjunktus, ME, Szerszámgépek Tanszéke

A szorítóegység egy házból és egy abban elhelyezett kompozit (fém+műanyag) hüvelyből áll. Az egységet a hüvelyen keresztül illesztik a rögzíteni kívánt tengelyre, majd a házelemen keresztül nagy nyomású hidraulikával kapcsolják össze. A hüvely külső palástfelületére (fehér felület) ható hidraulikus nyomás következtében az ráfeszül a tengelyre, arra nyomóerőt gyakorolva – az ennek következtében fellépő nyugvó súrlódási erő miatt – bizonyos határig megakadályozza a tengely forgató nyomaték hatására bekövetkező esetleges elfordulását. Olyan szorító berendezés kiválasztása a cél, amely adott hidraulikai nyomás mellett egy előírt maximális forgatónyomaték mellett is képes rögzíteni a körasztalt.

A továbbiakban először elméleti, majd pedig numerikus – végeeselemes – analízis alkalmazásával vizsgáljuk a szorítóegység megfelelő működését.

### 3. ELMÉLETI VIZSGÁLAT

Ekkor a szorító egységet egy nulla fedésű, játégmentesen illesztett cső-tengely kapcsolatnak tételezzük fel (2. ábra), és a számítások során, első közelítésben eltekintünk a vékonyfalú cső rugalmasságától.



2. ábra. Az elméleti modell

Terhelés tehát csak a csőelem külső palástján ébred. Ez homogén, radiális irányú nyomó terhelés, nagysága  $p_0 = 400 \text{ bar} = 40 \text{ MPa}$ . A geometriai méretek a fenti ábráról olvashatók le: a cső külső átmérője  $D = 66 \text{ mm}$ , belső átmérője és a tengely átmérője  $d_0 = 60 \text{ mm}$ , az érintkezési hossz pedig  $L = 40 \text{ mm}$ . Mivel a cső falvastagsága jóval kisebb, mint annak átmérője, ezért feltételezzük, hogy az érintkező felületek között a nyomáseloszlás szintén radiális irányú és homogén, nagysága pedig megegyezik  $p_0$ -lal. Feltételezzük továbbá, hogy az érintkező felületek között a nyugalmi súrlódási együttható  $\mu_0 = 0,1$ . Ezt, valamint a 2. ábra jelöléseit figyelembe véve, az érintkező felületek mentén ébredő megoszló nyugvó súrlódási terhelés

$$dM = \frac{d}{2} dF_s$$

elemi nyomatékot kompenzál, ahol

$$dF_s = \mu_0 p_0 dA.$$

A  $dA$  elemi felület

$$dA = \left( \frac{d_0}{2} L \right) d\phi$$

alakú, ahol  $d\phi$  az elemi középponti szög. Ennek megfelelően írható, hogy

$$dM = \mu_0 p_0 L \left( \frac{d_0}{2} \right)^2 d\phi,$$

amelyből a maximális szorító nyomatékra

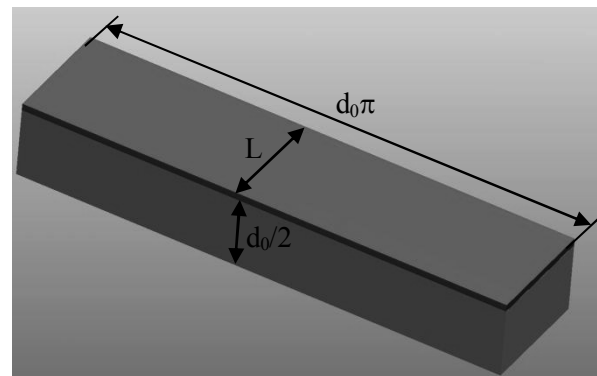
$$M_{max} = \int_0^{M_{max}} dM = 2\pi\mu_0 p_0 L \left( \frac{d_0}{2} \right)^2$$

adódik. Adataink alapján a maximális szorító nyomatékra  $M_{max} = 900 \text{ Nm}$  értéket kapunk, vagyis ekkora megmunkálási csavaró nyomaték megcsúszás nélküli elviselésére alkalmas az általunk alkalmazni kívánt szorító egység.

Hangsúlyozzuk, hogy mind ez csak abban az esetben igaz, ha az érintkező felületek között fellépő nyomás homogén, és az érintkező felületek anyagai ideálisan merevek. A valóságban az érintkező anyagok rugalmasak, és ennek következtében a felületek közötti nyomáseloszlás sem egyenletes. Ezért a továbbiakban numerikus eszközökkel is megvizsgáljuk a fenti elméleti modellt.

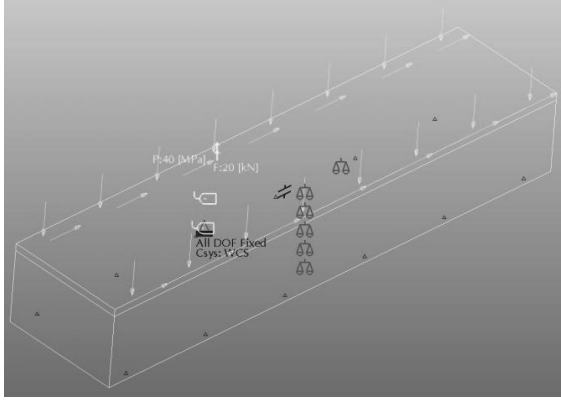
#### 4. NUMERIKUS ANALÍZIS

Numerikus vizsgálat segítségével a fenti modell valósághibb viselkedését tárjuk fel. A számítási idő lecsökkentése végett a fent alkalmazott forgásszimmetrikus modell kiterített változatát vizsgáljuk (3. ábra).



3. ábra. Az egyszerűsített végeselemes geometriai modell

Az ábrán barna színű lemez a kiterített csőpalást, amely ráfekszik a kiterített tengelyt szimbolizáló szürke hasábra. A kiterítésből adódó méreteket is feltüntettük. A fenti modell alapján létrehozott mechanikai modellt a 4. ábra mutatja.



4. ábra. A mechanikai modell

A fenti ábrán megfigyelhető a modellen alkalmazott terhelés. A lemezre merőlegesen hat a hidraulikai nyomás, értéke  $p = 400 \text{ bar} = 40 \text{ MPa}$ , amely az érintkező felületek közötti súrlódási erőt biztosítja. A valóságos tengelyre ható megmunkálási nyomatékokot – mivel a tengely kiterített – egy, a lemezre ható erőterhelés alakjában vettük figyelembe. Ennek értékét

$$F_t = \frac{2M_t}{d_0}$$

lapjára ható nyomaték, amelyet a szorítóegységnek kell elviselnie,  $d_0$  pedig továbbra is a tengelyátmérő.

A fenti ábrán ez a terhelés a lemez síkjában, azzal párhuzamosan lett elhelyezve. A numerikus számítások során több nyomaték esetében is elvégezzük a szimulációt, melyek eredményeként kapjuk az érintkező felület tapadási és megcsúszási zónáit. Előzetes számításaink szerint megcsúszás  $M_t = 900 \text{ Nm}$ , azaz esetünkben

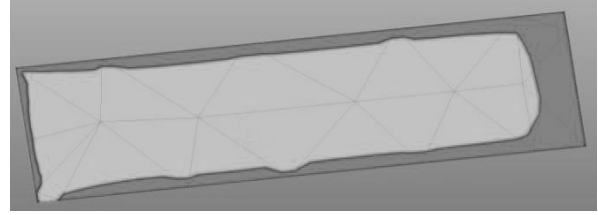
$$F_t = \frac{2M_t}{d_0} = \frac{2 \cdot 900000 \text{ Nmm}}{60 \text{ mm}} = 30000 \text{ N} = 30 \text{ kN}$$

terhelésnél következik be. Kényszerként teljes megfogást alkalmaztunk, amely a hasáb alsó felületére hat. Az alábbi táblázat tartalmazza az egyes terhelő nyomatékokat és az azoknak megfelelő terhelő erőt.

Terhelő nyomaték [Nm]	Terhelő erő [kN]
600	20
870	29
900	30
960	32
1050	35
1200	40

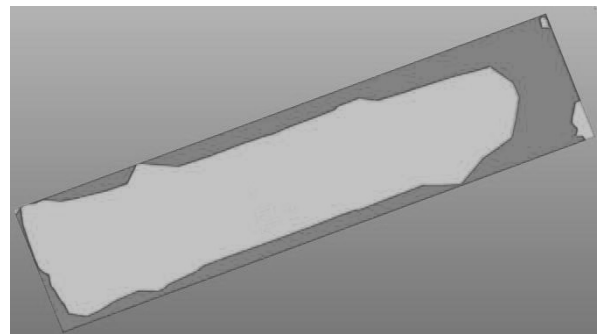
1. táblázat. A nyomatékok és terhelő erők megfeleltetése a végeleemes modellhez

Az egyes terhelésekhez tartozó színiskálás diagramok az alábbi ábrákon láthatók. Az 5. ábra – 10. ábra az érintkező felületet jelenítik meg, amelyen sötét tónussal a megcsúszási, világos tónussal pedig a tapadási zónákat ábrázoljuk.



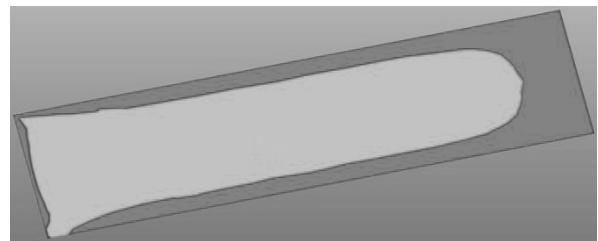
5. ábra. Az érintkező felületek

$F_t = 20 \text{ kN}$  ( $M_t = 600 \text{ Nm}$ ) terhelés esetén



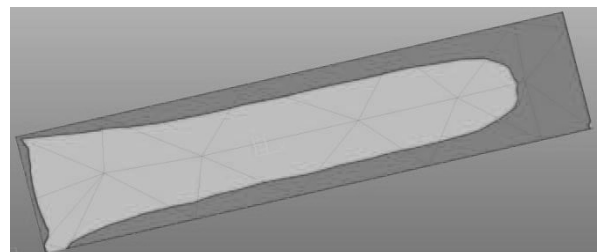
6. ábra. Az érintkező felületek

$F_t = 29 \text{ kN}$  ( $M_t = 870 \text{ Nm}$ ) terhelés esetén



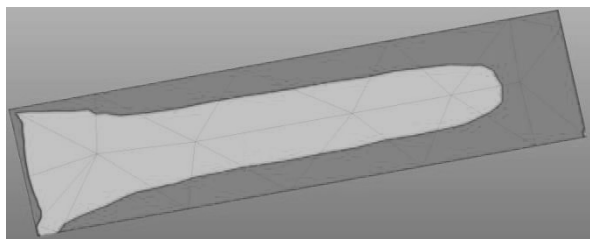
7. ábra. Az érintkező felületek

$F_t = 30 \text{ kN}$  ( $M_t = 900 \text{ Nm}$ ) terhelés esetén

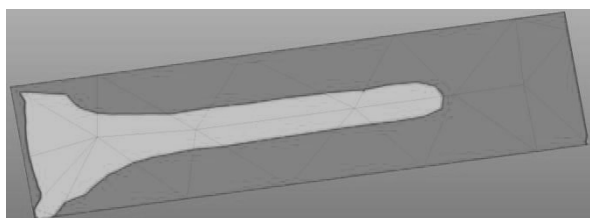


8. ábra. Az érintkező felületek

$F_t = 32 \text{ kN}$  ( $M_t = 960 \text{ Nm}$ ) terhelés esetén



9. ábra. Az érintkező felületek  $F_t = 35\text{ kN}$  ( $M_t = 1050\text{ Nm}$ ) terhelés esetén

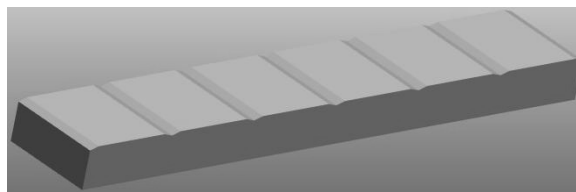


10. ábra. Az érintkező felületek  $F_t = 40\text{ kN}$  ( $M_t = 1200\text{ Nm}$ ) terhelés esetén

Az ábrák a tapasztalattal megegyező trendet jelenítik meg, azaz változatlan nyomóerő és növekvő terhelő erők mellett a megcsúszás valószínűsége is növekszi. Megfigyelhető, hogy az  $F_t = 20...30\text{ kN}$  ( $M_t = 600...900\text{ Nm}$ ) tartományon a tapadási zóna területe közel azonos értékű, és jóval meghaladja a pirossal jelölt csúszási zóna területét. Nagyobb terhelések esetén –  $F_t = 32...40\text{ kN}$  ( $M_t = 960...1200\text{ Nm}$ ) – a megcsúszási zóna területe jelentős mértékben növekszik, ami arra utal, hogy ebben a terhelési intervallumban az érintkező felületek között létrejövő megoszló súrlódási erőrendszer már nem képes ellenállni a körasztal lapon fellépő nyomatéknak, nagy valószínűséggel ekkora terhelések mellett a tengely palástfelülete megcsúszik a szorító egység érintkező felületéhez képest.

A továbbiakban megvizsgáljuk, hogy sima felszínű helyett bordázott tengelypalástot alkalmazva, hogyan módosul a szorítóegység működése. A bordázott tengely kiterített modellje az alábbi ábrán látható (11. ábra). A bordázott felszíntől azt várjuk, hogy erőzárás mellett alakzárás is fellép, így a szorítóegység ugyanakkora hidraulikus nyomás mellett nagyobb terhelő nyomatéknak is képes ellenállni. A terhelések, a megfogási kényszer, és az érintkező felületek súrlódási együtthatója megegyezik az előző modellnél alkalmazott jellemzőkkel. A továbbiakban bemutatásra kerülő, végeeselemes számítással kapott 12. ábra szintén az érintkező felület tapadási (világos) és megcsúszási (sötét) zónáit jeleníti meg, az előző modellnél is al-

kalmazott terhelések egyike  $F_t = 20\text{ kN}$  ( $M_t = 600\text{ Nm}$ ) mellett.



11. ábra. A bordázott tengely kiterített modellje



12. ábra. Az érintkező felületek  $F_t = 20\text{ kN}$  ( $M_t = 600\text{ Nm}$ ) terhelés esetén

Látható, hogy a ritkán bordázott felület nyomatéktartó képessége már  $M_t = 600\text{ Nm}$ -es terhelő nyomaték esetén is kérdéses. Az ábrákból az is kitűnik, hogy a sűrűn bordázott felülethez képest megnöveli a szorítóegység nyomatéktartó képességét, azonban még ez az érték is elmarad a sima érintkező felületeknél meghatározott  $M_t = 900\text{ Nm}$ -es értéktől, így a konstrukcióba sima tengelyfelületre javasolt beépíteni a hidropasztikus szorítóegységet.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben egy folytonos osztású körasztal esetén alkalmazható hidropasztikus szorítóegység szorítóképeségének vizsgálatát végeztük el. Analitikus eszközökkel határoztuk meg azt a határ nyomatékot, amelyenél a szorítás még elégséges. Az analitikus eredményeket numerikus (VEM) módszerrel ellenőriztük, az eredmények jó közelítéssel alátámasztják egymást.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen publikáció a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## IRODALOM

[1] <http://www.kostyrka.com/engineering.html>

# MEGOLDÁSVÁLTOZATOK KARUSSZELESZTERGA ÁTALAKÍTÁSÁHOZ

## VARIETIES OF SOLUTION FOR THE IMPROVMENT OF A VERTICAL TURNING MACHINE

*Dr. Szilágyi Attila\*, Dr. Takács György\*\*, Dr. Velezdi György\*\*\*, Demeter Péter\*\*\**

### ABSTRACT

*The demand for the accurate machining of large parts for the power and heavy industrial pieces of equipment or plants is increasing. However, only a few number of machines capable of producing such large parts are available in Hungary and, what is more, their average life exceeds two or even three decades. The increased demand for the accuracy requires the extension of the capability of these less modern machines, such as the dimensions of their working room, statical and dynamical stiffness, etc. This article is going to display some conceptional solutions of a vertical turning lathe (VTL) machine, which an increased dynamical stiffness can be achieved by.*

### 1. BEVEZETÉS

Az energetikai ipar, a fa- és papíripar nagyméretű és –tömögű, viszonylag pontos munkadarabok megmunkálását igényli nagyteljesítményű berendezései számára. A hazai ipar szereplői kevés olyan megmunkáló berendezést üzemeltetnek, amelyek e követelményeket kielégítik, ráadásul az üzemelő gépek átlagéletkora 20-30 év vagy még több. A felhasználó ipar részéről jelentkező egyre újabb igények sokszor megkövetelik a viszonylag idős berendezések felújítását, ezzel együtt átalakítását, munkaterük kibővítését, statikai és dinamikai merevségük fokozását. Cikkünkben egy VTL 6300 karusszel-esztergáló berendezés dinamikai merevségének növelését célzó megoldásváltozatait mutatjuk be, melyek rezgéstani jellemzőit numerikus mechanikai eszközökkel szemléltetjük.

### 2. A VIZSGÁLT BERENDEZÉS

\* PhD, egyetemi adjunktus, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* Egyetemi adjunktus, ME, Szerszámgépek Tanszéke

A dinamikai vizsgálatok alapját egy VTL 6300 típusú karusszel-esztergáló berendezés képezi. Ennek két késtartó tornya egy függőleges mozgású mellgerendán helyezkedik el. A szerszámartók közül az egyik alkalmas hajtott szerszám, például tárcsamaró adaptálására. Az alábbi ábra egy, a vizsgált berendezéssel azonos típusú berendezést, valamint annak forgó asztalon elhelyezkedő nagyméretű munkadarabot mutatja (1. ábra).



1. ábra. VTL 6300 típusú karusszeleszterga berendezés

A gyártás ezen fázisában az üst jellegű munkadarab belső hengeres felületét kell ellátni viszonylag mély, keskeny és egymástól kis osztástávolságban elhelyezkedő beszúrásokkal az alkotó teljes hossza – kb. 2800 mm – mentén. A megmunkálás során számos probléma jelentkezett, melyek közül alapvető a késtartó gerenda maximális, 2000 mm-es lökethossza, ugyanis emiatt a hornyok elhelyezése az alkotó teljes hossza mentén nem lehetséges. További lényeges probléma, hogy a késtartó gerenda kb. 1100 mm-es vagy ennél hosszabb gerendakinyúlásától megmunkálástól kezdődően fokozott mértékű szerszámrezgés jelentkezik, amely az előírt pontosságú megmunkálást lehetetlenné teszi. Ez utóbbi probléma részleges megoldását jelenti, hogy a berendezést üzemeltető cég esztergakés helyett hajtott szerszámmal, többkéses tárcsamaróval végzi a hornyok megmunkálását. Ez a technológia csökkenti a megmunkálás során kialakuló rezgések mértékét.

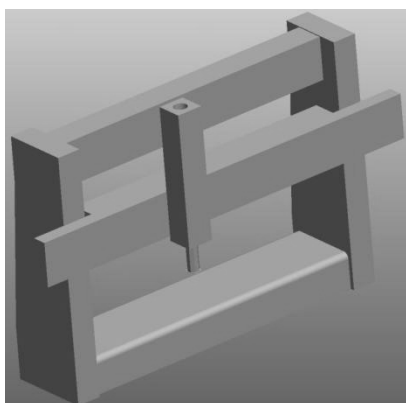
A fentiekben vázolt két alapvető probléma értékelése és lehetséges megoldásai végett kereste meg a be-

rendezést üzemeltető cég a Miskolci Egyetem Szer-  
számgépek Tanszékét. A Tanszék egy előjelentés  
formájában fogalmazta meg szakvéleményét, és az  
alábbiakban ennek rövidített kivonatán keresztül mu-  
tatjuk be az általunk javasolt megoldásváltozatokat.

### 3. A JELENLEGI TECHNOLOGIA REZGÉSTANI VIZSGÁLATA

A részletes ajánlattétel előkészítéseként a Miskolci  
Egyetem Szerszámgépek Tanszéke tájékoztató jellegű  
végelemes analízis sorozatot végzett a vizsgálat  
tárgyát képező VTL 6300 típusú karusszeleszterga-  
berendezés megmunkálás közbeni viselkedését illető-  
en. Ennek során első közelítésszerűen megvizsgáltuk a  
jelenleg alkalmazott simító marási technológiának a  
gép rezgésállapotára gyakorolt hatását. Rezgésanalízis  
segítségével megvizsgáltuk a szerszámtartó gerenda  
különböző kinyúlásainál fellépő rezgések mértékét.  
Megvizsgáltuk továbbá, hogy a teljes hossz mentén  
elhelyezkedő beszúrások elkészítéséhez a szerszámtar-  
tó gerenda elméleti meghosszabbítása hogyan befolyá-  
solja a rezgéseket.

A szimulációkhoz használt, egyszerűsített geometri-  
ai modellt az alábbi ábra mutatja (2. ábra).

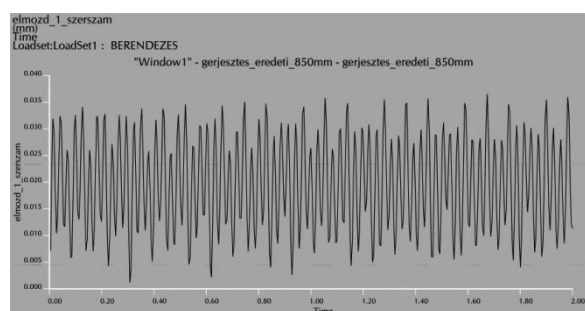


2. ábra. A vizsgált karusszeleszterga 3D-s CAD mo-  
dellje

A modellezéshez szükséges méreteket az átadott  
rajzdokumentációk alapján vettük fel. Feltételeztük,  
hogy az oszlopok és a keresztösszekötő gerendák  
üregesek. Feltételeztük továbbá, hogy a mellgerenda  
tömör, a függőleges szán és gerenda pedig furatos. A  
vezetékek és szánok kapcsolatát, valamint a konstruk-  
ción előforduló csavarkötéseket első közelítésben  
merevnek tekintettük. Feltételeztük továbbá, hogy  
forgácsoló erő – első közelítésben – csak egy szer-  
szám élre hat, és ezt az erőt az előzetesen kiszámított  
értéknél magasabb értékkel vettük figyelembe. A  
marószerszám fordulatszámát  $n = 300 \text{ 1/min}$  érté-  
künek vettük fel.

Az előzetes vizsgálat során 4 szimulációt végeztünk,  
melyek a 8-szögletű gerenda különböző kinyúlási  
értékeihez tartoznak. Ezek az értékek rendre: 850 mm,  
1200 mm, 1900 mm és az elméletileg szükséges 3000  
mm. Az egyes szimulációk végeredménye egy rezgési  
diagram, melyeken a marótárcsa középpontjának idő-  
beli elmozdulása (rezgése) követhető nyomon. A  
diagramok függőleges tengelyein ezeket az elmozdu-  
lás értékeket tüntetjük fel mm-ben.

A 3. ábra a 850 mm-es gerenda kinyúláshoz tartozó  
szerszámközepppont rezgésértékeit mutatja az idő  
függvényében (a rezgéseket 2 másodperces időtarto-  
mányon szimuláltuk).



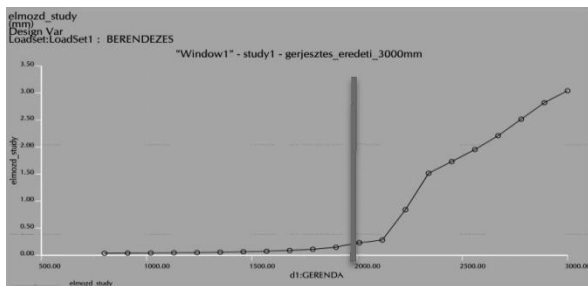
3. ábra. 850 mm-es gerendakinyúlásnál fellépő rezgés

Ezeken megfigyelhető, hogy a fellépő forgácsoló  
erő statikusan deformálja a gerendát, és a rezgések  
erre a statikus deformációra szuperponálódnak. Meg-  
figyelhető továbbá, hogy a gerendakinyúlás növekedé-  
sével a kialakuló rezgések amplitúdója is arányosan  
növekszik, melyek értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

Gerendakinyúlás [mm]	Statikus de- formáció [mm]	Rezgés amp- litúdó [mm]
850	0.017	0.017
1200	0.02 – 0.025	0.025
1900	0.09	0.08
3000	1.7	1.2-1.3

1. táblázat. Rezgésjellemzők az egyes gerendakinyúlá-  
soknál

A következő diagram további gerendakinyúlási ér-  
tékek mellett mutatja a forgácsolás során kialakuló  
rezgések okozta szerszámelmozdulások maximális  
értékeit (4. ábra). A diagramba vastag függőleges  
vonallal berajzoltuk a vizsgált karusszel eszterga ge-  
renda kinyúlásának maximális értékét (1950 mm).  
Megfigyelhető, hogy ennél alig hosszabb – kb. 2100  
mm-es vagy annál nagyobb – elméleti gerendakinyú-  
lásnál a szerszámközepppont maximális elmozdulása  
ugrásszerűen megnövekszik, ami lehetetlenné teszi a  
mélyebben fekvő hornyok megmunkálását a jelenleg  
alkalmazott marási technológiánál.



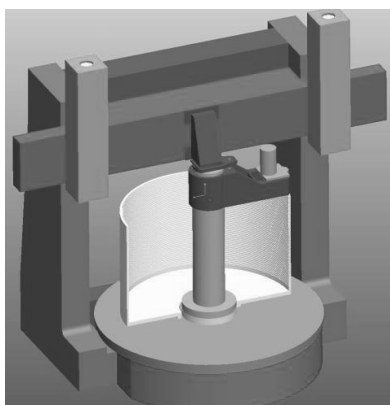
4. ábra. A rezgésamplitúdó alakulása a gerendakinyúlás függvényében

A fentiekben vázolt szimuláció segítségével, elsőközelítésként alkalmazott modellt felhasználva, számítással igazoltuk a jelenleg alkalmazott technológia gyakorlatban tapasztalt korlátait. Egyúttal arra is rámutattunk, hogy csupán a gerenda meghosszabbításával történő gerendakinyúlás növelés önmagában nem oldja meg a megmunkálás során fellépő rezgések okozta problémát.

#### 4. MEGOLDÁSVÁLTOZATOK

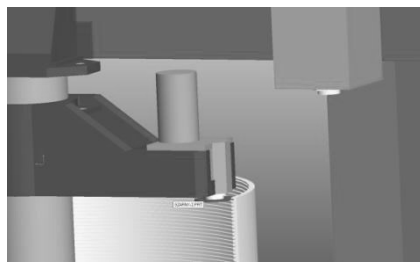
A továbbiakban a fenti problémák kiküszöbölését célzó megoldásokat és azok rezgéstani vizsgálatát mutatjuk be.

A modálanalízis során azt tapasztaltuk, hogy a mellgerenda elmozdulása is számottevő. Ezért kézenfekvőnek tűnt az alábbi ábra szerinti, célgépesített megoldás (5. ábra).



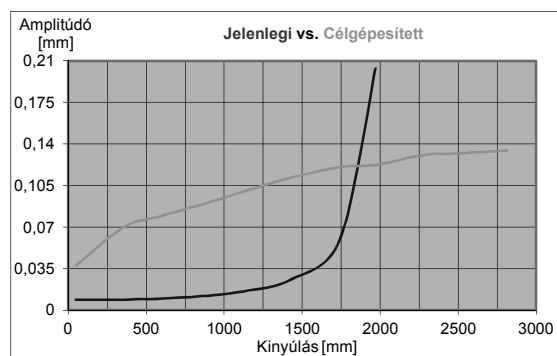
5. ábra. A mellgerenda merevítése

A mellgerenda merevítése során a keresztgerendát mereven, egy üreges oszlop segítségével, csapágyazáson keresztül támasztjuk a forgó asztalhoz. Az oszlop egyúttal a beszurások megmunkálását végző aggregátegység vezetőoszlopaként is funkcionál. Az alábbi ábra az aggregátegységgel történő megmunkálást szemlélteti (6. ábra). Az ábrán piros színnel jelenik meg a marótárcsa.



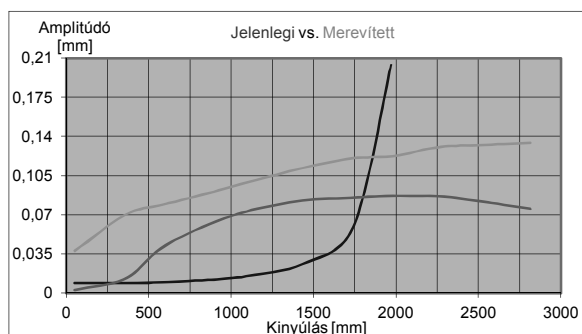
6. ábra. Horonymegmunkálás maró aggregátegységgel

A 7. ábra diagramja az eredeti és a fentiekben bemutatott célgépesített megoldásváltozat merevségét veti össze, értelmezése a 4. ábra szerinti.



7. ábra. A célgépesített változat merevsége (rózsaszínnel jelölve)

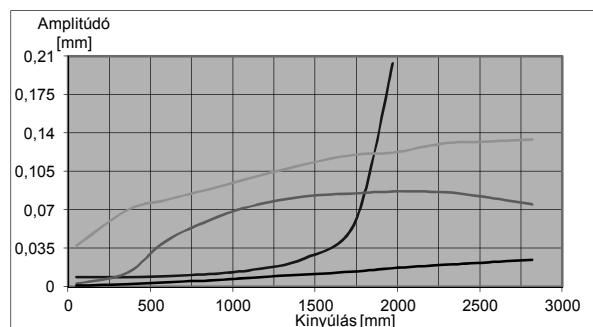
Az ábrából egyértelműen kitűnik, hogy ezzel a megoldással lehetséges elkészíteni a 2000 mm-nél mélyebben elhelyezkedő beszurásokat, azonban a lökethossz elején a célgépesített berendezés merevsége jóval alatta marad a jelenlegi berendezésnek. Megnövelve az aggregát egységet hordozó szánc méreteit és merevségét, a célgépesített megoldás merevsége az alábbiak szerint változik (8. ábra, piros színű görbe).



8. ábra. A merevített célgépesített változat

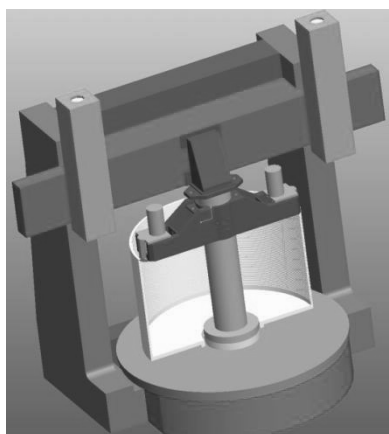
Ekkor a merevség a lökethossz első felében még mindig jelentős mértékben elmarad az eredeti beren-

dezés merevségéhez képest. Jelentős mértékben csökkenthető ez a különbség akkor, ha a vezető oszlop külső átmérőjét megnöveljük (9. ábra, fekete görbe).



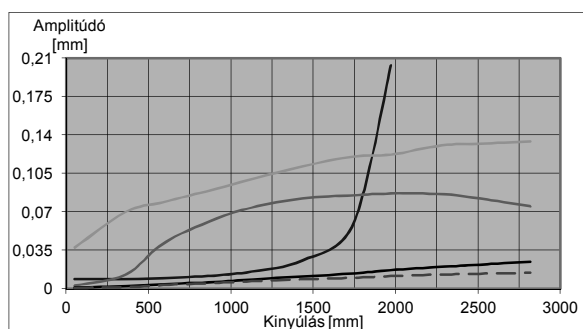
9. ábra. A merevség növelése a vezetőoszlop méretének növelésével

Ekkor azonban a vezetőoszlop pótlólagos beszerelése nehézkessé válik. Egyedi és hasznos megoldás adódik akkor, ha az alábbi ábrának megfelelően két aggregát egységet alkalmazunk ellentétes forgácsolási irányokkal, és az eredetihez képest fele akkora fogásmélységgel (10. ábra).



10. ábra Két aggregátegység alkalmazása

Ennek hatására a megmunkálás során fellépő rezgés amplitúdók a megmunkálás magassági helyzetének függvényében az alábbi diagram szerint alakulnak (11. ábra, szaggatott vonal). Megfigyelhető, hogy ebben az esetben a merevség már a magassági helyzet elején is csak kis mértékben tér el az eredeti berendezés itt tapasztalt kedvező merevségi értékeitől (kék színnel jelölt görbe), a magassági helyzet további, kb. kétharmadnyi szakaszán viszont jóval kedvezőbb mértékű bármelyik előzőleg bemutatott megoldás esetén előre jelzett merevségi értékekhez képest.



11. ábra. A két aggregátegység merevségre gyakorolt hatása

## ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben egy nagyméretű karusszelesztergáló berendezés átalakítási lehetőségeit mutattuk be. Rezgésdinamikai vizsgálatok eredményeinek alapján olyan megoldásváltozatokat tártunk fel, amelyek segítségével az eredeti berendezés dinamikai merevsége, és ezzel együtt megmunkálási tartománya, valamint pontossága is növelhető.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg

This research was carried out as part of the TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project with support by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

# REVERSE ENGINEERING ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

## APPLICATION POSSIBILITIES OF REVERSE ENGINEERING

*Csáki Tibor\*\* , Lajtos Julianna\*\*\* , Makó Ildikó\*\* , Szilágyi Attila\**

### ABSTRACT

*The conventional touch probes used to digitizing objects are not applicable many cases because accuracy limitations, time of scanning or merely the fact of touching. On the field of digitizing of objects the touchless methods play more and more roles. It gives dense points and such a way it is more realistic, and the time a scanning is shorter.*

### BEVEZETÉS

A mérnöki tevékenységek során mindig létezett meglévő alkatrészek reprodukálásának az igénye, azaz a munkadarab alapján a gyártási dokumentáció előállítása, azonban a korábbi lehetőségek ezt csak egyszerű darabok esetében tették lehetővé. A számítógéppel támogatott mérnöki tevékenység szolgáltatásainak folyamatos és gyors bővülése azonban elvezetett a Reverse Engineering megjelenéséhez és gyakorlati alkalmazásához. Reverse Engineering alatt azt a tevékenységet értjük, amikor egy fizikailag létező tárgy alapján létrehozuk annak CAD geometriáját, vagy továbbá CAM szoftver felhasználásával alkalmas CNC szerszámgépen megmunkáljuk az új darabot. Ez az út már bonyolult felületeket tartalmazó darabok esetén is járható. Ily módon egyrészt elektronikus formában reprodukálni tudjuk a hiányzó, vagy korszerűtlen formában meglévő gyártási dokumentációkat, másrészt módosításokat hajthatunk végre a mintaként használt darabon.

A Reverse Engineering egyik igen hasznos alkalmazása a sérült, törött vagy hiányos tárgyak digitalizálása és 3D-s környezetben való visszaállítása.

A Reverse Engineering jól alkalmazható a minőségellenőrzés, illetve minőségbiztosítás területén is. Ha rendelkezünk a tárgy 3D-s, parametrikus modelljével

és e modell felhasználásával gyártott késztermékkel, a késztermék digitalizálása után összehasonlító elemzést végezhetünk az eredeti modell és a késztermék digitalizált modellje között.

### A VIZSGÁLATI ESZKÖZ, ÉS ELJÁRÁS

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke egy Breuckmann Smart Scan 3D-HE típusú háromdimenziós optikai szkennelvel rendelkezik, melynek segítségével ilyen feladatok elvégzését el tudja látni. A nagyfelbontású szkennel önmagában még nem garantálja azt, hogy a kapott pontfelhő a tárgy minden részletét pontosan mutatja. Előfordul, hogy a tárgy sajátossága miatt hiányos, vagy zavaró információkat (zaj) kapunk a tárgy felszínéről. Ezek eltüntetésére, professzionális szoftverekre van szükség. A szoftveres javítás elvégzésére a Geomagic Studio<sup>1</sup> szoftvert használjuk.

A csúcsmínőségű Smart Scan 3D-HE<sup>2</sup> mobil szkennel másodperceken belül képes nagy pontosságú 3D koordinátákat szolgáltatni bármilyen objektumról. A tárgy mérete a különböző objektívokészleteknek köszönhetően széles határok közt változhat, a készülék a bonyolult geometriájú alakzatokat is jól kezeli. Az akár századmilliméter alatti helyzetpontossággal történő pontfelvétel mellett a rendszer képes a tárgy színét is felismerni és rögzíteni a 3D-s digitális állományban.

A szkennel a látható fény tartományában dolgozik és érintés nélküli mintavételezés útján gyűjti be az információt a tárgyak felszínéről. Fő részei a kamerarendszer, mely két, egyenként 5 megapixeles kamerából áll, valamint a központi projektor, mely a tárgyak megvilágítását végzi. A projektor egy folyamatosan sűrűsödő kontrasztrácsot vetít a felületre, mely függőleges „világos” és „sötét” vonalakkal tevődik össze (1. ábra). Ennek a fényrácsnak a letapogatott tárgy felületén történő torzulása szolgáltat információt a felület jellegéről. A torzult fényrácsot fényképezi a két kamera, majd ezek alapján készíti el az eszközhöz tartozó

\* PhD, egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

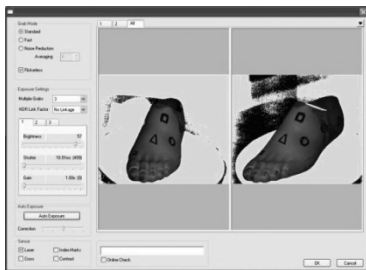
\*\*\* mérnöktanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

<sup>1</sup> A Geomagic cég terméke

<sup>2</sup> A Breuckmann GmbH terméke

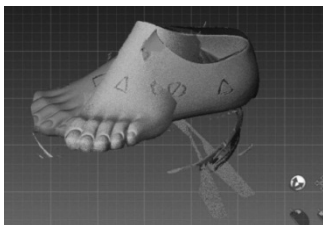
szoftver a 3D-s pontfelhőt. A kamerák cserélhető lencserendszerrel rendelkeznek, melyek segítségével a látómező mérete változtatható.

A kamerák látómezeje a különböző lencserendszerek segítségével 90x90mm, és 600x600mm között változtatható. A munkaterület nagyságával természetesen fordított arányban áll a mintavételezési pontosság. Az egymás után készített képeket szoftveresen fűzzük össze, így a letapogatandó testről teljes 3D-s képet kapunk. A szkennelést vezérlő és adatgyűjtő szoftver az Optocat 2009. A letapogatás után a kamerarendszer látómezejébe eső képek közös metszete jelenik meg számítógépen (1. ábra).



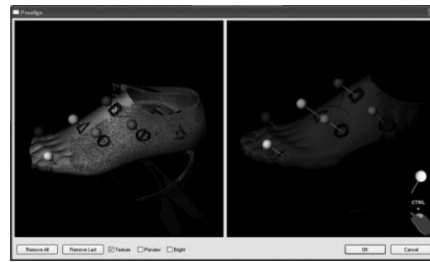
1. ábra A kamerák felvételei

Az egymás után készített képeket a szoftver saját, globális koordináta-rendszerében helyezi el, így azok más orientációval rendelkeznek, mint a megelőző szkennelések felvételei (2. ábra). A program ezért nem fűzi össze automatikusan a képeket, ezt a feladatot "manuálisan" kell elvégezni.



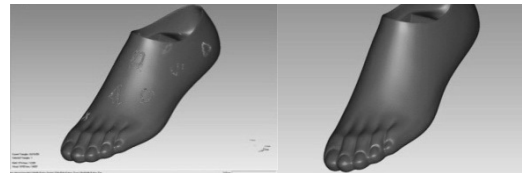
2. ábra Egymást követő felvételek összefűzeten állapotban

Az újabb képeket az előzőekhez kell illeszteni, hogy a teljes testmodellt megkapjuk. Ez jelölők segítségével történik. A szoftver a két képen (az előzőleg összeillesztett részletek, és az utoljára szkennelt rész) "manuálisan" elhelyezett jelölők környezetében lévő pontokat hasonlítja össze, és az egyezőket egymáshoz rendezve bővíti a modellt. Így végül megkapjuk a teljes testnek megfelelő 3D-s pontfelhőt (3. ábra).



3. ábra Az összefűzés folyamata

Az Optocat szoftverből elmentett pontfelhőre a Geomagic felületet illeszt, így egyszerűbb a javítás, illetve módosítás. A program segítségével el tudjuk távolítani a fölösleges pontokat, felületi kitüremkedéseket, a kezelő által létrehozott felületi jelöléseket és meg tudjuk szüntetni az esetleges folytonossági hiányokat (5. ábra). Ezután a javított modell megfelelő fájlformátumba kimentve felhasználható CAD szoftverek, RPT technológiák, vagy NC program generáló szoftverek számára.



4. ábra Javítás Geomagic szoftverrel

A fentiekben ismertetett példa a vizsgálati eszköz, és a vizsgálat bemutatásán kívül rámutat az egyik lehetséges alkalmazási területre is. Az emberi művegtag nem csak bonyolult felület, melynek gyártó szerszámát előállítani, majd a kész „termék” ellenőrizni nem egyszerű feladat, hanem esztétikai követelményeket is ki kell elégítenie. Ha valakinek kéz, vagy lábfej pótlására van szüksége, megoldható az ép végtag beszkenelése, majd CAD módszerekkel a tükörkép létrehozása, illetve annak legyártása.

## TIPIKUS REVERSE ENGINEERING FOLYAMAT

A klasszikus Reverse Engineering folyamatot egy műszaki alkalmazás segítségével mutatjuk be. Az első feladat a 6. ábrán látható ventilátor vezetőkerék CAD állományának előállítása volt, hogy annak segítségével áramlástanai szimulációkat lehessen végezni.

A szkenneléshez a munkadarabot megfelelően elő kell készíteni, azért, hogy a szkennerek a lehető legpontosabban be tudja mérni a pontok helyzetét. A vezetőkerék geometriája miatt sok felvételre volt szükség, azért, hogy minden felületről elegendő számú pontot lásson a szkennerek mindkét objektívje.



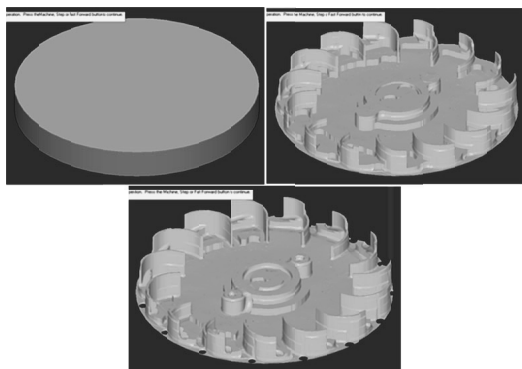
5. ábra Ventilátor vezetőkerék

A további feladat a kerék forgácsoló megmunkálására alkalmas technológia előállítás volt. Ennek érdekében a szkenneléssel létrehozott STL fájlt a Szerszámgépek Tanszék rendelkezésére álló **MasterCAM X6<sup>3</sup>** szoftverrel alakítottuk tovább. Itt az első fázis a hibás felületelemektől megtisztított MCX kiterjesztésű fájl létrehozása volt. Erre a felületre terveztük ezután a forgácsoló technológiát.



6. ábra MCX fájl

A megmunkálási technológia egyes lépései, és a vizualizálás eredménye a 7. ábrán láthatók.



7. ábra A megmunkálás lépései

A TIOP-1.3.1-07/1-2F-2008-0005 projekt keretében beszerzésre került álló korszerű CNC gépek segítségével a Tanszék a bonyolult alkatrészek forgácsolását is el tudja végezni, illetve lehetőség nyílik az eredeti és a szkennelt állományból készült alkatrész összehasonlítására.

<sup>3</sup> A CNC Software Inc. terméke

## MÉRÉSI-MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSI ALKALMAZÁSOK

A rendszer pontossági jellemzői lehetővé teszik a mérés technikai alkalmazásokat is. A gyártáshoz használt CAD modell, és a digitalizált test összehasonlítása a minőségellenőrzés, illetve a minőségbiztosítás hatékony eljárása. Ezen eljárás előnye az, hogy szabad terebeli felületek esetén is megbízhatóan használható. Ilyen felületek forgácsolással történő megmunkálása a mai magas szinten automatizált, több irányított tengellyel rendelkező szerszámgépeken megoldható, felvetődik azonban a kérdés, hogyan ellenőrizhetjük megbízhatóan a méret- és alakhelyességet.

A továbbiakban a fentiekben ismertetett minőségellenőrzési eljárás alkalmazási lehetőségeit, illetve lehetséges alkalmazási területeit mutatjuk be.

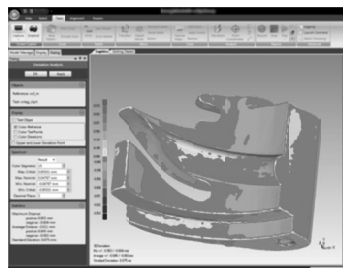
Az első példa golyósanya visszavezető tag méreteinek, illetve méreteltéréseinek ellenőrzése alkalmazott megvalósítását

Látható, hogy a geometriailag többféle felületelem-ből álló test méréssel történő méret-, és alakellenőrzése nem egyszerű feladat. Jól megoldható ezzel szemben a fentiekben leírt eszköz és mérési eljárás segítségével. A vizsgálat céljára rendelkezésre állt a tervezéshez és gyártáshoz szükséges CAD modell, és az ez alapján legyártott darab. Első lépésben a fentiekben ismertetett módon beszkeneltük az elkészített visszavezető tagot. A művelet eredményeként létrehozott, már javított modell a 8. ábrán látható.

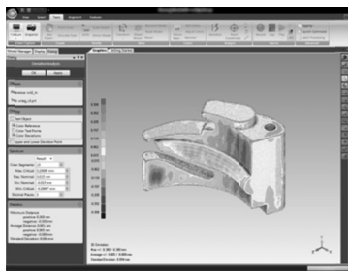


8. ábra Szkennelt modell

A szoftver lehetőséget nyújt a CAD modell által definiált felület, és a letapogatott felület egymásra illesztésére, és az eltérések megjelenítésére.



9. ábra Megjelenített  $\pm 0,953$  mm közti méreteltérések



10. ábra Megjelenített  $\pm 0,3$  mm közti méreteltérések

A 9. ábra a  $\pm 0,953$  mm közti eltéréseket mutatja a test különböző felületein. A különböző nézeti képek alapján megállapítható, hogy a vizsgálati tartomány szűkíthető, mert a működő felületek eltérései kisebbek a megadott tartománynál.

Látható, hogy a méreteltérések gyakorlatilag a  $\pm 0,3$  mm tartományba esnek (10. ábra).

A következő illusztrációban szereplő „alkatrész” a Sanatmetal Kft. gyártmánya, egy térdprotézis femur komponense (11. ábra).



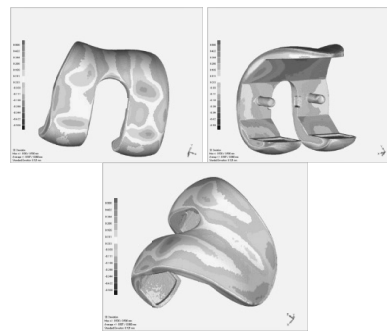
11. ábra Térdprotézis femur komponense

Látható, hogy a geometriailag többféle felületelem-ből álló test méréssel történő méret-, és alakellenőrzése nem egyszerű feladat. Első lépésben a fentiekben ismertetett módon beszkeneltük az elkészített femurkomponenst. A művelet eredményeként létrehozott, már javított modell a 12. ábrán látható.



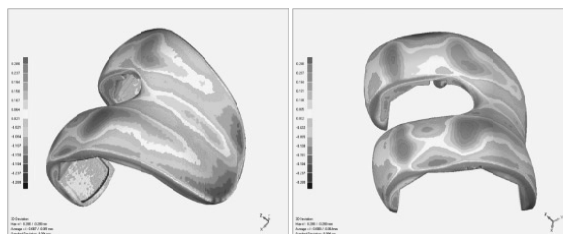
12. ábra Szkennelt modell

A CAD modell, és a szkennelt felület egymásra illesztése után először a  $\pm 0,5$  mm közti eltéréseket vizsgáltuk meg a test különböző felületein (13. ábra).



13. ábra Megjelenített  $\pm 0,5$  mm közti méreteltérések

A különböző nézeti képek alapján megállapítható, hogy a vizsgálati tartomány szűkíthető, mert a működő felületek eltérései kisebbek a megadott tartománynál.



14. ábra Megjelenített  $\pm 0,28$  mm közti méreteltérések

A 14. ábra a szűkített tartományban vizsgált  $\pm 0,28$  mm közti eltéréseket mutatja.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A 3D-s optikai szkennelést felhasználó korszerű eljárás jó segítség lehet a bonyolult felületű tárgyak gyártási programjának, illetve technológiájának véglegesítése során, és egy hatékony eszközt nyújt a méret- és alakellenőrzésben.

Jelen publikáció a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## IRODALOM

- [1] Breuckmann Szkennerek  
<http://www.breuckmann.com/en/home.html>
- [2] Geomagic Studio 2012  
<http://www.geomagic.com/en/products/studio/>
- [3] Szerszámgépek Tanszéke reverse engineering laboratóriumának bemutatása  
<http://www.szgt.uni-miskolc.hu/~scan3d/>

# GÖRDÜLŐCSAPÁGYAK REMANENS ÉLETTARTAMÁNAK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON THE REMANENT LIFETIME OF ROLLING-ELEMENT BEARINGS

*Dr. Szilágyi Attila\*, Dr. Takács György\*\*, Dr. Barna Balázs\*\*\*, Demeter Péter\*\*\*\**

### ABSTRACT

*There are certain cases can be mentioned, when the failure of machinery is not rooting in the damage of a rolling element bearing. During the maintenance of such a machine, the following problem arises: since the bearings are still in working order, do they need to be replaced by a new one at the same time together with other parts of the machine? This question may turn up at companies, whose profile is the production and refurbishing of car industrial components, such as generators or starters. Some companies have to refurbish tens of millions of such components annually. Today's economical situation makes these companies consider the remanent lifetime of the components to be refurbished. This consideration can be motivated by owning such a test procedure and a device, which the high-accurate estimation of the used bearings' remanent lifetime can be performed by.*

*This paper deals with a test procedure which seems to be capable of performing the accurate estimation of the remanent lifetime of ball bearings.*

### 1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékének kutatócsoportjai az elmúlt évtizedekben jelentős tapasztalatra tettek szert a különféle precíziós gépelemek és gyártóeszközök kifejlesztésében. Ennek egyik előzménye volt az 1980-90-es években a Miskolci Egyetem és a Magyar Gördülőcsapágy Művek által a Szerszámgépek Tanszékén közösen működtetett „vezeték fejlesztő-vizsgáló” bázis, ahol kifejlesztésre került egy új moduláris, precíziós gördülőpapucs-család. A csapágyipari termékek élettartam-vizsgálatával kapcsolatosan megszerzett tapasztalatok alapján folyik jelenleg a Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszékén gördülőcsapágyak remanens élettartamának meghatározására alkalmas módszerek kutatása és fejlesztése.

\* PhD, Egyetemi adjunktus, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* Tanszéki mérnök, ME, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\*\* Egyetemi adjunktus, ME, Szerszámgépek Tanszéke

tamának meghatározására alkalmas módszerek kutatása és fejlesztése.

Napjaink környezettudatos felfogása szerint az ipari termékek megsemmisítése során elsődlegesen az újra felhasználható alapanyag minél hatékonyabb kinyerése a cél. Ugyanakkor a recycling folyamatok során kinyert anyagok egy része magasabb feldolgozási szinten is újrahasznosítható lenne. Ebbe a kategóriába tartoznak az ipari termékekből kibontott csapágyak, melyek, ha elegendő remanens élettartammal rendelkeznek, újrakondicionálás után akár új termékbe is beépíthetők az ismert korlátok figyelembevételével.

A folyó kutatási projekt célja olyan innovatív módszerek kifejlesztése, amelyek képesek kiválasztani azokat a recycling folyamat során keletkező, de komplex termékként is újrahasznosítható csapágyakat, amelyek maradó élettartama az elvárt eredeti élettartam 50%-át nagy biztonsággal meghaladja.

### 2. ELMÉLETI HÁTTÉR

Gördülőcsapágyak remanens élettartamát összehasonlító vizsgálat segítségével szokás megbecsülni [1][2]. Ennek során megnézik, hogy a vizsgált csapágy valamely jellemzője egy ugyanolyan típusú referencia-csapágy ismert élettartam görbéjének mely szakaszára esik. Ismerni kell tehát a referencia-csapágy meghatározott körülmények között felvett, egy előre definiált csapágy-jellemzőre vonatkozó élettartamgörbéjét, valamint a vizsgálandó csapágy hasonló körülmények között megállapított jellemzőjét.

A remanens élettartam becsléséhez használt csapágyjellemző típusát a vizsgálati eljárás határozza meg. A csapágy-diagnosztika számos vizsgálatot ismer, így a csapágyjellemzők típusa is sokféle lehet [1]. A [3][4] munkák a leggyakrabban alkalmazott csapágyvizsgálati módszereket foglalják össze. A továbbiakban röviden áttekintjük a rezgésvizsgálati eljárás lényeges jellemzőit.

### 3. REZGÉSVIZSGÁLAT

Gördülőcsapágyak rezgésdiagnosztikája során különféle, frekvencia- és időtartományon elvégezhető jelanalizálási technika létezik.

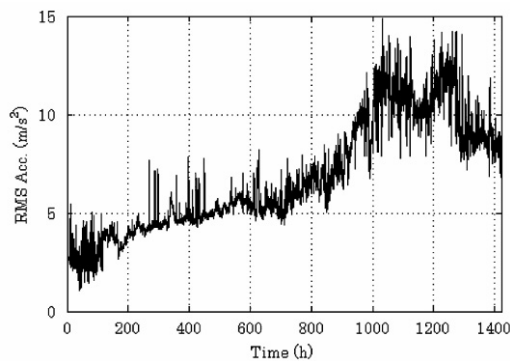
Ezek közül valószínűleg a spektrumanalízis a legelterjedtebb módszer. Ismeretes, hogy a gördülőcsapágy, mint rugalmas test, azzal az alapvető mechanikai (fizikai) tulajdonsággal rendelkezik, hogy leginkább egy-egy bizonyos "saját" frekvencián képes adott irányokban rezgéseket végezni. A felvett rezgéssel spektrumanalízisével ezek a jellegzetes frekvenciák "láthatóvá" válnak, és – az aktuális gépfordulatszám figyelembevételével – hozzárendelhetők a csapágyalkatrészekhez. Defektus megjelenése és továbbfejlődése esetén e jellegzetes frekvenciákon kibocsájtott rezgési energia megváltozik, és ez a spektrumban is megjelenik. Az amplitúdó növekedés mértékéből – összehasonlítva azt egy referencia csapágy spektrumdiagramjaival – a remanens élettartam becsülhető.

A tönkremeneteli szint – ezzel együtt a remanens élettartam – becslésére számos, sztochasztikus jellegű, ún. tönkremeneteli indexek használata terjedt el. Ezek az indexek a gördülőcsapágyak remanens élettartamának statisztikai módszerekkel történő megítélésé kapcsán alakultak ki, és időtartományon értelmezzük azokat. A statisztikai módszerek egyszerű és gyors adatkezelést és számítást tesznek lehetővé. Ezek közül a négyzetes középérték (RMS), a ferdeség ( $S_k$ ), a kurtosis (K) és a Crest-tényező (C) a

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2}, \quad S_k = \frac{M_3}{\sigma_3},$$

$$K = \frac{M_4}{\sigma_4}, \quad C = \frac{\max(\text{Ampl.})}{RMS} \quad (1)$$

kifejezésekkel definiálhatók. Az alábbi diagram például az RMS index időbeli változását mutatja.

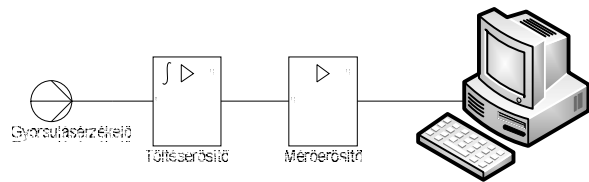


1. ábra. A statisztikai indexek élettartam diagramja [4]

A diagramon jellegzetes pontok figyelhetők meg, ahol a diagram változási gyorsasága, valamint trendje hirtelen változást szenved. Ezek a pontok újabb defektusok megjelenéséhez, illetve a meg lévők továbbfejlődéséhez köthetők. A továbbiakban az ilyen vizsgálatok elvégzéséhez szükséges mérőlánc felépítését mutatjuk be.

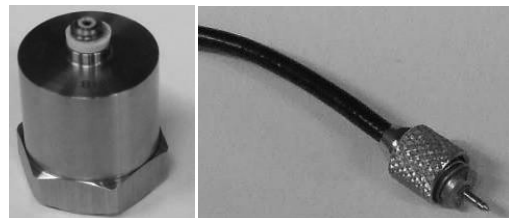
### 4. A MÉRŐLÁNC

A rezgésmérés műszerlánc a mindenkori mérési cél függvénye. Más műszerezést követel meg egy laboratóriumi mérés, vagy egy üzemben történő mérés, esetleg az üzemben megvalósított folyamatos rezgésfelügyelet. Itt mérési pontossági, gazdaságossági, kezelhetőségi szempontok egyaránt felmerülnek. Minden műszerlánc rendelkezik azonban valamilyen rezgésérzékelővel, előerősítővel és kijelző, kiértékelő műszerrel. Az erősítőegységek tartalmazzák a megfelelő szűrőegységeket is.



2. ábra. A rezgésdiagnosztika mérőlánc

Az általunk alkalmazott, Brül&Kjaer gyártmányú, 4370 típusjelű gyorsulásérzékelő a standard pontosságú és érzékenységu érzékelők közé tartozik, üzemi körülmények között is megfelelően alkalmazható. Pontossága ennek a típusnak a legkisebb, azonban a vizsgálatok során trendfelvételre kívánjuk alkalmazni. Kereskedelmi áru, és ezért gazdaságilag is a legkedvezőbb megoldás. Ráadásul ebből a típusból több is található a Szerszámgépek Tanszékén, így hiba eliminációra is hatékonyan fel tudjuk használni őket. Az érzékelő és a teflonszigetelésű jelkábel az alábbi ábrákon látható.



3. ábra. A piezoelektromos rezgésérzékelő és a jelkábel

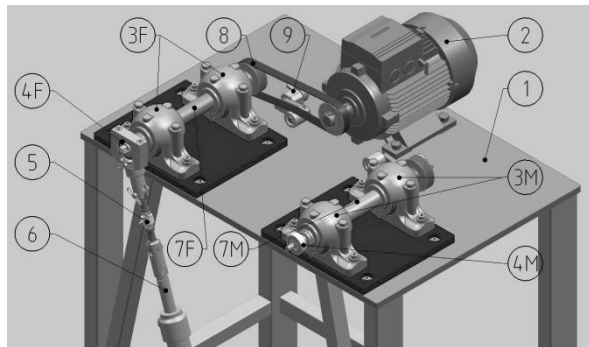
A vizsgálatok során az érzékelő rögzítését állandó mágnes segítségével oldjuk meg. A teflonszigetelésű jelkábel alkalmazására az átvezetési ellenállás magas értéken ( $R_e > 10^{12} \Omega$ ) való tartása miatt van szükség.

A jelátalakítás terén olyan megoldást kell választanunk, amely egyrészt független a kábelkapacitástól, másrészt – bár ez esetünkben annyira nem lényeges – képes megoldani a nagy időállandó igényt ( $\tau \rightarrow \infty$ ). E két problémát egyidejűleg oldhatjuk meg töltéserősítő alkalmazásával. A töltéserősítési elv kidolgozása W. P. Kistler svájci fizikus nevéhez fűződik, találmánya 1950-ben lett szabadalmaztatva. A töltéserősítő kimenetén  $\pm 10V$  tartományba eső analóg mérőjelet kapunk. Ezt közvetlenül nem tudjuk számítógépbe vezetni, ezért egy mérőerősítő közbeiktatása is szükséges.

Mérőerősítőként egy HBM gyártmányú, SPIDER típusú, nyolccsatornás normál erősítőt alkalmazunk. Ez párhuzamos kimeneten keresztül csatlakozik a kiértékelő szoftvert tartalmazó számítógéphez. Minta-vételi frekvenciaként  $f_s = 9,6 kHz$  értéket állítunk be. Megjegyezzük, hogy a gyorsulásérzékelő  $4,8 kHz$ -ig használható torzításmentesen.

## 5. A VIZSGÁLÓ BERENDEZÉS

A berendezés fő egységeit az alábbi ábra mutatja (4. ábra).



4. ábra. A csapágyvizsgáló berendezés

Az ábrán két orsó különböztethető meg. A baloldali orsó (7F) kizárólag a fásztást végzi, a jobb oldalon lévő pedig a vizsgáló orsó (7M). Ez utóbbin vesszük fel a remanens élettartam becsléséhez szükséges mérési adatokat. A két orsó csapágyazásukban különbözik egymástól: a fásztó orsó masszív, kétsoros, önbeálló golyóscsapágyakon (3F), a mérő orsó pedig SKF gyártmányú siklócsapágyakon (3M) fut. Így szándékozzuk kiküszöbölni a masszív gördülő csapágyazásból eredő rezgéseket. A vizsgálandó csapágyak a tengelycsapokra illeszthető szerelt házban (4F) helyezük

el, és a mérés-fásztási ciklusok váltogatásakor házastul helyezük a megfelelő orsócsapra. Az orsókat egy SIEMENS, frekvenciaváltóval vezérelt villamosmotor (2) hajtja. Mind a fásztási, mind pedig a mérőfordulatszám  $n_m = 1500 \text{ 1/min}$ , amely érték  $f_m = 25 Hz$ -es frekvenciának felel meg. Az ábrán megfigyelhető hidraulikus henger a műterhelést biztosítja. A terhelő erő értékét fásztás esetén  $10 kN$ -nak, mérés esetén  $2 kN$ -nak választjuk, így a mérőorsó siklócsapágyának élettartama csak elhanyagolható mértékben változik a vizsgálatok során.

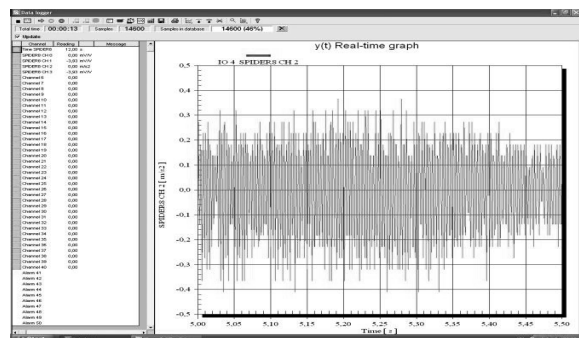
A vizsgálatba vont 6303Z típusú golyós csapágyak jellegzetes hibafrekvenciáit az alábbi táblázat foglalja össze, figyelembe véve, hogy a belső gyűrű forog.

Jellegzetes hibafrekvenciák	
Belsőgyűrű frekvencia	$\approx 110.62 Hz$
Külsőgyűrű frekvencia	$\approx 64.37 Hz$
Gördülőtest frekvencia	$\approx 44 Hz$
Gördülőtest hibafrekvencia	$\approx 88 Hz$
Kosárfrekvencia	$\approx 9.12 Hz$

1. táblázat Jellegzetes hibafrekvenciák

## 6. ADATRÖGZÍTÉS

Ezt a HBM által forgalmazott CATMAN 4.0 mérő-szoftver segítségével végeztük. A spektrumanalízis (FFT) miatt egyszerre  $2^N$  ( $N \in \mathbb{Z}^+$ ) számú mintát rögzítettünk (5. ábra).

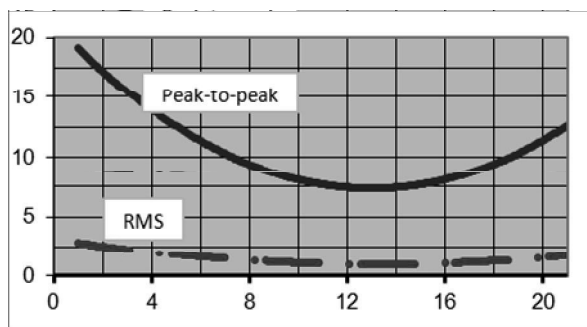


5. ábra. Rezgéskép az időtartományon

Egy-egy mérés során 8-10 db rezgésképet rögzítünk .xls formátumban, melyeket aztán – DC jel szűrést követően – text fájlként mentettünk el adatkiértékeléshez.

## 7. ADATKIÉRTÉKELÉS

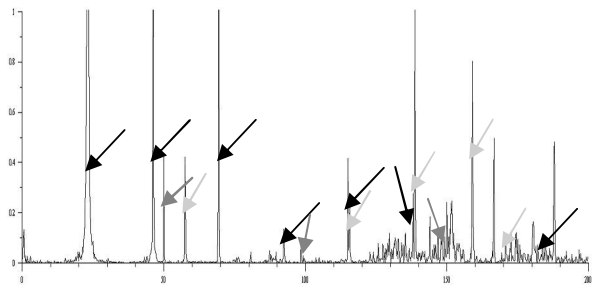
A rögzített adatok kiértékelését mind frekvencia- – spektrum analízis –, mind pedig időtartományon – statisztikai indexek segítségével – is elvégeztük. A kiértékeléshez használt programokat szimbolikus nyelven, Maple12 környezetben írtuk meg, amely .txt fájlokat olvas be, és dolgoz fel. Ennek során kiszámolja az egy mérési sorozaton belül felvett összes minta esetében az (1) értékeket, majd képezi az egyes statisztikai jellemző egy mérési sorozaton belüli mintákra vonatkozó átlagát. Az alábbi diagramrészlet jellegzetes (RMS szaggatott vonal, Peak-to-peak folytonos vonal) statisztikai jellemzők egy-egy – összesen 21 darab – mérési sorozatra vonatkozó átlagértékeit jeleníti meg. A vízszintes tengelyen a minta sorszámát tüntettük fel.



6. ábra. Statisztikai élettartam indexek trendje

Az így felvett élettartam görbék a későbbiekben jól használhatók hasonló típusú, használt csapágyak élettartamának, illetve remanens élettartamának interpolációval történő becslésére. A fenti ábrán a csapágy bejáródási ciklusa figyelhető meg.

Ugyancsak Maple12 környezetben megírt programot alkalmaztunk a csapágyhibák és ezen keresztül a csapágyállapot felderítésére és becslésére. Az 5. ábra rezgésdiagramját felhasználva FFT analízis segítségével állítottuk elő egy-egy regisztrátum spektrumát, és követtük nyomon a spektrumvonalak fejlődését, a jellegzetes csapágyhibák kialakulásával összefüggő újabb csúcsok megjelenését (7. ábra). Az ábrán feltüntetett fekete nyilak a forgási frekvenciát (amely a slip miatt csak  $f_f = 23\text{Hz}$ ), illetve annak felharmonikusait jelölik, a piros nyilak a hálózati frekvenciát, valamint annak egész számú többszöröseit mutatják. Elsősorban a jellegzetes hibafrekvenciákat próbáltuk beazonosítani, és ezek fejlődését detektálni. Ennek megfelelően jellegzetes hibafrekvenciákat jelölnek a kék nyilak, sorrendben az alábbiakat:  $BPFO = 57\text{Hz}$ ,  $2 \times BPFO = 114\text{Hz}$ ,  $2 \times BPFO + f_f = 137\text{Hz}$ ,  $2 \times RDF = 158\text{Hz}$ ,  $3 \times BPFO = 171\text{Hz}$ .



7. ábra. Egy jellegzetes gördülőcsapágy spektrum.

## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

A rezgésdiagnosztika diagnosztika műszerezettségében minden tekintetben létezik a Szerszámgépek Tanszékén. Ugyanakkor ipari körülmények között is könnyen kivitelezhető, élesben elvégezhető a remanens élettartamra vonatkozó vizsgálatok. A vizsgált adathalmaz a bemutatott statisztikai indexek segítségével könnyen számszerűsíthető és időbeli trendje is nyomon követhető. Megfelelően tükrözi a csapágy állapotát, ipari alkalmazása egyszerű.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg

This research was carried out as part of the TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project with support by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

## IRODALOM

- [1] KÉGL, T., SZABÓ, J.: Műszaki diagnosztika. Bánki Donát Műszaki Főiskola, Jegyzet 1993.
- [2] LIPOVSZKY, Gy., SÓLYOMVÁRI, K., VARGA, G.: Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [3] TANDON, N., CHOUDHURY, A.: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. Tribology International 32 (1999) 469-480.
- [4] KARACAY, T., AKTURK, N.: Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and experimental methods. Tribology International 42 (2009) 836-843.
- [5] BRÜEL & KJAER: Gépállapot-felügyelet. SPECTRIS Components Kft., B&K Division, Budapest, 1988.

# A MEGMUNKÁLÁSI PONTOSSÁG HATÁSA A KAPCSOLÓSZÖGRE GOLYÓSORSÓKNÁL

## EFFECT OF THE MACHINING ACCURACY ON THE CONTACT ANGLE OF BALLSCREWS

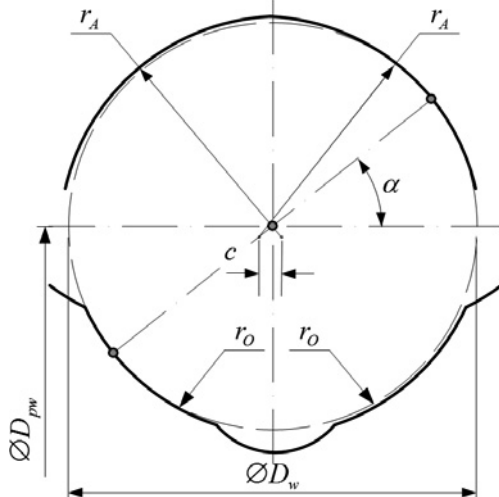
Hegedűs György\*, Takács György\*\*, Patkó Gyula\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the determination of contact angle and the effects of the manufacturing accuracy on ball screws. The contact angle is determined by a mathematical model, minimum and maximum values are computed according to the tolerances of components on different ball screw sizes. The computed results are displayed in Tables.

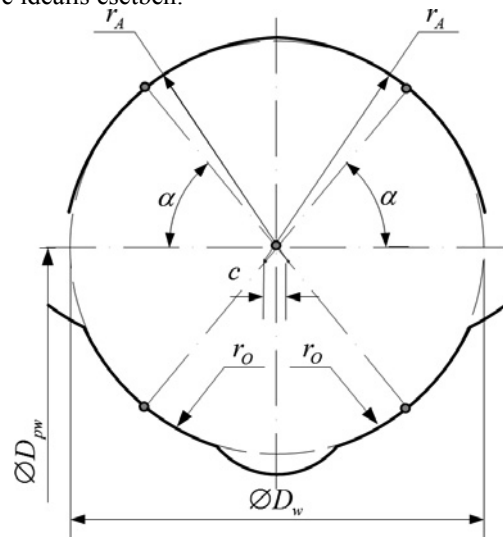
### 1. BEVEZETÉS

Kinematikai kapcsolódó felületpárokknál a származtatott szerszámprofil teljes tartományon vett pontosságának rendkívül nagy jelentősége van, mellyel számos tanulmány foglalkozott [1], [2], [3], [4], [5]. A golyósorsóknál a golyó-orsó és a golyó-anya a megfelelő kapcsolódó elemek. A kapcsolódás során fontos jelentősége van az  $\alpha$  kapcsolószögnek melynek értelmezését a 2. ábra mutatja előfeszített golyósorsónál.



1. ábra. A kontaktpontok értelmezése

Tételezzük fel, hogy a három alkatrész a kapcsolódás során teljesen merev testként viselkedik, a rájuk ható erők okozta deformációktól, valamint a súrlódástól eltekintünk. Ezekkel a feltételezésekkel – ideális esetben – az ábrán látható, hogy a golyó csak a kontaktpontokban érintkezik az anya és az orsó menetfelületével, a többi felületelem a kapcsolódásban nem vesz részt. Hagyományos furatköszörűgépeken történő megmunkáláskor – ahol az  $R_{pr}$  és  $c$  paramétereket kell meghatározni a szerszámprofil körívhez – a pontosabb megmunkálási végeredmény érdekében célszerű a kontaktpontokhoz meghatározni az érintőkörívet, ami majd megegyezik a szerszámprofillal, számjegyevezésselű gépeken az ismertett előnyök miatt erre nincs szükség. Precíziós orsóknál az előfeszítésnek, ezáltal a holtjáték megszüntetésének, a hézagtalanításnak nagy jelentősége van. Az előfeszítés hatására kialakuló kontaktpontok a 2. ábra szerint értelmezhetőek, ami az előfeszítési módtól függően két ponton (pl. két golyósanya között alkalmazott előfeszítő szerkezet, menet eltolás), illetve négy ponton (pl. nagyobb méretű golyó választása 2. ábra) történő érintkezést tesz lehetővé ideális esetben.



2. ábra. Golyósorsó előfeszítése túlméretes golyóval

\* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

Az előfeszítés nélküli orsóknál az üzem közben fellépő vonóerő hatására hasonlóan létrejönnek a fent vázolt kontaktpontok ideális esetben.

## 2. A KAPCSOLÓSZÖG MEGHATÁROZÁSA

Az  $\alpha$  kapcsolószög meghatározásához a 2. ábra jelöléseit felhasználva megállapítható, ha a golyó egyidejűleg érinti az orsó – anya profiljait (előfeszített állapot, vagy üzemi állapot), akkor az  $\mathbf{O}_O$ ,  $\mathbf{O}_G$ ,  $\mathbf{O}_A$  középpontok, és a  $\mathbf{P}_{IO}$ ,  $\mathbf{P}_{IA}$  érintőpontok (kontaktpontok) kollineárisak. Az egyes érintési pontok és a profilsugarak középpontjainak helyvektorait a golyó normálmetszetében vizsgálva meghatározható a kapcsolószög értéke. A golyót helyettesítő kör egyenlete a golyó normálmetszetében az

$$|\mathbf{P}_{IA} - \mathbf{O}_G|^2 = \left(\frac{D_w}{2}\right)^2$$

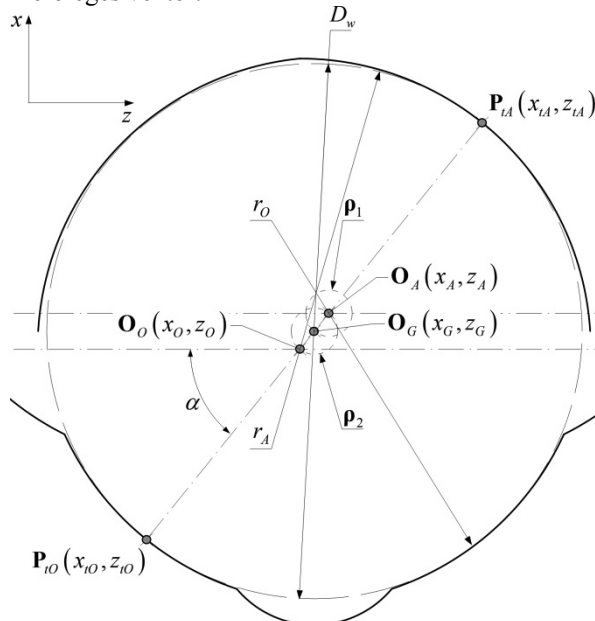
módon írható fel. Legyen

$$\boldsymbol{\rho}_1 = \mathbf{O}_A - \mathbf{O}_G = (x_{\rho 1}, z_{\rho 1})$$

az anya profilközéppontja és a golyó középpontja helyvektorainak különbsége, valamint

$$\boldsymbol{\rho}_1^\perp = (z_{\rho 1}, -x_{\rho 1})$$

merőleges vektor.



3. ábra. A kontaktpontok helyzete a golyó normálmetszetében

Ekkor

$$|\boldsymbol{\rho}_1|^2 = |\boldsymbol{\rho}_1^\perp|^2 = |\mathbf{O}_A - \mathbf{O}_G|^2 \text{ és } \boldsymbol{\rho}_1 \cdot \boldsymbol{\rho}_1^\perp = 0.$$

Az érintőpont a

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{IA} &= \mathbf{O}_G + s \cdot \boldsymbol{\rho}_1 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_1^\perp = \\ &= \mathbf{O}_A + (s-1) \cdot \boldsymbol{\rho}_1 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_1^\perp \end{aligned} \quad (1)$$

alakban határozható meg. Behelyettesítve a

$$\mathbf{P}_{IA} = \mathbf{O}_G + s \cdot \boldsymbol{\rho}_1 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_1^\perp$$

kifejezést a golyót helyettesítő kör

$$|\mathbf{P}_{IA} - \mathbf{O}_G|^2 = \left(\frac{D_w}{2}\right)^2$$

egyenletébe és felhasználva a fenti összefüggéseket az

$$(s^2 + t^2) \cdot |\boldsymbol{\rho}_1|^2 = \left(\frac{D_w}{2}\right)^2 \quad (2)$$

egyenletet kapjuk. Hasonlóan az anyaprofilra a

$$\mathbf{P}_{IA} = \mathbf{O}_A + (s-1) \cdot \boldsymbol{\rho}_1 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_1^\perp$$

kifejezést behelyettesítve a körív

$$|\mathbf{P}_{IA} - \mathbf{O}_A|^2 = r_A^2$$

egyenletébe és a fenti összefüggéseket felhasználva az

$$\left((s-1)^2 + t^2\right) \cdot |\boldsymbol{\rho}_1|^2 = r_A^2 \quad (3)$$

egyenletre jutunk. A (2) és (3) egyenleteket egymásból kivonva és  $s$ -et kifejezve az

$$s = \frac{1}{2} \left( \frac{\left(\frac{D_w}{2}\right)^2 - r_A^2}{|\boldsymbol{\rho}_1|^2} + 1 \right) \quad (4)$$

kifejezést kapjuk. A (4) kifejezést behelyettesítve a (2) egyenletbe és  $t^2$ -re megoldva a

$$\begin{aligned} t^2 &= \frac{\left(\frac{D_w}{2}\right)^2}{|\boldsymbol{\rho}_1|^2} - s^2, \\ t^2 &= \frac{-\left(|\boldsymbol{\rho}_1|^2 - \left(\frac{D_w}{2} + r_A\right)^2\right) \cdot \left(|\boldsymbol{\rho}_1|^2 - \left(\frac{D_w}{2} - r_A\right)^2\right)}{4 \cdot |\boldsymbol{\rho}_1|^2} \end{aligned} \quad (5)$$

egyenletet kapjuk. Az (5) egyenletből látható, hogy csak akkor van létező megoldás, ha az egyenlet jobb oldala nem negatív, vagyis a nevezőre a

$$\left(|\boldsymbol{\rho}_1|^2 - \left(\frac{D_w}{2} + r_A\right)^2\right) \cdot \left(|\boldsymbol{\rho}_1|^2 - \left(\frac{D_w}{2} - r_A\right)^2\right) \leq 0 \quad (6)$$

feltételnek kell teljesülnie, mely az

$$\left|\frac{D_w}{2} - r_A\right| \leq |\boldsymbol{\rho}_1| \leq \left|\frac{D_w}{2} + r_A\right|$$

alakra tovább egyszerűsíthető. Belátható, hogy a 3. ábrának megfelelően az

$$|\boldsymbol{\rho}_1| = \left| \frac{D_w}{2} - r_A \right|$$

feltételnek kell teljesülnie és ebben az esetben az érintési pont meghatározása a

$$\mathbf{P}_{tA} = \mathbf{O}_G + \frac{\frac{D_w}{2}}{\frac{D_w}{2} - r_A} \cdot \boldsymbol{\rho}_1 \quad (7)$$

képlettel lehetséges. Hasonló módon felírhatók a fenti összefüggések az orsóprofil és a golyó érintési pontjára. Legyen

$$\boldsymbol{\rho}_2 = \mathbf{O}_O - \mathbf{O}_G = (x_{\rho_2}, z_{\rho_2})$$

az orsó profilközéppontja és a golyó középpontja helyvektorainak különbsége, valamint

$$\boldsymbol{\rho}_2^\perp = (z_{\rho_2}, -x_{\rho_2})$$

merőleges vektor. Ekkor

$$|\boldsymbol{\rho}_2|^\perp = |\boldsymbol{\rho}_2^\perp| = |\mathbf{O}_O - \mathbf{O}_G|^\perp \text{ és } \boldsymbol{\rho}_2 \cdot \boldsymbol{\rho}_2^\perp = 0.$$

Az érintőpont a

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{tO} &= \mathbf{O}_G + s \cdot \boldsymbol{\rho}_2 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_2^\perp = \\ &= \mathbf{O}_O + (s-1) \cdot \boldsymbol{\rho}_2 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_2^\perp \end{aligned} \quad (8)$$

alakban határozható meg. Behelyettesítve a

$$\mathbf{P}_{tO} = \mathbf{O}_G + s \cdot \boldsymbol{\rho}_2 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_2^\perp$$

kifejezést a golyót helyettesítő kör

$$|\mathbf{P}_{tO} - \mathbf{O}_G|^2 = \left( \frac{D_w}{2} \right)^2$$

egyenletébe és felhasználva a fenti összefüggéseket a

$$(s^2 + t^2) \cdot |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp = \left( \frac{D_w}{2} \right)^2 \quad (9)$$

egyenletet kapjuk. Hasonlóan az orsóprofilra a

$$\mathbf{P}_{tO} = \mathbf{O}_O + (s-1) \cdot \boldsymbol{\rho}_2 + t \cdot \boldsymbol{\rho}_2^\perp$$

kifejezést behelyettesítve a körív

$$|\mathbf{P}_{tO} - \mathbf{O}_O|^2 = r_o^2$$

egyenletébe és a fenti összefüggéseket felhasználva a

$$\left( (s-1)^2 + t^2 \right) \cdot |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp = r_o^2 \quad (10)$$

egyenletre jutunk. A (9) és (10) egyenleteket egymásból kivonva és  $s$ -et kifejezve az

$$s = \frac{1}{2} \left( \frac{\left( \frac{D_w}{2} \right)^2 - r_o^2}{|\boldsymbol{\rho}_2|^\perp} + 1 \right) \quad (11)$$

képletet kapjuk. A (11) képletet behelyettesítve a (9) egyenletbe és  $t^2$ -re megoldva a

$$\begin{aligned} t^2 &= \frac{\left( \frac{D_w}{2} \right)^2}{|\boldsymbol{\rho}_2|^\perp} - s^2 = \\ &= \frac{-\left( |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp - \left( \frac{D_w}{2} + r_o \right)^2 \right) \cdot \left( |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp - \left( \frac{D_w}{2} - r_o \right)^2 \right)}{4 \cdot |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp} \end{aligned} \quad (12)$$

egyenletet kapjuk. A (12) egyenletből látható, hogy csak akkor van létező megoldás, ha az egyenlet jobb oldala nem negatív, vagyis a nevezőre a

$$\left( |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp - \left( \frac{D_w}{2} + r_o \right)^2 \right) \cdot \left( |\boldsymbol{\rho}_2|^\perp - \left( \frac{D_w}{2} - r_o \right)^2 \right) \leq 0 \quad (13)$$

feltételnek kell teljesülnie, mely az

$$\left| \frac{D_w}{2} - r_o \right| \leq |\boldsymbol{\rho}_2| \leq \left| \frac{D_w}{2} + r_o \right|$$

alakra tovább egyszerűsíthető. Belátható, hogy a 3. ábrának megfelelően az

$$|\boldsymbol{\rho}_2| = \left| \frac{D_w}{2} - r_o \right|$$

feltételnek kell teljesülnie és ebben az esetben az érintési pont meghatározása a

$$\mathbf{P}_{tO} = \mathbf{O}_G + \frac{\frac{D_w}{2}}{\frac{D_w}{2} - r_o} \cdot \boldsymbol{\rho}_2 \quad (14)$$

képlettel lehetséges. Az előfeszítés során az egyensúlyi helyzet beálltakor a golyó  $\mathbf{O}_G$  középpontja a radiális játék figyelembevételével meghatározható. Egy célszerűen rögzített koordinátánál a (7) és (14) által meghatározott egyenletrendszer megoldva az ismeretlen  $\mathbf{P}_{tA}$ ,  $\mathbf{P}_{tO}$  helyvektorok kiszámíthatók. Az  $\alpha$  előfeszített állapotban érvényes kapcsolószög iránykoszinusza:

$$\cos \alpha = \frac{\mathbf{P}_{tA} - \mathbf{P}_{tO}}{|\mathbf{P}_{tA}| \cdot |\mathbf{P}_{tO}|} \quad (15)$$

### 3. A KAPCSOLÓSZÖGEK ÉRTÉKEI

Ebben a fejezetben az 1. táblázat soraiban található 32x25, 40x20, 40x30, 50x30 méretű golyósanyákra határozzuk meg a kapcsolószögek értékeit az előző fejezetben meghatározott matematikai összefüggések alapján.

	$\alpha$ [°]	$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	$R_{pr}$ [mm]	$c$ [mm]	$D_w$ [mm]
1.	44,883	32,7 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	32,71 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	2,68 <sub>0</sub> <sup>+0,01</sup>	0,25 <sub>0</sub> <sup>+0,01</sup>	5
2.	46,035	41,7 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	41,69 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	3,77 <sub>0</sub> <sup>+0,01</sup>	0,28 <sub>0</sub> <sup>+0,01</sup>	7,144
3.	44,242	39,4 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	39,47 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	3,38 <sub>0</sub> <sup>+0,01</sup>	0,255 <sub>0</sub> <sup>+0,01</sup>	6,35
4.	42,245	51,6 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	51,69 <sub>-0,1</sub> <sup>0</sup>	4,22 <sub>0</sub> <sup>+0,02</sup>	0,264 <sub>0</sub> <sup>+0,02</sup>	8

1. táblázat. Különböző golyósanyák kapcsolószögei

Az üzemi (előfeszítetlen golyósorsónál), valamint az előfeszítésnél kialakuló kapcsolószögnek azért van jelentősége, mert ha a származtatás során a meghatározandó szerszámprofil egy közelítő körívvel szeretnénk leírni, akkor célszerű a görbét úgy előállítani, hogy az approximációs körív a kapcsolópontban simuljon a legkisebb eltéréssel. A gyártáskor előírt bizonyos méretek tűréshatáron belüli eltérése a kontaktpont helyzetét és a kapcsolószög értékét szintén befolyásolja, ezért az approximációs körív tulajdonságait ezen a tartományon is érdemes vizsgálni. A (15) egyenlet alapján a kapcsolószög  $\alpha_{\min}$  és  $\alpha_{\max}$  értékét a  $P_{tA}$  és  $P_{tO}$  pontok helyzete határozza meg. Ezek figyelembevételével

$$\alpha_{\min} = \begin{cases} R_{pr} - AH \\ D_2 + FH \\ D_1 - AH \end{cases}, \quad \alpha_{\max} = \begin{cases} R_{pr} + FH \\ D_2 - AH \\ D_1 + FH \end{cases}$$

feltételek teljesülése szolgáltatja a tartomány két szélső értékét. A kapott kapcsolószögek  $\alpha_{\min}$  értékeit a 2. táblázat,  $\alpha_{\max}$  értékeit a 2. táblázat. Kapcsolószögek minimális értékei a tűrések figyelembevételével

tartalmazza.

	$\alpha_{\min}$ [°]	$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	$R_{pr}$ [mm]	$c$ [mm]	$D_w$ [mm]
1.	34,525	32,6	32,71	2,68	0,25	5
2.	36,406	41,6	41,69	3,77	0,28	7,144
3.	35,151	39,3	39,47	3,38	0,255	6,35
4.	35,739	51,5	51,69	4,22	1,264	8

2. táblázat. Kapcsolószögek minimális értékei a tűrések figyelembevételével

	$\alpha_{\max}$ [°]	$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	$R_{pr}$ [mm]	$c$ [mm]	$D_w$ [mm]
1.	60,637	32,7	32,61	2,69	0,25	5
2.	60,667	41,7	41,59	3,78	0,28	7,144
3.	57,147	39,4	39,37	3,39	0,255	6,35
4.	57,734	51,6	51,59	4,24	0,264	8

3. táblázat. Kapcsolószögek maximális értékei a tűrések figyelembevételével

ban található értékeknek elméleti jelentőségük van, mert az ilyen geometriai méretekkel szerelt golyósorsók – az eredeti golyómérettel azonos átmérőjű golyókkal szerelve – négyponton előfeszített (túlhatározott, golyókkal előfeszített orsók lennének), ahol a kapcsolószögek értékeit más módon kell meghatározni. A gyakorlatban a szerelés során az adott méretű anya-orsó párhoz a beépített golyókat méret szerint válogatják, ezért a golyókkal történő előfeszítés csak indokolt esetben lehetséges.

### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkünkben a megmunkálási pontosság hatását vizsgáltuk a kapcsolószögre golyósorsóknál. A kapcsolószög meghatározását a matematikai modell alapján végeztük. A kapcsolószögek értékeinek számításait a minimális és maximális értékek szerint végeztük el a megmunkálásra előírt tűrésmezők alapján.

### 5. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

### 6. IRODALOM

- [1] BERCSEY, T.: Globoid csiga és sík fogfelületű hengeres kerék kapcsolódási viszonyainak vizsgálata, *Egyetemi doktori értekezés, Budapest, 1971*
- [2] DUDÁS, I.: Csavarfelületek gyártásának elmélete, *Akadémiai doktori disszertáció, Miskolc, 1991*
- [3] DUDÁS L.: Kapcsolódó felületpárok gyártásgeometriai feladatainak megoldása az elérés modell alapján, *Kandidátusi értekezés, Budapest, TMB, 1991, 144p.*
- [4] DUDÁS L.: New way for the innovation of gear types, *Engineering the Future, Chapt. 6. Sciyo, Croatia, 2010, ISBN 978-953-307-210-4 pp.111-140*
- [5] LITVIN, F. L.: Gear geometry and applied theory, *Englewood Cliffs, Prentice Hall, NJ., 1994*

# SZERSZÁMPROFIL SZÁRMAZTATÁSA CAXX ALKALMAZÁSSAL

## DERIVATION OF TOOL PROFILE BY CAXX APPLICATION

Hegedűs György\*, Takács György\*\*, Patkó Gyula\*\*\*

### ABSTRACT

*Different CAX applications are widely used in mechanical industry. This paper presents two different methods for the determination of tool profile on ballnut. The basis of the methods is the so-called derivation theory. The methods are carried out by solid modeling (boolean operations) and boundary surface-surface intersections (SSI operations). The results of the two methods are illustrated by various Figures.*

### 1. BEVEZETÉS

Egy szerszámgép megmunkálási pontosságát számos tényező befolyásolja, melyek közül meghatározó a pozicionálási pontosság. Ennek biztosítására napjaink NC és CNC számjegyvezérlésű szerszámgépeiben – kedvező tulajdonságai miatt – a gördülőelemes hajtások terjedtek el. A gördülőelemes hajtások elterjedése lehetővé tette, a mellékidők csökkentésére való törekvés pedig megkövetelte a nagyobb menetemelkedésű orsók gyártását, melynek következtében hagyományos menetemelkedésű orsónál elő nem forduló újabb problémák merültek fel. Ezek közül az egyik legfontosabb a módosított szerszámprofil meghatározása.

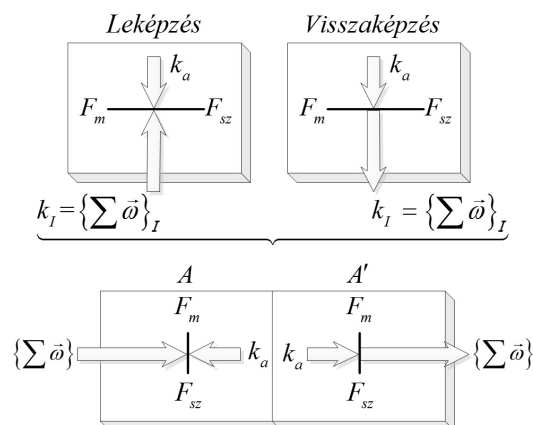
Tervezésinformatikai eszközöket régóta alkalmaznak a szerszámtervezéshez, ahol a szerszámparaméterek meghatározása történhet kereskedelmi forgalomban kapható szilárdtest- és felületmodellező szoftvekkel, vagy saját fejlesztésű programokkal, [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Jelen cikkben gótikus körívprofilú golyósanyák köszörű szerszámprofiljának meghatározására alkalmas CAX alkalmazást és az azzal előállított megoldásokat mutatjuk be, ahol a megoldásokat a származtatás-elmélet alapján keressük.

A gótikus golyósanyamenet két azonos sugarú szimmetrikusan eltolt körívből áll, melynek befejező köszörülő megmunkálását profilos köszörűkoronggal végzik. A szerszámprofil a menetprofilnak megfelelő-

en kerül kialakításra és a megmunkálás során a szerszámot a menetemelkedési szögnek megfelelően bedöntik. A golyósanya belső menetfelületének köszörülését a köszörütüske és a munkadarab belső felületének interferenciája korlátozza. Az alkalmazott megoldásnak köszönhetően a szerszámot a menetemelkedési szögtől függetlenül bedöntik, anélkül hogy a köszörütüske és a munkadarab egymásba ütközne, miközben a korongra egy optimális profilt szabályoznak és a megmunkálás eredményeként a golyósanya megkapja a gótikus profilt.

### 2. A SZÁRMAZTATÁS-ELMÉLET ISMERTETÉSE

Az itt bemutatásra kerülő mechanizmusokra érvényes elveket, szemléletet *Tajna-fői* (1. ábra) fogalmazta meg. A szerszám és munkadarab kapcsolódását elemezve a következő megállapításokat tehetjük: a szerszám pontjai a munkadarab koordináta-rendszerében egy össze-függő térrészt írnak le mozgásuk során. A munkadarab felülete a szerszám által metszett tér határfelületeként áll elő a munkadarab határfelületének korlátai alapján (*leképzés*).



1. ábra. A Tajna-fői-féle alakítási mechanizmus modellje [1]

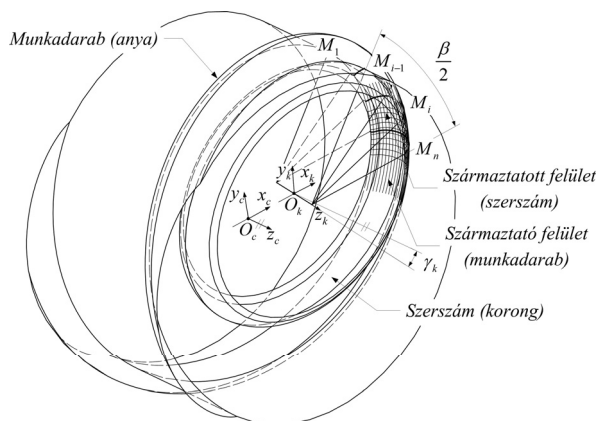
A származtató felület hasonlóan definiálható (*viszszaképzés*): a kész munkadarab felületének pontjai a szerszámhoz kötött koordináta-rendszerben viszonyított mozgásuk során összefüggő térrészt leíró pályákat futnak be. A származtató felület a munkadarab által metszett térrész határfelülete.

\* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

A modell megalkotásához ismernünk kell a kívánt geometriai pontosságú munkadarabot és a szabályozatlan szerszám kiinduló méreteit. A munkadarab és a szerszám egymáshoz viszonyított térbeli helyzete (fogásvétel, korongdöntési szög) ismert. Tegyük fel, hogy a 2. ábra koordinátarendszereinek  $x_c$  és  $x_k$  tengelyei egybeesnek, ahol  $x_c$  a munkadarabhoz,  $x_k$  a szerszámhoz rendelt koordinátarendszerek tengelyei. Az  $\overline{O_c O_k}$  szakasz hossza a szerszám átmérőjéből és a fogásvétel nagyságából meghatározható. A  $\gamma_k$  korongdöntési szöget a  $z_c$  és  $z_k$  tengelyek között értelmezzük az  $y_c-z_c$  síkban. Menetkőszőrüléskor a golyósanya teljes menetfelületének megmunkálásakor egy fogásvétel alatt ezek a paraméterek állandók.



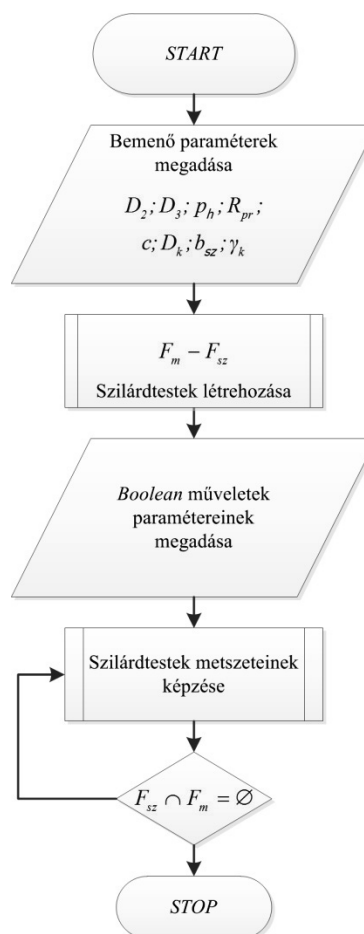
2. ábra. A szerszámprofil meghatározásához alkalmazott modell

A szerszámprofil a munkadarab elméleti méreteiből és az előzetesen meghatározott korongdöntési szög alapján származtatjuk. Ha a valóságban így állítanánk elő a szerszámprofil, akkor a szerszám folyamatos forgó mozgást végezne és a kívánt profil a szerszám egy teljes körülfordulása alatt előállna minden tengelymetszetben. A szerszám és a munkadarab a  $\beta$  szöggel jellemezhető tartományban érintkezik, ezért ha a szerszám elfordulása ezt az értéket elérte, már található legalább egy olyan síkmetszet, amely a szerszámprofil tartalmazza. Jelen esetben a szerszám nem csak a forgástengelyére szimmetrikus, hanem az  $x_k$  és  $y_k$  tengelyekkel megadott szimmetriasíkra. Ezért a származtatott szerszámprofil szintén szimmetrikus lesz, így az már  $\beta/2$  szögelfordulás után meghatározható. Forgásszimmetrikus szerszámnál valamennyi – a forgástengelyen átmenő – síkmetszet kontúrja megegyezik egymással. Mivel a származtatott felület (szerszám) forgásfelület, és annak a szimmetriatengelyén átmenő metszősík a szerszámprofil tartalmazza, ezért a szerszám helyettesíthető egy félsíkkal, a szerszámprofil származtatásához ennek a félsíknak és a származtató felületnek a síkmetszeteit kell meghatároznunk. A származtatási eljárás során a profil meghatározásához  $n$  számú metszet előállítására van szükség. A

szerszám folyamatos elfordulásának modellezésénél  $n \rightarrow \infty$  adódna, ezért a szerszámprofil közelítő megoldását oly módon keressük, hogy a félsíkot elforgatjuk diszkrét lépésekben a  $\beta/2$  tartományban, és az így kapott síkmetszetekből állítjuk elő a szerszámprofil. A metszetek előállítása felületmodellezéssel történik, azonban az eljárás elindítása előtt szükséges a  $\gamma_k$  korongdöntési szög megadása és a  $\beta$  átfogási szög meghatározása. Szilárdtest-modellezésnél ún. *boolean* műveletekkel származtatható a szerszámprofil, ilyenkor a golyósanya és a szerszám kezdeti mérettel megadott valóságű modelljeinek egymásból történő kivonásával állítható elő a szerszám burkolófelülete.

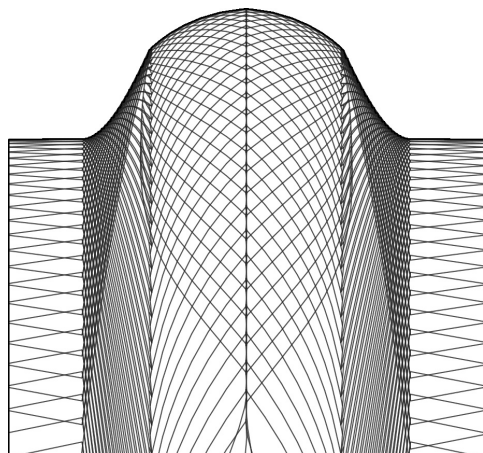
### 3. BOOLEAN MŰVELETEK ALKALMAZÁSA A FELÜLET SZÁRMAZTATÁSÁRA

Az itt bemutatásra kerülő mérnöki módszerrel előállított megoldásokat a *Dassault Systemes* cég által fejlesztett *CATIA V5R20* integrált tervezőrendszerrel valósítottuk meg. A szoftver előnye, hogy makróprogramozáson keresztül könnyen automatizálható, valamint fejlett szilárd- és felületmodellező kernellel rendelkezik.

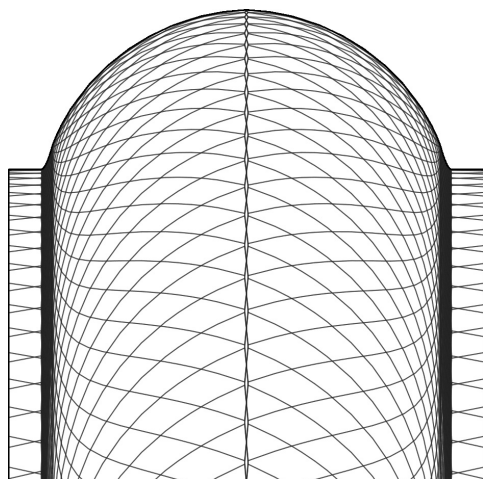


3. ábra. A szilárdtestekkel végrehajtott származtatás folyamatábrája

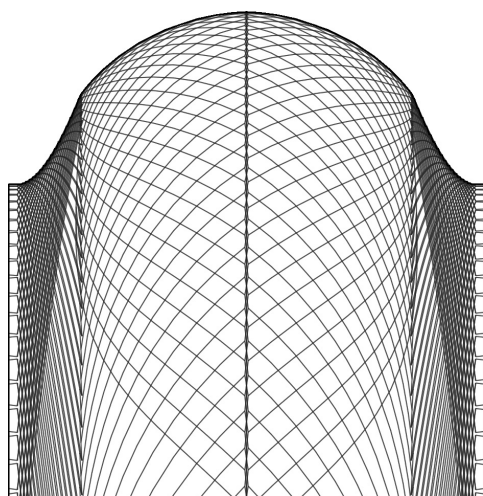
Az 3. ábra mutatja a szerszámprofil származtatásának folyamatát szilárdtest műveleteknél (a folyamatábra csak a főbb lépéseket ábrázolja), az eredményeket a 4. – 6. ábrák szemléltetik.



4. ábra. Boolean műveletek 32x25 golyósanyán



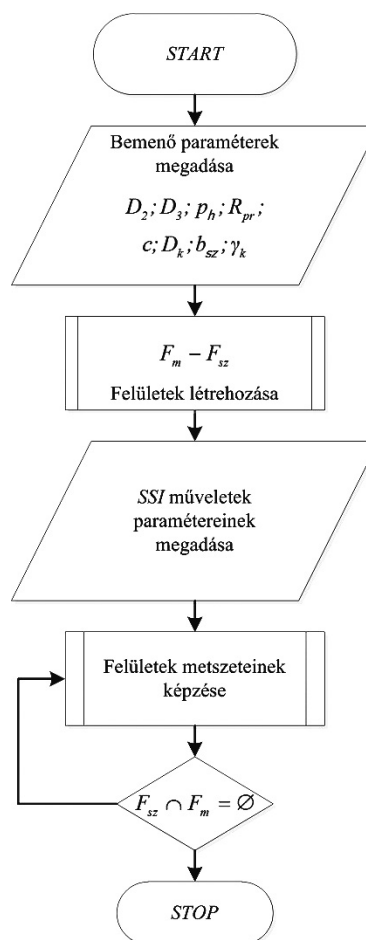
5. ábra. Boolean műveletek 40x30 golyósanyán



6. ábra. Boolean műveletek 50x30 golyósanyán

#### 4. HATÁRFELÜLETEK METSZÉSE A FELÜLET SZÁRMAZTATÁSÁRA

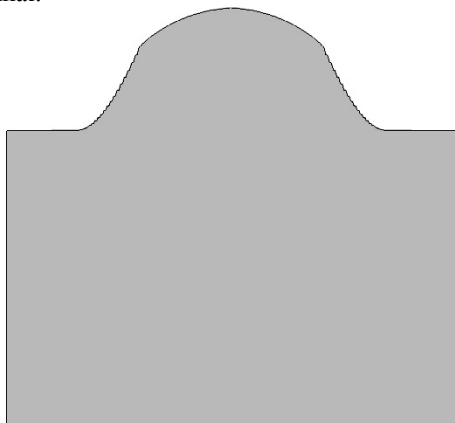
A *Caxx* szoftverek felület- és térfogatmodellező kernelei a különböző metszetek meghatározását közelítő számításokkal állítják elő egy előre definiált közelítési pontossággal. Az így meghatározott számítások a mérnöki gyakorlatban elfogadható eredményeket szolgáltatnak mindezek mellett a számítások költsége és időigénye is kedvező. A szilárdtest-modellekkel végzett származtatási eljárás kis szögelfordulásoknál azonban problémához vezet. Ennek magyarázata a modellező kernel *boolean* műveleteknél alkalmazott számítási algoritmusában keresendő, ahol a kis szögelforduláshoz tartozó szilárdtestek közötti interferencia kisebb, mint a számítási eljárásnál meghatározott közelítési pontosság. A származtatási eljárás finomítására a határfelületek metszését alkalmazhatjuk, melynek folyamatábráját a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra. A felületekkel végrehajtott származtatás folyamatábrája

Az eljárás hasonló az előző fejezetben ismertett módszerhez, azonban ennél a modellnél a golyósanya felületének és a szerszám síknak képezzük a metszete-

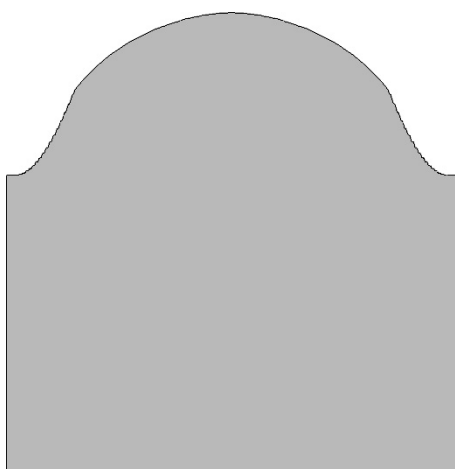
it. A modell tulajdonságainak következtében a metszettek képzése kis szögelfordulásoknál is végrehajtható, további előny a határfelületek metszésével a számítási műveletigények valamint az eljárás időigényének csökkenése. A 8. – 10. ábrák szemléltetik a határfelületek (SSI műveletek) metszésével származtatott közelítő szerszámprofilokat különböző méretű golyósanyáknál.



8. ábra. SSI műveletek 32x25 golyósanyán



9. ábra. SSI műveletek 40x30 golyósanyán



10. ábra. SSI műveletek 50x30 golyósanyán

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben a származtatás-elmélet modellezését vizsgáltuk *CAXx* alkalmazással. A modellezést különböző méretű golyósanyákra végeztük, a származtatást szilárdtest és felületmodellekkel is végrehajtottuk. A parametrikus rendszer és annak programozási előnyeit kihasználva a származtatott szerszámprofil makróprogramozással állítottuk elő.

## 6. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## 7. IRODALOM

- [1] TAJNAFŐI J.: Mechanizmusok származtatás-elméletének alapjai és hatása a kreatív gondolkodásra. (Diszkrét és végtelen megoldáshalmazok szemléletére és a funkció-összevonás elveire épülő tervezési módszerek.), *Doktori értekezés, Miskolc, 1991*
- [2] DUDÁS, I.; DUDÁS, L.: CAD/CAM system for geometrically exact manufacturing of helicoid surfaces, *ICED 90 Dubrovnik, Proceedings of ICED'90 Vol.4. 28–31. 08. 1990, 1839–1846*
- [3] DUDÁS L.: New possibilities in Computer Aided Design of Gear Mesh, *Publ. Univ. of Miskolc, Series C, Mechanical Engineering. Vol. 49. (1999) pp. 39–47*
- [4] V. IVANOV, G. NANKOV, V. KIROV: CAD orientated mathematical model for determination of profile helical surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38 (8) (1998), 1001–1015*
- [5] S. KALDOR, A. M. RAFAEL, D. MESSENGER: On the CAD of profiles for cutters and helical flutes—geometrical aspects, *Annals of the CIRP 37 (1) (1988) 53–56*
- [6] S. K. KANG, K. F. EHMANN, C. LIN: A CAD approach to helical groove machining—I. mathematical model and model solution, *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36 (1) (1996), 141–153*
- [7] S. K. KANG, K. F. EHMANN, C. LIN: A CAD approach to helical groove machining. Part 2: Numerical evaluation and sensitivity analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37 (1) (1997), 101–117*
- [8] L. V. MOHAN, M. S. SHUNMUGAM: CAD approach for simulation of generation machining and identification of contact lines, *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44 (7–8) (2004), 717–723*

# GOLYÓSANYA SZERSZÁMPROFILJÁNAK MEGHATÁROZÁSA HAGYOMÁNYOS FURATKÖSZÖRÜNÉL

## DETERMINATION OF TOOL PROFILE OF BALLNUT ON TRADITIONAL BORE GRINDING

Hegedűs György\*, Takács György\*\*, Patkó Gyula\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents a numerical and a mathematical method for the determination of tool profile of ballnut in case of traditional bore grinding. The numerical algorithm was carried out on given data points, the approximation errors were computed between the points and the approximated ellipse. The results of the methods are demonstrated in Figures.

### 1. BEVEZETÉS

Számos tényező hatással van a szerszámgépek pontosságára, mint például a megmunkálási pontosság, a megmunkálás technológiája, minőségbiztosítás, a termelés megbízhatósága, stb.

A golyósorsós mozgás-átalakító mechanizmusokat széles körben alkalmazzák korszerű NC és CNC szerszámgépekben kedvező tulajdonságaik miatt.

A megmunkálási pontosság fokozására a golyósorsók működési jellemzőinek javítása, illetve a teherviselő képesség növelése miatt van szükség; a nem megfelelő méretre köszörült orsó előbb említett tulajdonságai a megmunkálási pontatlansággal nagymértékben romlanak.

A köszörűkorong-profil egy lehetséges meghatározására numerikus alkalmazást dolgoztunk ki *MATLAB* programban, mely a rendelkezésre álló adatok alapján a jelenleg alkalmazott menetköszörűgéphez szükséges profilsugar és profileltolás értékeinek gyors, pontos meghatározására alkalmas.

### 2. KÖZELÍTŐ KÖRÍVPROFIL MEGHATÁROZÁSA ADOTT PONTOKRA

A kör másodfokú polinommal leírható implicit egyenlete

\* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

$$F(x, y) = a(x^2 + y^2) + bx + cy + d = 0 \quad (1)$$

alakban állítható elő, ahol  $a \neq 0$  és az  $a, b, c, d$  paraméterekre teljesül a  $b^2 + c^2 - 4ad > 0$  egyenlőtlenség. Az (1) egyenlet az ellipszis egyenletének egy speciális esete, abban az esetben, ha a megoldást olyan módon keressük, mint a [6], [7] tanulmányokban bemutatott eljárás, az algoritmus numerikusan instabil lesz a mátrix szingularitása miatt. A gyakorlatban a legkisebb négyzetek módszerével keresett kör illesztését adott pontokra iterációs eljárásokkal szokták meghatározni [1], [2], [3], [4], [5]. A távolságok négyzetösszege

$$d_i^2 = (|\mathbf{C} - \mathbf{P}_i| - R)^2, \quad (2)$$

ahol  $\mathbf{C}$  a kör középpontja,  $R$  a kör sugara,  $\mathbf{P}_i$  a mért pont. Legyen  $\mathbf{x} = [c_x, c_y, R]^T$ , meghatározandó egy olyan  $\tilde{\mathbf{x}}$  vektor, melyre

$$\sum_{i=1}^n d_i(\mathbf{x})^2 = \min \quad (3)$$

teljesül. A nemlineáris legkisebb négyzetek megoldását *Gauss-Newton* módszerrel keressük. Legyen az  $\tilde{\mathbf{x}}$  vektor  $\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{h}$  alakban közelítve, az  $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots, F_n(\mathbf{x})]$  függvényt  $\tilde{\mathbf{x}}$  körül *Taylor*-sorba fejtvé  $\mathbf{F}(\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{h}) \cong \mathbf{F}(\tilde{\mathbf{x}}) + \mathbf{J}(\tilde{\mathbf{x}})\mathbf{h} \approx \mathbf{0}$  adódik. A  $\mathbf{h}$  vektorra megoldva az egyenletet kapjuk, hogy

$$\mathbf{J}(\tilde{\mathbf{x}})\mathbf{h} \approx -\mathbf{F}(\tilde{\mathbf{x}}). \quad (4)$$

A parciális deriváltak *Jacobi* mátrixa

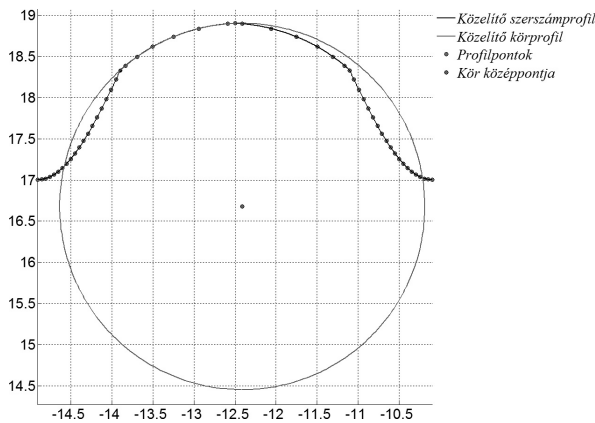
$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{\partial d_i(\mathbf{x})}{\partial u_j} = \begin{bmatrix} \frac{c_x - P_{x,1}}{\sqrt{(c_x - P_{x,1})^2 + (c_y - P_{y,1})^2}} & \frac{c_y - P_{y,1}}{\sqrt{(c_x - P_{x,1})^2 + (c_y - P_{y,1})^2}} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{c_x - P_{x,n}}{\sqrt{(c_x - P_{x,n})^2 + (c_y - P_{y,n})^2}} & \frac{c_y - P_{y,n}}{\sqrt{(c_x - P_{x,n})^2 + (c_y - P_{y,n})^2}} & -1 \end{bmatrix}$$

alakban írható fel. A Gauss-Newton iterációs eljárás két lépése:

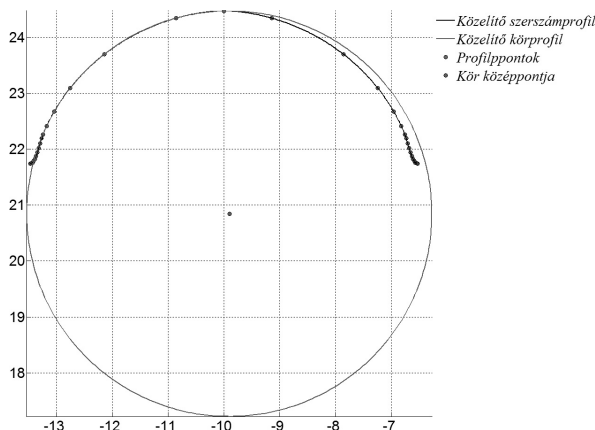
1. oldjuk meg a (4) egyenletet a  $\mathbf{h}$  vektorra,
2. számítsuk ki a következő iterációs lépést  $\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{h}$  vektorral.

A fenti iterációs eljárás indításához szükséges a kezdeti értékek meghatározása. Előzetesen végzett számítások alapján tetszőlegesen választott értékekre az eljárás numerikusan instabillá válik, ezért a kezdeti értékeket célszerű a közelítő eredmény közelében meghatározni. A kezdeti értékek meghatározását a [6] irodalomban ismertetett módon állítjuk elő oly módon, hogy az adott pontthalmazt közelítő ellipszis  $C_e$  középpontjának helyvektora, valamint  $b$  fél kistengelye szolgáltatja a kezdeti közelítő kör  $C$  középpontját és  $R$  sugarát.

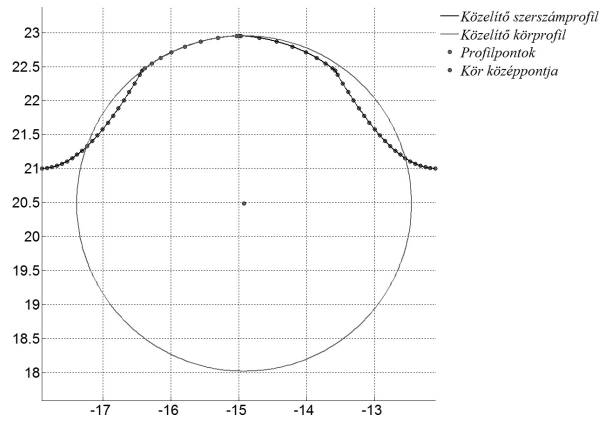
A közelítő körök paramétereit egy itt nem részletezett eljárással előállított pontthalmazra határozzuk meg [8], a számítások grafikus eredményei az 1. – 4. ábrákon láthatók. Az 1. táblázat tartalmazza a különböző számú metszetekre meghatározott közelítő körök jellemző geometriai paramétereit.



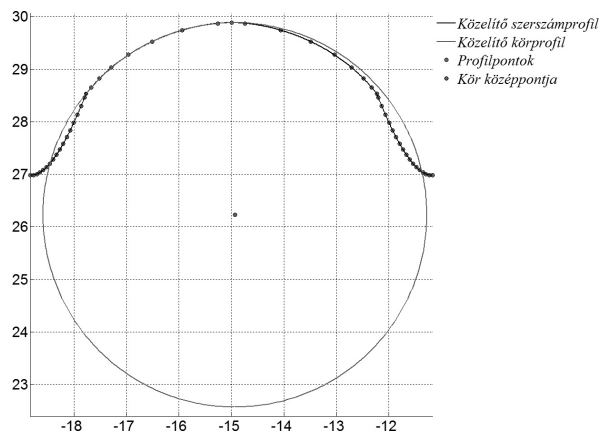
1. ábra. A közelítő körívprofil 32x25 méretű golyósanyánál



2. ábra. A közelítő körívprofil 40x20 méretű golyósanyánál



3. ábra. A közelítő körívprofil 40x30 méretű golyósanyánál



4. ábra. A közelítő körívprofil 50x30 méretű golyósanyánál

1. táblázat. Közelítő körök jellemző paramétereit

		$n=25$	$n=50$	$n=100$
1.	$R$ [mm]	2,225378	2,230396	2,232199
	$C$ [mm]	$16,678616\mathbf{e}_x$ $-12,734999\mathbf{e}_z$	$16,6782793\mathbf{e}_x$ $-12,410216\mathbf{e}_z$	$16,670854\mathbf{e}_x$ $-12,409741\mathbf{e}_z$
2.	$R$ [mm]	3,622949	3,624819	3,622514
	$C$ [mm]	$20,848696\mathbf{e}_x$ $-9,904252\mathbf{e}_z$	$20,845961\mathbf{e}_x$ $-9,903181\mathbf{e}_z$	$20,847153\mathbf{e}_x$ $-9,905109\mathbf{e}_z$
3.	$R$ [mm]	2,463443	2,466900	2,463944
	$C$ [mm]	$20,489238\mathbf{e}_x$ $-14,919731\mathbf{e}_z$	$20,484653\mathbf{e}_x$ $-14,920457\mathbf{e}_z$	$20,487023\mathbf{e}_x$ $-14,922256\mathbf{e}_z$
4.	$R$ [mm]	3,656421	3,665521	3,655314
	$C$ [mm]	$26,229110\mathbf{e}_x$ $-14,933486\mathbf{e}_z$	$26,219200\mathbf{e}_x$ $-14,930268\mathbf{e}_z$	$26,227243\mathbf{e}_x$ $-14,936777\mathbf{e}_z$

A fenti táblázatban az  $n$  a [8] irodalomban ismertetett eljárás során képzett felület-felület metszések számát jelöli. A táblázat soraiban található értékek a 32x25, 40x20, 40x30 és 50x30 méretű golyósanyákra vonatkoznak.

### 3. KÖZELÍTŐ KÖRÍVPROFIL MEGHATÁROZÁSA HÁROM PONTRA

Legyen adott három pont  $\mathbf{P}_1=(P_{1x}, P_{1z})$ ,  $\mathbf{P}_2=(P_{2x}, P_{2z})$ ,  $\mathbf{P}_3=(P_{3x}, P_{3z})$  vektorokkal. A pontok koordinátáit úgy határozzuk meg, hogy a kapcsolószög által kijelölt pontokat keressük a golyósanya normálmetszetében a névleges profil méretek és a tőrésmező tartományának két szélsőértéke szerint. Az így kapott pontokat a szerszám  $xz$  síkjába transzformáljuk és ebben a síkban keressük a három pontra illesztett körprofil geometriai jellemzőit.

A kör középpontjának koordinátáit és sugarát a

$$C = \frac{S(S_x, S_z)}{a}, R = \sqrt{\frac{b}{a} + \frac{|S|^2}{a^2}} \quad (5)$$

képletekkel számíthatjuk ki, ahol  $S(S_x, S_z)$  a három pont által meghatározott háromszög súlypontjának koordinátái.

$$S_x = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} |\mathbf{P}_1|^2 & P_{1,z} & 1 \\ |\mathbf{P}_2|^2 & P_{2,z} & 1 \\ |\mathbf{P}_3|^2 & P_{3,z} & 1 \end{bmatrix},$$

$$S_z = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} P_{1,x} & |\mathbf{P}_1|^2 & 1 \\ P_{2,x} & |\mathbf{P}_2|^2 & 1 \\ P_{3,x} & |\mathbf{P}_3|^2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$a = \det \begin{bmatrix} P_{1,x} & P_{1,z} & 1 \\ P_{2,x} & P_{2,z} & 1 \\ P_{3,x} & P_{3,z} & 1 \end{bmatrix},$$

$$b = \det \begin{bmatrix} P_{1,x} & P_{1,z} & |\mathbf{P}_1|^2 \\ P_{2,x} & P_{2,z} & |\mathbf{P}_2|^2 \\ P_{3,x} & P_{3,z} & |\mathbf{P}_3|^2 \end{bmatrix}.$$

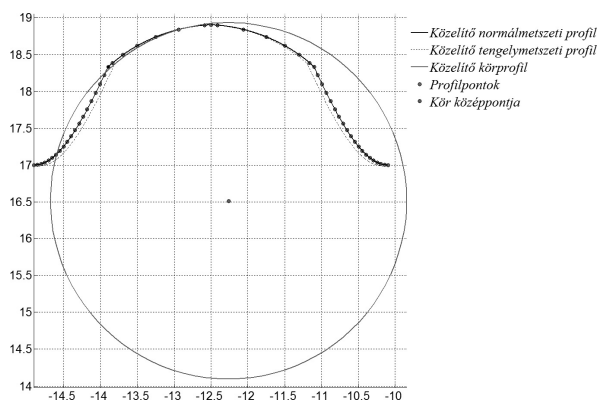
Az (5) és (6) egyenleteket megoldva a keresett kör geometriai jellemzői meghatározhatók. A három pontra illesztett körprofil meghatározását különböző méretű golyósanyákra végeztük el, a kontaktpontok számított koordinátáit a 2. táblázat tartalmazza.

Az 5 – 8. ábrák szemléltetik a kapott eredményeket. Abban az esetben, ha a gótikus körívprofil tengerly-metszetben adnánk meg, a 3 pontra illesztett körívprofil viszonylag jól közelítené a munkadarab profilját.

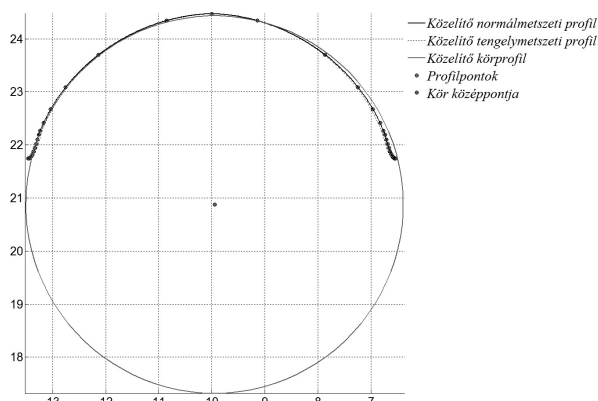
Azonban látható, hogy a két sík által bezárt szög miatt profiltorzulás lép fel.

Méret	Kontaktpontok koordinátái		
	$\mathbf{P}_1$	$\mathbf{P}_2$	$\mathbf{P}_3$
32x25	$17,771921e_x$ $-14,329506e_z$	$18,119144e_x$ $-14,073417e_z$	$18,204880e_x$ $-13,993712e_z$
40x20	$22,965005e_x$ $-12,827509e_z$	$23,100359e_x$ $-12,724322e_z$	$23,416015e_x$ $-12,438897e_z$
40x30	$21,562971e_x$ $-17,190371e_z$	$21,663847e_x$ $-17,127893e_z$	$21,950166e_x$ $-16,919174e_z$
50x30	$28,181364e_x$ $-18,032447e_z$	$28,393992e_x$ $-17,879162e_z$	$28,635909e_x$ $-17,676316e_z$

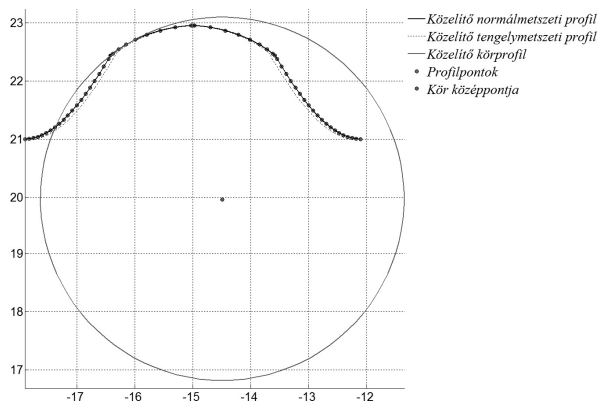
2. táblázat. A kapcsolóvonal által kijelölt pontok koordinátái



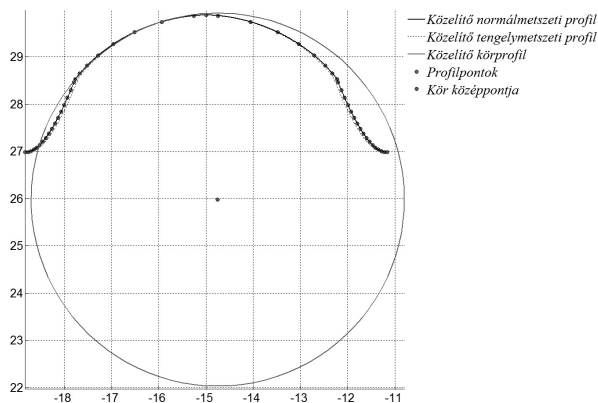
5. ábra. A három pontra illesztett körprofil 32x25 méretű golyósanyánál



6. ábra. A három pontra illesztett körprofil 40x20 méretű golyósanyánál



7. ábra. A három pontra illesztett körprofil 40x30 méretű golyósanyánál



8. ábra. A három pontra illesztett körprofil 50x30 méretű golyósanyánál

A különböző méretű golyósanyákra meghatározott három pontra illesztett körprofilok paramétereit a 3. táblázat tartalmazza, ahol  $R$  a kör sugara és  $C$  a kör középpontjának koordinátái.

3. táblázat. Három pontra illesztett körök paramétereit

Méret	A közelítő körprofil adatai	
	$R$ [mm]	$C$ [mm]
32x25	2,419269	$16,515269e_x$ $-12,262217e_z$
40x20	3,556876	$20,876878e_x$ $-9,948084e_z$
40x30	3,138757	$19,961007e_x$ $-14,491203e_z$
50x30	3,950143	$25,978951e_x$ $-14,753269e_z$

Összehasonlítva a két eljárást megállapítható, hogy az approximációval előállított körprofil a szerszámprofil teljes tartományán jól közelíti a származtatással

előállított görbét, ezzel szemben a három pontra illesztett kör csak a pontok által meghatározott tartományban. További hátránya a hárompontos módszernek, hogy az alámetszési határpont, valamint a profiltorzulás nagymértékben befolyásolja a közelítés jóságát.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben különböző méretű golyósanyák szerszámprofiljának meghatározására alkalmas módszereket mutattunk be hagyományos furatköszörűkre. Az eljárások alkalmasak lehetnek olyan megmunkálógépekre, ahol a profilozó készülék csak körívprofil szabályozását teszi lehetővé. A módszerek hatékonyságát kísérleti forgácsolásokkal célszerű a jövőben igazolni.

#### 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a TÁMOP 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

#### 6. IRODALOM

- [1] N. CHERNOV: Circular and linear regression: Fitting circles and lines by least squares, *Monographs on Statistics and Applied Probability, Volume 117*
- [2] N. CHERNOV, C. LESORT: Least squares fitting of circles, *Journal of Mathematical Imaging and Vision, 23 (2005), 239-251.*
- [3] N. CHERNOV, A. AL-SHARADQAH: Error analysis for circle fitting algorithms, *Electronic Journal of Statistics, 3 (2009), 886-911.*
- [4] W. GANDER, G. H. GOLUB, R. STREBEL: Least-squares fitting of circles and ellipses, *BIT Numerical Mathematics, 1994, Volume 34, Number 4, 558-578*
- [5] W. GANDER, G. H. GOLUB, R. STREBEL: Fitting of Circles and Ellipses Least Squares Solution, *Departement Informatik, ETH Zürich, 1994*
- [6] R. HAL, J. FLUSSER: Numerically stable direct least squares fitting of ellipses, *The Sixth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization (1998), Volume 21, Issue 5, 125-132.*
- [7] M. PILU, A. FITZGIBBON, R. FISHER: Ellipse-specific Direct least-square Fitting, *IEEE International Conference on Image Processing, Lausanne, September 1996*
- [8] HEGEDŰS GY., PATKÓ GY., TAKÁCS GY.: Determination of Tool Profile for Ballnut Grinding by Numerical Methods, *13th International Conference on Tools, 2012, pp.:221-224., (ISBN 978-963-9988-35-4)*

# GÓTIKUS KÖRÍVPROFILÚ GOLYÓSANYA SZERSZÁMPROFILJÁNAK KÖZELÍTÉSE ELLIPSZISSEL

## APPROXIMATION OF TOOL PROFILE OF GOTHIC-ARC PROFILE BALLNUT BY ELLIPSE

Hegedűs György\*, Takács György\*\*, Patkó Gyula\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the determination of tool profile on gothic-arc profile ballnut. The derivated tool profile points are approximated by the principles of the algorithm was worked in article [6]. Errors between the approximated ellipse-arcs and the profile points are determined for different ballnut sizes. All results illustrated by various Figures.

### 1. BEVEZETÉS

Alakos szerszámok szerszámprofiljának meghatározása régóta ismert feladat, melyre többféle módszert is kidolgoztak [1], [2], [3], [4]. Jelen cikkben golyósanya szerszámprofiljának meghatározását mutatjuk be olyan esetre, ahol az érintkezési szakaszon a teljes profilt egy ellipszissel közelítjük.

### 2. MATEMATIKAI HÁTTÉR

Számos gyakorlati területen a görbék illesztése adott pontokra gyakran előforduló probléma, ezek közül külön kiemelnénk az ismert pontokra illeszkedő kör és ellipszis egyenleteinek meghatározását [5], [6], [7]. A kúpszelet általános másodfokú polinommal leírható implicit egyenlete

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

ahol  $a, b, c, d, e, f$  az egyenlet együtthatói  $x$  és  $y$  a kúpszelet pontjainak koordinátái. Ellipszissnél érvényes, hogy

$$b^2 - 4ac < 0. \quad (2)$$

Vektor alakban felírva az (1) egyenletet

$$F(\mathbf{x}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{a}, \quad (3)$$

\* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\* PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

\*\*\* PhD, egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Tanszéke

ahol

$$\mathbf{x} = [x^2 \quad xy \quad y^2 \quad x \quad y \quad 1], \quad (4)$$

$$\mathbf{a} = [a \quad b \quad c \quad d \quad e \quad f]^T.$$

Az ismert  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1 \dots n$  pontokra illeszkedő ellipszis egyenlete a pontok algebrai távolságának négyzetösszege minimalizálásával az együtthatóvektor alapján

$$\min \sum_{i=1}^n (F(\mathbf{x}_i))^2 = \min \sum_{i=1}^n (F(\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{a}))^2 \quad (5)$$

módon áll elő. A (2) egyenlőtlenség miatt az előálló egyenletrendszer megoldása általános esetben nehézkes. Az  $\mathbf{a}$  együtthatóvektor skálázásával az egyenlőtlenség átírható

$$b^2 - 4ac = 1 \quad (6)$$

egyenletté, ebben az esetben az ellipszisre érvényes approximációs feladat

$$\min \|\mathbf{X} \cdot \mathbf{a}\|^2, \quad (7)$$

$$\mathbf{a}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{a} = 1$$

alakban fogalmazható meg. Az  $\mathbf{X}^{n \times 6}$  adatmátrix és a  $\mathbf{C}^{6 \times 6}$  kényszermátrix

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & & & \\ 0 & -1 & 0 & \mathbf{0}^{3 \times 3} & & \\ 2 & 0 & 0 & & & \\ & \mathbf{0}^{3 \times 3} & & \mathbf{0}^{3 \times 3} & & \end{bmatrix}$$

formában írható fel ((6)-ból kifejezve). A Lagrange multiplikátor alkalmazásával az  $\mathbf{a}$  optimális megoldásra a fenti feltételekkel

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{a} = \lambda \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{a}, \quad (9)$$

$$\mathbf{a}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{a} = 1,$$

ahol az  $\mathbf{S}^{6 \times 6}$  eloszlási mátrix

$$\mathbf{S} = \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X} = \begin{bmatrix} S_{x^4} & S_{x^3y} & S_{x^2y^2} & S_{xy^3} & S_{x^2y} & S_{xy^2} \\ S_{x^3y} & S_{x^2y^2} & S_{xy^3} & S_{x^2y} & S_{xy^2} & S_{xy} \\ S_{x^2y^2} & S_{xy^3} & S_{y^4} & S_{xy^2} & S_{xy} & S_{y^2} \\ S_{x^3} & S_{x^2y} & S_{xy^2} & S_{x^2} & S_{xy} & S_x \\ S_{x^2y} & S_{xy^2} & S_{y^3} & S_{xy} & S_{y^2} & S_y \\ S_{x^2} & S_{xy} & S_{y^2} & S_x & S_y & S_1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$S_{x^a y^b} = \sum_{i=1}^n x_i^a y_i^b.$$

A (9) sajátértékfeladatot megoldva a legjobb közelítést a legkisebb sajátértékhez tartozó sajátvektor szolgáltatja az együtthatóvektorra nézve. A fentebb bemutatott megoldás egyik hátránya, hogy a  $\mathbf{C}$  kényszermátrix szinguláris, az  $\mathbf{S}$  eloszlási mátrix közel szinguláris (abban az esetben, ha a pontok egy valódi ellipszis pontjai, szinguláris), emiatt a numerikus eljárás instabil és nem valós megoldást eredményeznek. Ennek a hátránnak a kiküszöbölésére célszerű particionálni az egyes mátrixokat [6]. Az  $\mathbf{X}$  adatmátrixot kvadrátikus és lineáris részre bontva

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2], \\ \mathbf{X}_1 &= \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{X}_2 &= \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

mátrixokat kapjuk. Hasonlóan az eloszlási mátrixra

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{S}_2^T & \mathbf{S}_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= \mathbf{X}_1^T \cdot \mathbf{X}_1, \\ \mathbf{S}_2 &= \mathbf{X}_1^T \cdot \mathbf{X}_2, \\ \mathbf{S}_3 &= \mathbf{X}_2^T \cdot \mathbf{X}_2, \end{aligned} \quad (12)$$

érvényes a particionálás után. A (8)  $\mathbf{C}$  kényszermátrixnál legyen

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

a részmátrix, valamint az együtthatóvektort

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (14)$$

módon particionáljuk. Ekkor a sajátértékprobléma az

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{S}_2^T & \mathbf{S}_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

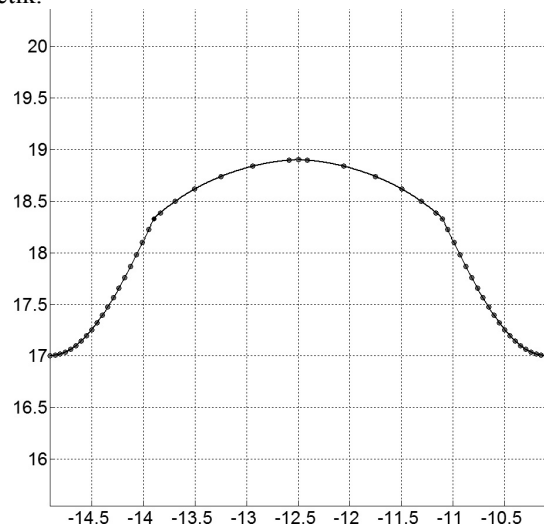
alakban állítható elő. Felhasználva a particionált mátrixokat, a sajátértékfeladat megoldását előállító egyenletrendszer

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \cdot \mathbf{a}_1 &= \lambda \cdot \mathbf{a}_1, \\ \mathbf{a}_1^T \cdot \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{a}_1 &= 1, \\ \mathbf{a}_2 &= -\mathbf{S}_3^{-1} \cdot \mathbf{S}_2^T \cdot \mathbf{a}_1 \end{aligned} \quad (16)$$

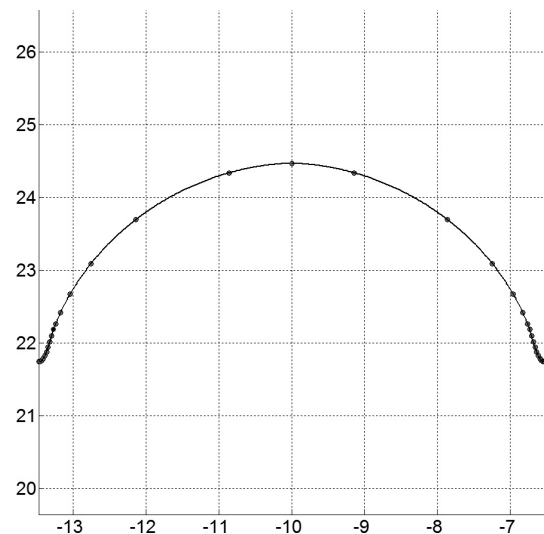
alakban írható fel, ahol  $\mathbf{M}^{3 \times 3} = \mathbf{C}_1^{-1} \cdot (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{S}_3^{-1} \cdot \mathbf{S}_2^T)$  csökkentett eloszlási mátrix. A numerikusan stabil megoldást a (16) egyenletrendszer  $\mathbf{M}$  mátrixának  $\mathbf{a}_1$  sajátvektorához tartozó  $\lambda$  sajátérték szolgáltatja. Az ellipszisívek egyenleteinek ismeretében lehetőség nyílik a metszéspontok meghatározására.

### 3. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

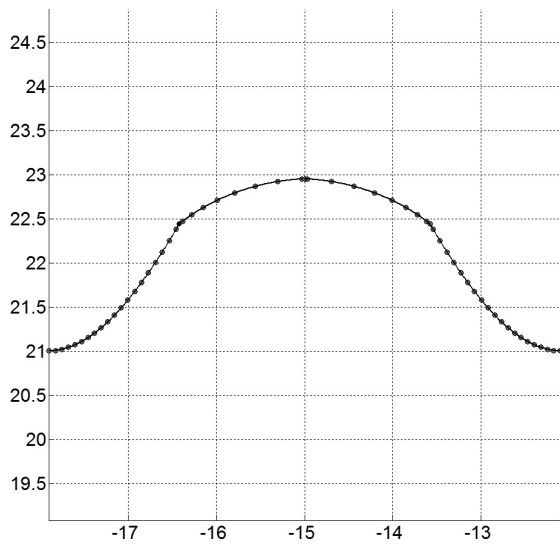
Az előző fejezetben ismertetett eljárást alkalmazva a rendelkezésre álló pontokat közelítő ellipszisíveket, és a közelítő szerszámprofilokat az 1. – 4. ábrák szemlélítik.



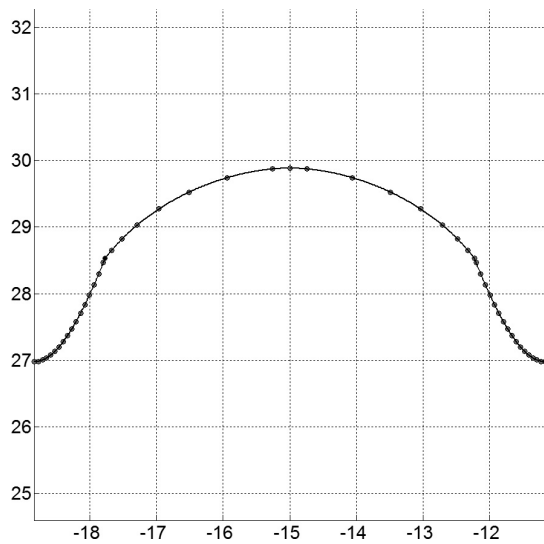
1. ábra. A közelítő ellipszisprofil 32x25 méretű golyósanyánál



2. ábra. A közelítő ellipszisprofil 40x20 méretű golyósanyánál



3. ábra. A közelítő ellipszisprofil 40x30 méretű golyósanyánál



4. ábra. A közelítő ellipszisprofil 50x30 méretű golyósanyánál

A bemutatott eredmények az alámetszési szakaszt közelítő szerszámprofil is ábrázolják, ahol a közelítő profilt szakaszosan interpoláló harmadfokú *Bezier* görbékkel állítottuk elő.

#### 4. A KÖZELÍTŐ PROFIL HIBÁJA

A közelítő profil hibáját a származtatás során előállított metszéspontokhoz határozzuk meg. Az eltérések meghatározásához keressük a metszéspontok és a közelítő ellipszisív közötti távolságokat. Ehhez célszerű az általános helyzetű ellipszisívet és a metszéspontokat az origóba transzformálni oly módon, hogy az ellipszisív kis és nagytengelye a koordinátatengelyekkel egybeessen. Az ellipszis paramétereinek ismeretében a metszéspontokra érvényes transzformáció a

$$\mathbf{P}'_E = \mathbf{R}_z^{-1} \cdot \mathbf{P}_E - \mathbf{C}_E \quad (17)$$

összefüggés szerint végezhető el, ahol  $\mathbf{P}_E$  a szomszédos ellipszisívek metszéspontja,  $\mathbf{C}_E$  a profilt közelítő ellipszisív középpontja,  $\mathbf{R}_z$  az orientációnak megfelelő forgatási mátrix. Legyen a profil pontja  $\mathbf{E}(t)=[a\cos(t) \ b\sin(t) \ 1]$ , a  $\mathbf{P}'_E$  pont és az ellipszisív  $\mathbf{E}$  pontja közötti legkisebb távolság feltétele, hogy

$$(\mathbf{P}'_E - \mathbf{E}(t)) \cdot \frac{d\mathbf{E}(t)}{dt} = \mathbf{0} \quad (18)$$

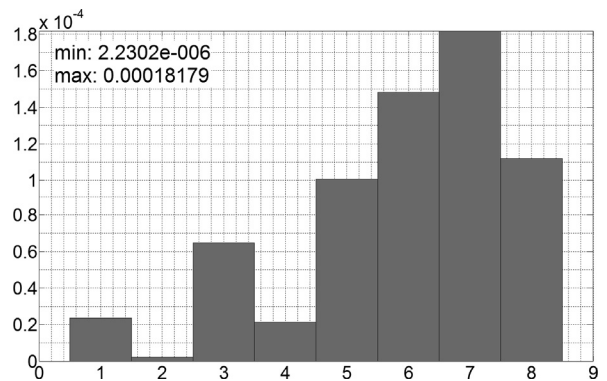
teljesül. Ekkor a nemlineáris egyenlet a *Newton-Raphson* módszerrel oldható meg az

$$\begin{aligned} (a^2 - b^2)\cos(t)\sin(t) - ax_{P'_E}\sin(t) + by_{P'_E}\cos(t) &= 0 \\ (a^2 - b^2)(\cos^2(t) - \sin^2(t)) - ax_{P'_E}\cos(t) - by_{P'_E}\sin(t) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

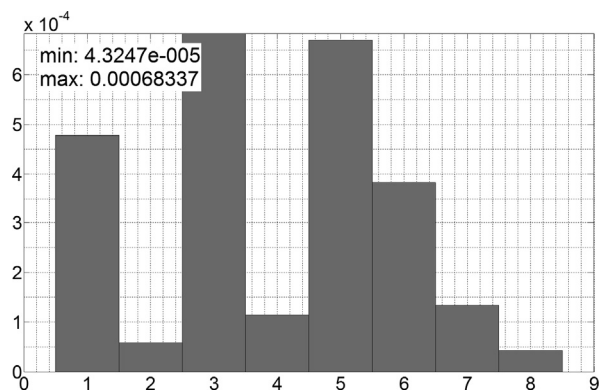
egyenletek felhasználásával. A  $t$  paraméter ismeretében a  $\mathbf{P}'_E$  pont és az ellipszisív  $\mathbf{E}$  pontja közötti távolság a

$$|d| = |\mathbf{P}'_E - \mathbf{E}| \quad (20)$$

képlet szerint számítható. A közelítő profilok eltéréseinek abszolút értékeit a megfigyelési pontokban az 5 – 8. ábrák szemléltetik.



5. ábra. A közelítő ellipszisprofil és a pontok közötti eltérés 32x25 méretű golyósanyánál



6. ábra. A közelítő ellipszisprofil és a pontok közötti eltérés 40x20 méretű golyósanyánál

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

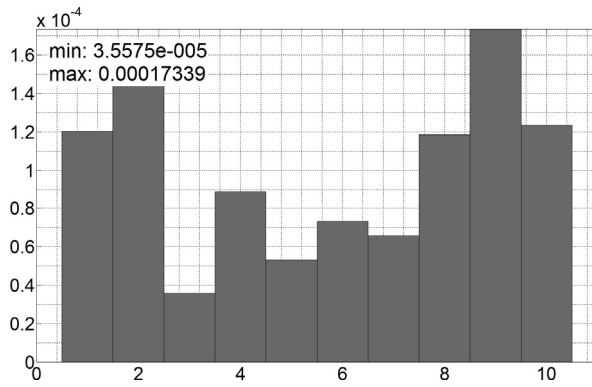
A cikkben gótikus körívprofilú golyósanyák származtatott szerszámprofiljának egy lehetséges meghatározását mutattuk be. Az eljáráshoz egy numerikusan stabil, iteráció nélküli algoritmust alkalmaztunk [6]. A szerszám és a munkadarab érintkezési tartományán a közelítő szerszámprofil ellipszisívvel írtuk le és meghatároztuk az így előállított közelítő szerszámprofil és a származtatott szerszám profilpontok közötti eltéréseket. Az eljárással a mérnöki gyakorlatban elfogadott nagyságrendű hibával határozható meg a szerszámprofil jellemző pontjai, ezek igazolását a jövőben próbaforgácsolásokkal és mérésekkel célszerű igazolni.

## 6. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

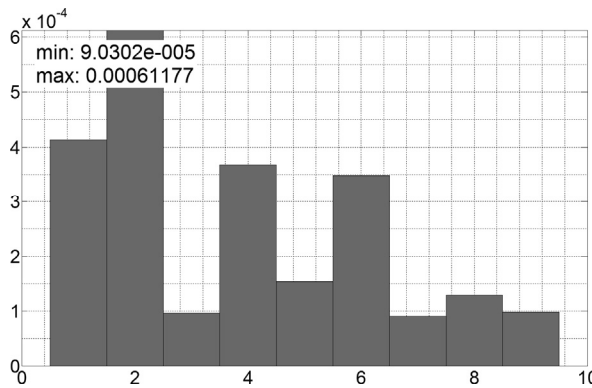
A bemutatott kutatómunka a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 7. IRODALOM

- [1] HARADA H., KAGIWADA T.: Grinding of high-lead and gothic-arc profile ball-nuts with free quill-inclination, *Precision Engineering* 28 (2004), 143–151
- [2] LITVIN, F. L.: Development of Gear Technology and Theory of Gearing, *NASA Reference Publication 1406, Chicago, 1998.*
- [3] DUDÁS I.: Csavarfelületek gyártásának elmélete, *Akadémiai doktori disszertáció, Miskolc, 1991*
- [4] DUDÁS L.: Kapcsolódó felületpárok gyártásgeometriai feladatainak megoldása az elérés modell alapján, *Kandidátusi értekezés, Budapest, TMB, 1991, 144p.*
- [5] W. Gander, G. H. Golub, R. Strelbel: Least-squares fitting of circles and ellipses, *BIT Numerical Mathematics*, 1994, Volume 34, Number 4, 558–578
- [6] R. Hal, J. Flusser: Numerically stable direct least squares fitting of ellipses, *The Sixth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization (1998)*, Volume 21, Issue 5, 125–132
- [7] M. Pílu, A. Fitzgibbon, R. Fisher: Ellipse-specific Direct least-square Fitting, *IEEE International Conference on Image Processing, Lausanne, September 1996*



7. ábra. A közelítő ellipszisprofil és a pontok közötti eltérés 40x30 méretű golyósanyánál



8. ábra. A közelítő ellipszisprofil és a pontok közötti eltérés 50x30 méretű golyósanyánál

Az 1. táblázat tartalmazza a (20) képlet alapján számított eltérések abszolút értékeit a közelítő ellipszisív és a megfigyelési pontok (szerszám származtatott profilpontjai) között.

1. táblázat. A közelítő profil eltéréseinek abszolút értékei különböző méretű golyósanyáknál

Méret	A közelítő profil eltérései	
	$d_{min}$ [mm]	$d_{max}$ [mm]
32x25	$2,230230 \cdot 10^{-6}$	$1,817885 \cdot 10^{-4}$
40x20	$4,324672 \cdot 10^{-5}$	$6,833688 \cdot 10^{-4}$
40x30	$3,557504 \cdot 10^{-5}$	$1,733867 \cdot 10^{-4}$
50x30	$9,030191 \cdot 10^{-5}$	$6,117721 \cdot 10^{-4}$

A fenti táblázat adataiból megállapítható, hogy a legnagyobb eltérés mértéke  $10^{-4}$  nagyságrendű, mely a gépészmérnöki gyakorlatban elfogadott érték. Az így előállított profil megmunkálási pontosságát próbaforgácsolással és méréssel kell igazolni a jövőben.

# TRANZIENS JELEK VIZSGÁLATA VIRTUÁLIS MŰSZEREZÉSSEL

## INVESTIGATION OF TRANSIENT SIGNALS BY VIRTUAL INSTRUMENTATION

Dr. Tóth Lajos\*

### ABSTRACT

*This paper considers creation of a new analysis library add-on to LabWindows/CVI 7.0 that improves its analysis capabilities with transient analysis using Wavelet Filtering and Joint Time-Frequency Analysis methods. Among the available library creation methods we used the form of Dynamically Linked Libraries (DLL) that reduces the size of compiled code of final executable in contrast to the statically linked libraries. We showed the mathematical background of each analysis and the way of library creation in the development environment. We also proved the applicability of these methods with test data. This add-on can be used in analysing transient phenomenon in mechanical or electrical systems.*

### 1. BEVEZETÉS

Mérési és jelfeldolgozási feladatok esetében kézenfekvő olyan szoftverek használata mely egyszerre támogatja mindkét feladatot. A rendelkezésre álló szoftverek közül a National Instruments (NI) virtuális műszerezést megvalósító szoftverei költséghatékony megoldást biztosítanak erre a célra. A *LabWindows/CVI ANSI C* integrált fejlesztői környezete vagy a *LabVIEW* grafikus programozói környezete segítségével gyorsan fejleszhetünk mérési, tesztelési, vezérlési vagy szabályozási feladatokat ellátó virtuális műszert. A gyártó a bővítmények széles skáláját ajánlja a termékeihez, természetesen nem ingyen. A *Signal Processing Toolkit* esetében ez az ár közel megegyezik – a cikk írásának időpontjában – az alap fejlesztői környezet (*Base Development System*) árával, és több mint a teljes fejlesztői környezet (*Full Development System*) árának a fele. Ha azonban valaki ismeri jelfeldolgozási módszerek matematikai alapjait és rendelkezik némi C nyelvű programozási ismerettel,

akkor könnyen bővítheti fejlesztői környezetét ilyen vagy más jelfeldolgozási képességekkel. Ráadásul ezek az új funkciók a *LabVIEW* környezetben megvalósított virtuális műszerekben is felhasználhatók. Mi egy régi 30- napos próbaverziójú *LabWindows/CVI 7.0* fejlesztői környezetet használtunk olyan függvénykönyvtár létrehozására, mely a *Signal Processing Toolkit*-ben is megtalálható.

A tranziens jelek definíció szerint véges energiájú jelek. Jellemzésük történhet az időtartományban, a frekvencia tartományban és az idő-frekvencia tartományban. Az időtartománybeli jellemzésre a *késleltetési idő, felfutási idő, túllövés, beállási idő* illetve *lefutási idő* használatos. Frekvencia tartománybeli jellemzés a *Fourier-* vagy *Laplace-transzformációval* történik. Az idő-frekvencia tartománybeli jellemzésre az *egyesített idő-frekvencia analízis (Joint Time-frequency Analysis)* módszerek használatosak. Ezeket a módszereket a korábban említett bővítmény tartalmazza.

### 2. ANALÍZIS MÓDSZEREK MATEMATIKAI HÁTTERE

A *Fourier-transzformáció (FT)* (1) lehetővé teszi a jelek szinuszos jelkomponensek összegére való felbontását. A transzformált létezésének feltétele a jel abszolút integrálhatósága. Továbbá a jelnek csak megszámlálhatóan véges sok helyi szélsőértéke és szakadása lehet. [1]

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

A *Wavelet-transzformáció (WT)* viszonylag új eszköz. A transzformáció segítségével a jel *Wavelet*-nek

\*adjunktus, Miskolci Egyetem Elektrotechnikai tanszék

(hullámocskáknak) nevezett bázisfüggvények összegére bonthatók fel. A waveletek  $\psi(t)$  normalizált függvények, melyeket egy „mother wavelet” (anya wavelet) függvényből eltolással és nyújtással állítunk elő. [1] A Folytonos Wavelet-transzformáció Continuous Wavelet Transform (CWT) (2) nem más, mint a jel és a wavelet konvolúciója azaz

$$CWT\{f(a, b)\} = \langle f; \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a > 0, \quad (2)$$

ahol „a” a „nyújtási” vagy skálaparaméter (dilation/scale parameter), „b” az eltolási paraméter (translation parameter). [1]

## 2.1 IDŐ-FREKVENCIA ELOSZLÁSOK

Az egyesített idő-frekvencia eloszlások (Joint Time-Frequency Distributions - TFD) lehetnek lineáris vagy kvadratikusan eloszlások [2]. Az ablakozott- vagy rövid idejű Fourier-transzformáció (Short-Time Fourier Transform - STFT) és a Wavelet-transzformáció mind lineáris TFD. A kvadratikusan eloszlások a jeleket az idő és a frekvencia függvényében vizsgálják. A spektrogram (SP), azaz az STFT abszolút értékének négyzete, a scalogram (SC), azaz a WT abszolút értékének négyzete és a Wigner-Ville eloszlás (Wigner-Ville Distribution - WVD) mind kvadratikusan eloszlások TFD.

Időben lokalizált jelek FT-ját STFT-nek hívjuk (3):

$$STFT\{f(\omega, t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t-u) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad (3)$$

ahol  $g(t)$  az ablakozó függvény (Window function). [2] A megfelelő ablakozó függvény kiválasztása döntő jelentőségű az analízis szempontjából mivel az idő-frekvencia felbontást ez határozza meg.

A SP (4) mindig pozitív, valós értékű idő-frekvencia eloszlás. Idő-frekvencia felbontása nem változik meg az analízis során [2].

$$SP\{f(\omega, t)\} = |STFT\{f(\omega, t)\}|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t-u) \cdot e^{-j\omega t} dt \right|^2 \quad (4)$$

Az STFT és a WT a jelet az időben és a frekvenciában jól lokalizált bázisfüggvényekkel korreláltatja. Ezeknek a felbontása függ a bázisfüggvény idő és frekvencia tartománybeli kiterjedésétől.

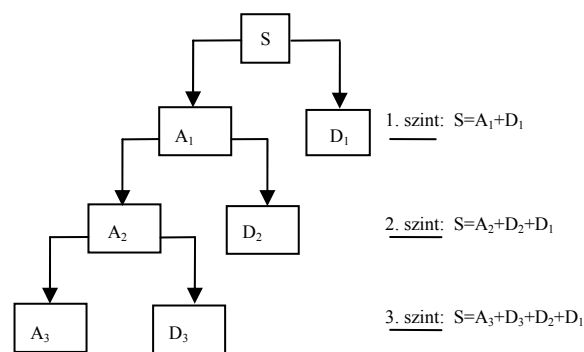
A WVD (5) a jelet önmagával korreláltatja, ezáltal jobb felbontást biztosít [2].

$$WVD\{f(u, \xi)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \cdot f^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j\xi\tau} d\tau \quad (5)$$

A WVD mindig valós mennyiség függetlenül attól, hogy a jel valós vagy komplex. Hátránya viszont, hogy az eredmény lehet negatív mennyiség is és a transzformáció nem-lineáris, azaz kovariáns az idő vagy frekvencia tartománybeli eltolásra vagy a nyújtásra. [2]

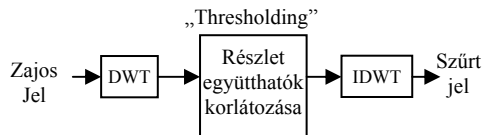
## 2.2 WAVELET THRESHOLDING

A Wavelet szűrés (Wavelet korlátozás - Wavelet Thresholding) technikája magából a WT-ből származik. A Diszkrét Wavelet Transzformáció (DWT) egy többlépcsős eljárás. [3] Egy (S) jelet átengedve megfelelően kiválasztott szűrőkön, felbontható alacsony frekvenciás közelítés (approximation) és nagy frekvenciás részlet (detail) együtthatókra ( $A_n, D_n$ ). A felbontás következő szintjén az előzőleg kapott alacsony frekvenciás komponenseket tovább bontjuk alacsony- és nagy frekvenciás jelösszetevőkre (1. ábra). A rekurzív eljárást a meg kívánt felbontási szintig lehet folytatni. A szükséges felbontási szintek számát valamilyen kritérium, leggyakrabban az ún. entrópia alapján határozzák meg. [3]



1. ábra. A jel Wavelet együtthatók szerinti felbontása

A jel Wavelet együtthatókból történő visszaállítása az előbbivel ellentétes folyamat (2. ábra). Az Inverz Diszkrét Wavelet Transzformáció (IDWT) során használt szintézis szűrőket az analízishez használt szűrőkből állítják elő. A szűrés során azokat az együtthatókat melyek egy meghatározott értéket nem érnek el korlátozzuk. Az IDWT után megkapjuk a szűrt jelet.



2. ábra. A „Wavelet Thresholding” eljárás folyamata

### 3. DINAMIKUS CSATOLÁSÚ KÖNYVTÁR (DLL) LÉTREHOZÁSA

A LabWindows/CVI lehetővé teszi a megírt függvények bináris végrehajtható állomány, statikus könyvtár vagy dinamikus csatolású könyvtár (*Dynamic Link Library – DLL*) formátumba való fordítását. [4] A fájl készülhet hibakeresési (*debug*) vagy végleges (*release*) módban. Hibakeresési módban lehetőségünk van a program lépésenkénti végrehajtására. Mi a megvalósított függvényeinket *DLL* függvénykönyvtár formátumban tároljuk. ezzel a módszerrel csökkenthetjük a futtatható állomány méretét, mivel a *DLL* nem kerül befordításba, hanem futásidőben kerül betöltésre. Másrészt mivel lefordított kódról beszélünk, az algoritmusok forráskódja részben el van rejtve a felhasználó elől. A felhasználónak definiálnia kell egy header fájlban azon függvényeket, melyek a *DLL*-ből meghívhatók. [4] Ha csak C vagy C++ forrásból szeretnénk *DLL* függvényt hívni akkor a `__cdecl` konvenciót használjuk függvényhívásra. ha más pl. Visual Basic forráskódból szeretnénk a *DLL* függvényhívást kezdeményezni, akkor a `__stdcall` függvényhívási módot kell használni. Ha CVI-on keresztül fordítjuk le a *DLL* könyvtárat, akkor a fejlesztői környezet két fájlt hoz létre. Az egyiket „*lib*” a másikat „*dll*” kiterjesztéssel. Az ún. „*import library*” a *DLL* könyvtárhoz való csatolást segíti elő. Ez tartalmazza a címtáblát (*import address table*) amelyek az egyes *DLL* függvényekre hivatkoznak. A *DLL* könyvtár projekthez rendelése történhet statikusan (implicit módon) vagy futás közben (explicit módon). Statikus hozzárendelés esetében szükségünk van az exportált függvényeket tartalmazó header fájlra, az *import* könyvtárra és a *DLL* fájlra. Futás közbeni csatolás esetében a felhasználó használhatja a *LoadLibrary*, *GetProcAddress* és *FreeLibrary* rendszerhívásokat a *DLL* függvények eléréséhez.

Az általunk megvalósított bővítmény hét analízis elvégzésére képes. Ezek a *FT*, *Cepstrális analízis*, hagyományos digitális szűrési eljárások, tranzienis jelek időtartománybeli jellemzésére szolgáló paraméterek megmérése, *STFT*, *WVD*, és a *Wavelet Thresholding*.

A header fájlunk az alábbi függvény definíciókat tartalmazza:

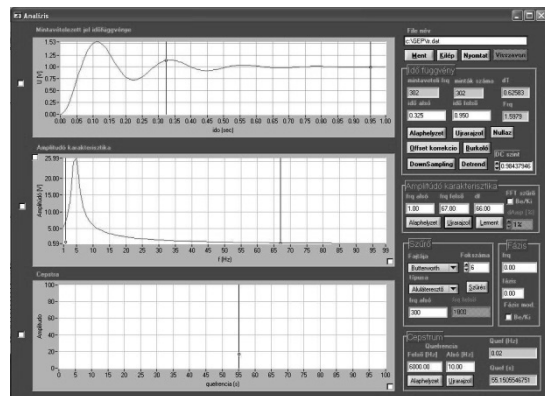
```
int __stdcall FFT(double *,int);
int __stdcall STFT(double *,int);
int __stdcall WT(double *,int);
int __stdcall WVD(double *,int);
```

Címszerinti paraméterátadást használtunk az adatok eléréséhez. A második paraméter az analizálandó adatok mennyiségét tartalmazza. Minden egyes *DLL* függvény saját grafikus felhasználói interfésszel rendelkezik, ahol a felhasználó beállíthatja az analízis paramétereit.

### 4. ANALIZÁLÓ FÜGGVÉNYEK TESZTELÉSE

A megvalósított analízáló függvények teszteléséhez elkészítettünk egy CVI programot, amely *DLL* függvényhívásokon keresztül analizálja a vizsgálandó tranzienis jeleket.

Az idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálat felhasználói interfésze látható a 3. ábrán.



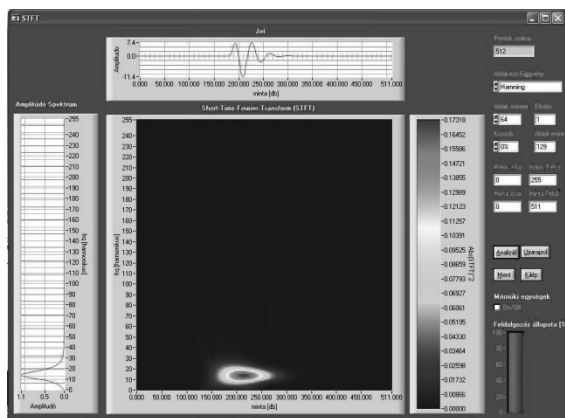
3. ábra. Idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálat felhasználói interfésze

A felhasználói interfész lehetőséget ad a tranzienis jelek időtartománybeli jellemzésére szolgáló paraméterek meghatározására. A középső diagramon a jel frekvenciatartománybeli viselkedése látható. A legelső diagramon a jel Cepstrális analízisének eredményeit vizsgálhatjuk meg.

Az idő-frekvencia tartománybeli vizsgálatok algoritmusai közül az *STFT* és a *WVD* került megvalósításra a *DLL*-ben.

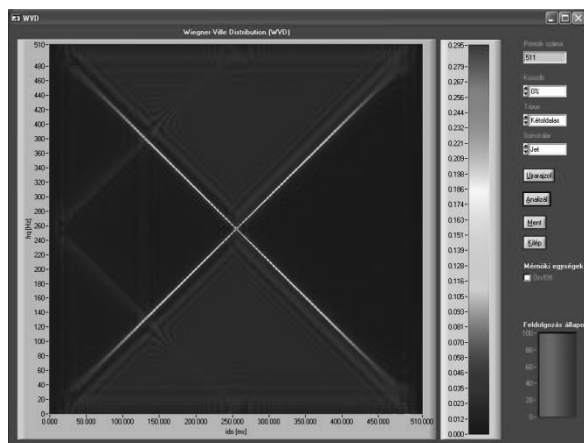
Az *STFT* felhasználói interfésze a 4. ábrán látható. A vizsgált tranzienis jel időtartománybeli viselkedése a kép felső részén, frekvencia tartománybeli alakja a kép bal

oldalán, és idő-frekvencia tartománybeli energia eloszlása a kép közepén látható. A 4. ábra tisztán mutatja, hogy a tranziens jel definíciójának megfelelően véges energiájú jel, mely jelen esetben időben és frekvenciában jól lokalizált. A felhasználó beállíthatja az ablakozó függvényt, ami lehet *Háromszög*, *Hamming*, *Hanning*, *Blackman*, *Kaiser* vagy *Blackman-Harris* típusú.



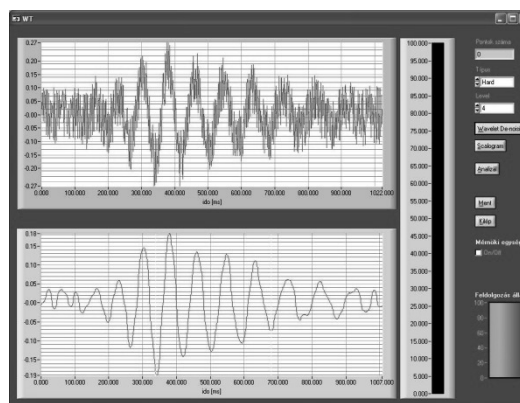
4. ábra Short Time Fourier Transformation

A WVD felhasználói interfészét az 5. ábrán mutatjuk be. Az analizált jel ebben az esetben lineáris frekvencia modulált jel 512 mintáját használtunk. A frekvenciaöket 0-tól a normalizált frekvencia feléig terjed. Az 5. ábrán a WVD eloszlással kapcsolatos érdekes jelenség figyelhető meg ami a „cross-term”-ek megjelenése. Ezek a tagok mindig előtűnnek, ha a vizsgálandó jel nem analitikus.



5. ábra Wigner-Ville eloszlás

A *Wavelet* szűrés felhasználói felülete látható a 6. ábrán. Alkalmazásával a *Wavelet Thresholding* szűrési technikát végezhetjük el a *Symmlet5* wavelet segítségével. Természetesen a későbbiekben más *Waveletek* is implementálásra kerülnek. A zajos tranziens jel az ábra felső-, a szűrt jel pedig az alsó részén látható. A felhasználó beállíthatja az a küszöb szintet és a részlet együtthatók korlátozásának módját.



6. ábra Wavelet Thresholding

## 5. ÖSSZEZEGÉS

A cikkben bemutatásra került egy olyan, a LabWindows/CVI 7.0 fejlesztői környezethez készült bővítmény fejlesztésnek módja és működése, amely a tranziens jelek vizsgálatának képességével bővíti a fejlesztői rendszer analízáló képességeit. A megvalósított funkciók lehetővé teszik a tranziens jelek idő-, frekvencia- és idő-frekvencia tartománybeli vizsgálatát többek között *Fourier-transzformáció*, *ablakozott Fourier-transzformáció* és *Wigner-Ville eloszlás* alkalmazásával. A tranziens jelek szűrésére a megvalósításra került a *Wavelet Thresholding* eljárás is. Az implementált algoritmusokat Dinamikus csatolású könyvtár (DLL) formájában készítettük el.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutatómunka a TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű project részeként az európai unió támogatásával, az európai szociális alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 6. IRODALOM

- [1] S. Mallat: A Wavelet tour of signal processing, Academic Press, 1998
- [2] J. C. O'Neill: Shift Covariant Time-Frequency Distributions of Discrete Signals, PhD thesis, University of Michigan, 1997.
- [3] J.C. Goswami, A.K.Chan: Fundamentals of Wavelets, John Wiley & Sons, Inc., 1999
- [4] National Instruments: „Using Dynamic Link Libraries with LabWindows/CVI” <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3341>

# A VILLOGÁS (FLICKER) ZAVAR TERJEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

## INVESTIGATION OF FLICKER DISTURBANCE PROPAGATION

Dr. Szarka Tivadar\*

### ABSTRACT

The disturbances propagating on the electrical grids can result in significant damages in industry, transport and particularly in mechatronics manufacture. The consumers are connected together by the large-scale electrical networks, therefore the disturbances generated by one consumer put impact on the quality of electricity supplied by the network. Several consumers can work simultaneously on electrical network, thus the disturbance spectrum has wide-range difference at various terminals and time intervals. The demand for the reduction even stop of disturbances need the mapping of consumers generating the respective disturbances. Flicker phenomenon is particularly dangerous for the eyes of people living in the vicinity of the flicker source. This paper presents the new scientific achievements in order to determine the propagation of flicker phenomenon and the consumers generating the dangerous disturbances particularly the flicker effect.

### 1. BEVEZETÉS

A villamoshálózatokon terjedő zavarok jelentős károkat és biztonság-technikai problémákat okozhatnak, különösen a számítógépekkel irányított mechatronikai gyártás területein. Ismeretes, hogy a villamos erőművek által szolgáltatott energia zavarmentesnek, tisztának tekinthető, a hálózatokon kialakuló zavarok döntő többségét a fogyasztóknál üzemeltetett (rosszul beállított vagy hibás) villamos berendezések okozzák. Az egyes fogyasztókat a nagy kiterjedésű villamos hálózatok összekapcsolják, ezért az egyik fogyasztó által okozott zavarok befolyásolják a másik fogyasztó által a villamos hálózaton vételezett energia minőségét is. Az ilyen fogyasztók működésük során eltorzítják a hálózatokon folyó áramok- és feszültségek ideális szinuszos hullámalakját.

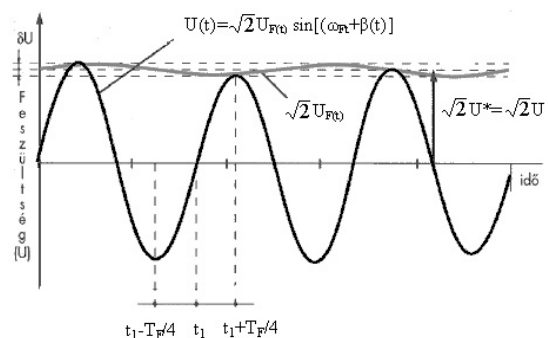
Nagyteljesítményű fogyasztók, például az ipari-elektronikával irányított villamos hajtások, vasút- és villamos vontatás vagy a nagyteljesítményű hegesztőgépek, ívkemencék üzemének lökészerű

terhelés változása feszültség lengésekkel „rángatja” a hálózatot, letöréseket és feszültség megfutasokat, feszültség tranzienseket eredményezhet. A hálózati zavarok közül különösen veszélyes a „villogás” (közismerten a flicker hatás), amely az emberek egészségét is veszélyeztető környezeti ártalmakat okozhat.

A végzett vizsgálatok során olyan elméleti- és gyakorlati megoldásokat kerestem, melyek mérés-technikai módszerekkel és hálózati ismeretekkel segíthetik a zavarforrások, a zavart okozó fogyasztók felderítését.

### 2. A VILLOGÁS KIALAKULÁSA ÉS ÉRTELMEZÉSE

A villogásra vonatkozó Európai előírások [1], melyek a magyarországi szabványokban is megjelennek, szigorúan szabályozzák a (rövid- és a hosszú idejű) villogás még megengedett erősségét. Ennek magyarázata az, hogy az 1-15 Hz közötti feszültség ingadozás, a világító testekben ingadozó fényességű, vagy színspektrumú olyan fényáram változásokat okoz, mely rendkívül káros lehet az emberekre, az emberi környezetre.



1. ábra. A feszültség ingadozás okozta frekvencia moduláció (forrás: [1])

A villogás mértékét az Európai előírások a mérések- és az emberi látásérzet-ingadozás statisztikai adatai alapján határozták meg.

\*Professor Emeritus, Miskolci Egyetem Elektrotechnikai Elektronikai Tanszéke

Az ember- és az emberi környezet nemcsak a fényingadozás erősségére, de a villogás gyakoriságára is érzékeny. Statisztikai adatok alapján legkellemetlenebb és legveszélyesebb a 8.8 Hz-es feszültség változás.

A villogás mérésére az UIE/IEC fejlesztette ki a szabványos villogásmérőt, figyelembe véve a feszültség változást és a fénycsillámlás ingadozás emberre vonatkoztatott hatását.

A mérőműszer a rövididejű (1-10 perc átlagát számító) villogás mértékét határozza meg az alábbi összefüggés szerint [2],[3]:

$$P_{st} = \sqrt{K_{0,1}P_{0,1} + K_1P_1 + K_3P_3 + K_{10}P_{10} + K_{50}P_{50}} \quad (1)$$

$P_{0,1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$  és  $P_{50}$  az a szint, amelyet a megfigyelési időszak 0.1 %-a, 1%-a, 3%-a, 10%-a illetve 50%-a halad meg.

$K_{0,1}$ ,  $K_1$ ,  $K_3$ ,  $K_{10}$  és  $K_{50}$  a 0.1 %-hoz, az 1%-hoz, a 3%-hoz, a 10%-hoz illetve 50%-hoz tartozó együtthatók.

Az így meghatározott rövididejű (short time) villogás értékeiből határozható meg a hosszúidejű (long time) villogás nagysága [2],[3]:

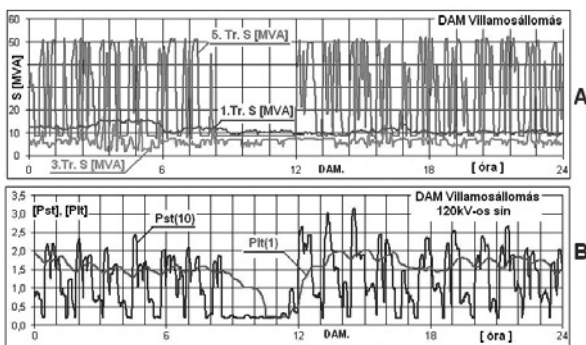
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (2)$$

amely  $P_{lt}$  az egy hét időtartam bármely szakaszának 95%-ban az 1 értéket nem haladhatja meg [1].

Az általam végzett vizsgálatok célja az volt, hogy mérés technikai módszerekkel és hálózati ismeretekkel egyértelmű összefüggéseket találjak a villamos hálózaton terjedő villogás törvényszerűségére.

### 3. MÉRÉSI MÓDSZEREK

A vizsgálataim során abból a feltételből indultam ki, hogy az UIE\*/IEC\*\* szabványos villogásmérővel meghatározott rövididejű villogás és a villogást generáló berendezés vételezett villamos energiája között mérhető összefüggésnek kell lenni.



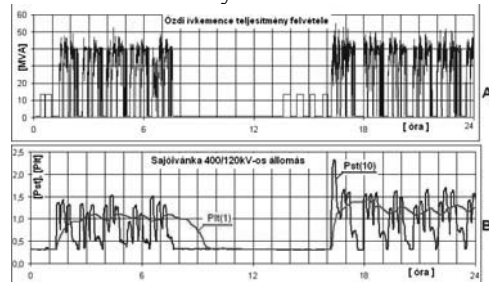
2. ábra. A diósgyőri UHP ívkemence teljesítmény felvétele ('A' ábra) és az ívkemence üzeme okozta villogás ('B' ábra)

Ennek bizonyítására megvizsgáltam a borsodi kohászati üzemekben azonos időben végzett

\* UIE (International Electrotechnical Commission)

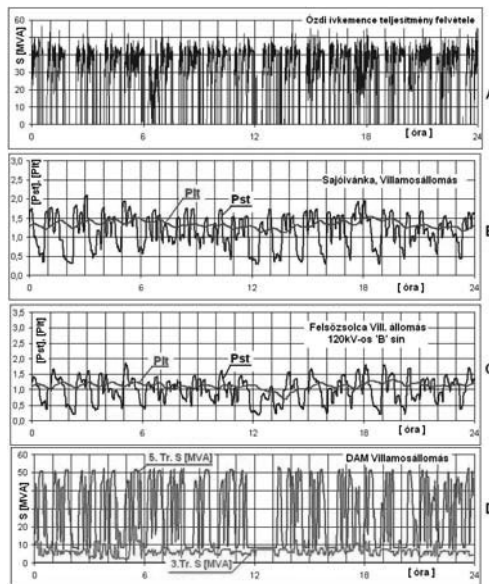
\*\* IEC (International Union for Electricity Applications)

villamos energia felvételt és a rövididejű villogás mérési eredményeit. Mérésekkel bebizonyítottam, hogy a villamos berendezés okozta villogásának és a berendezés által felvett energia között egyértelmű összefüggés van. A 2. ábrán a diósgyőri kohászati üzemben végzett mérések, a 3. ábrán az ózdi kohászati üzemben végzett mérések eredményei láthatók.



3. ábra. Az ózdi UHP ívkemence teljesítmény felvétele ('A' ábra) és az ívkemence üzeme okozta villogás ('B' ábra)

Továbbiakban azt vizsgáltam meg, hogy a két ívkemence együttes üzeme során hogyan alakul az eredő villogás erőssége. A 4. ábrán megtekinthető a diósgyőri- és az ózdi ívkemencék azonos időben történő teljesítmény felvétele és eredő villogás erőssége Sajóivánkai állomáson és a Felsőzsolcai villamos állomáson mérve.



4. ábra. Az ózdi UHP ívkemence teljesítmény felvétele ('A' ábra), a diósgyőri UHP ívkemence teljesítmény felvétele ('D' ábra) és az ívkemencék üzeme okozta villogás Sajóivánkai villamos állomáson ('B' ábra), és a felsőzsolcai villamos állomáson

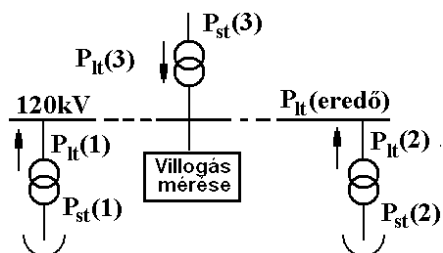
### 4. A VILLOGÁS TERJEDÉSE

A villogás összetevőinek meghatározására az általam kidolgozott és mérésekkel igazolt, (eredményhez vezető) módszer lényege az, hogy a villogást generáló fogyasztókat egymást követően „kiiktatjuk” (pontosítva,

olyan időszakokban mérünk, amikor a kijelölt fogyasztók nem üzemelnek) és mérjük a „maradék” villogás erősségét. Négy ilyen időszakot választottam.

- olyan időszakasz, amikor sem a DAM ívkemence sem az ózdi ívkemence nem üzemel
- olyan időszakasz, amikor a DAM ívkemence üzemelt, az ózdi ívkemence nem üzemel
- olyan időszakasz, amikor mind a DAM ívkemence mind az ózdi ívkemence üzemel
- olyan időszakok, amikor a DAM ívkemence nem, de az ózdi ívkemencék üzemel

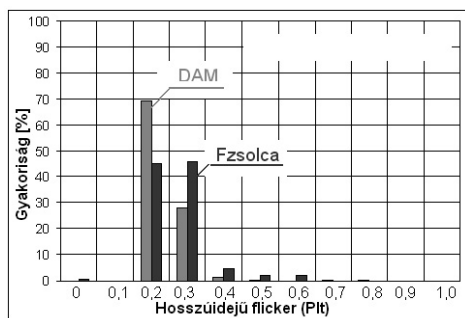
A mérés elvét az 5. ábra mutatja.



5. ábra. A villogás összetevőinek meghatározására kidolgozott mérés vázlatja

#### 4.1 A villogás szintjének alakulása olyan időszakban, amikor sem az ózdi ívkemence, sem a DAM ívkemence nem üzemel

A hosszú (18 napot kitevő) időszak alatt végzett mérések eredménye, egyrészt megbízható információkat adott a 120kV-os hálózaton „mindig” jelenlévő un. flicker-alapzaj nagyságáról ( $P_{It, alapzaj} \approx 0,2 \dots 0,25$ ), másrészt olyan néhány napon is végezhetünk méréseket (Húsvéti ünnepek alatt), amikor a hálózaton a legminimálisabb terhelés jelentkezett.



6. ábra. A hosszúidejű villogás értékeinek gyakorisága olyan időszakokban amikor a nagyteljesítményű ívkemencék nem üzemeltek

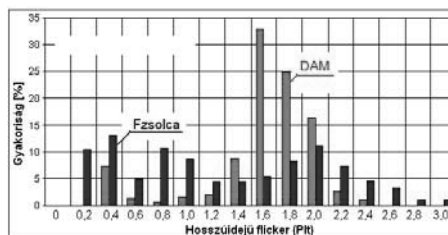
A 6 ábrán a 18 napon keresztül folyamatosan, olyan időszakokban végzett, mérések eredményei tanulmányozhatók, amikor a nagyteljesítményű ívkemencék nem üzemeltek.

A DAM 35 kV-os hálózatán illetve Felsőzsolca 120kV-os állomásán mért adatok azt mutatják, hogy ha az ívkemencék nem üzemelnek, akkor a hosszúidejű villogás gyakorlatilag elhanyagolható erősségű.

#### 4.2 A villogás szintjének alakulása olyan időszakban, amikor az ózdi ívkemence nem üzemel, de a DAM ívkemence üzemel

A mérések alatt, azért hogy a villogás terjedését minél pontosabban tudjam meghatározni, a DAM ívkemence flicker-kompenzációját kikapcsoltuk.

A DAM 35kV-os sínen mért villogás erőssége, a mérési idő mintegy 80%-ban, lényegesen túllépte a megengedett ( $P_{It} < 1$ ) határértéket. Ugyanakkor Felsőzsolca villamos állomásán az idő 80%-ban  $P_{It} \approx 1$  értékeket mérünk, ami még mindig magasabb a megengedett értéknél.

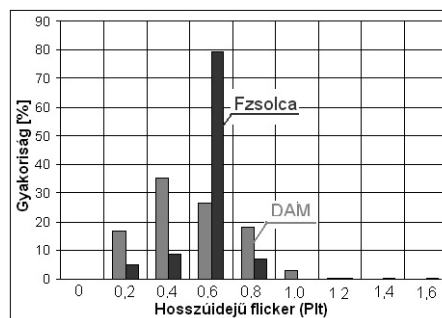


7. ábra. A hosszúidejű villogás erősségének gyakorisága a flickerszint függvényében, olyan időszakokban amikor az ózdi ívkemence nem, a DAM UHP ívkemence viszont üzemelt

A mérések eredményei a 7. ábrán tanulmányozhatók. A jobboldali oszlopokon a DAM sínen-, a baloldali oszlopokon a Felsőzsolcán mért eredmények láthatók.

#### 4.3 A villogás szintjének alakulása olyan időszakban, amikor az ózdi ívkemence üzemelt, de a DAM ívkemence nem üzemelt

Amikor a DAM 80 tonnás UHP ívkemence nem üzemelt, de az ózdi ívkemence üzemelt, akkor a DAM 120kV-os rendszeren mérhető villogás meghatározó részét az ózdi ívkemence generálta.



8. ábra. A hosszúidejű villogás erősségének gyakorisága a flickerszint függvényében, olyan időszakokban amikor a DAM UHP ívkemence nem, az ózdi ívkemence üzemelt.

A 8. ábrán látható, hogy az ózdi ívkemence okozta villogás átlagértéke:  $P_{It(átlag)} \approx 0,45$ , maximális értéke:  $P_{It(max)} \approx 1,05$ . ( $P_{It} > 1$  érték a DAM állomásán a közel 100 óra mérési idő 3,2%-ban, Felsőzsolcán 0,7%-ban fordult elő.

A mérés eredményei azt mutatják, hogy az ózdi ívkemence zavarhatása, (hosszúidejű villogás) a miskolci villamos hálózatokon is megjelenik [4],[5].

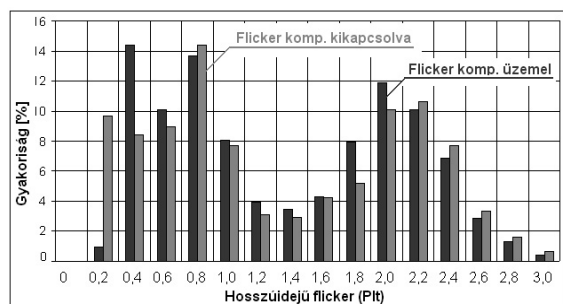
#### 4.4 A villogás szintjének alakulása olyan időszakban, amikor mind az ózdi ívkemence, mind a DAM ívkemence üzemelt

A DAM (ívkemencék és egyéb technológiai berendezések) és az ózdi ívkemencék együttes üzeménél (2006. május 4 – május 15 között) a flicker meghatározása szempontjából két lényeges vizsgálati körülményt alakítottunk ki:

1. A DAM V. sz. transzformátorán keresztül üzemeltetett ívkemence flicker kompenzációs berendezése bekapcsolt (üzemeltetett) állapotban volt.
2. Az ívkemence flicker kompenzációs berendezése kikapcsolt (üzemen kívüli) állapotban volt.

A viszonylag hosszú időszakokat felölelő, nagyszámú mérési adatokra támaszkodó vizsgálat alatt mind a DAM, mind az ózdi ívkemencéket a „folyamatos” üzem jellemezte. A „folyamatos” jelző az ívkemencék olyan üzemállapotát jellemzi, amikor az alábbi, 4 részből álló, ciklusok folyamatosan követik egymást:

- a. a szilárd vagy folyékony betét beadagolása az ívkemencébe
- b. a villamos ív alatti olvasztás és kikészítés
- c. a kész acél eltávolítása, azaz a csapolás
- d. tervezett- vagy nem tervezett javítások, egyéb szünetidők



9. ábra. A hosszúidejű flicker gyakorisága és struktúrája a DAM villamosállomás 120kV-os rendszerén, a flicker kompenzáció ki- és bekapcsolt állapotában amikor mind a DAM, mind az ózdi ívkemencék üzemeltek

A rögzített méréseknél, akkor is, amikor a DAM flicker kompenzáció üzemben volt és akkor is, amikor azt kikapcsolták, de az ózdi kemence üzemelt, (lásd a 9. ábrán a mérés eredményeit) megfigyelhető, hogy a DAM V.sz. transzformátoron keresztül működtetett DAM ívkemence üzem alatt a  $P_{st}$  hosszúidejű flicker szint csak lényegtelen mértékben változik meg, ha a flicker kompenzációs berendezéseket kikapcsolják! Vagyis a két nagyteljesítményű ívkemence üzemének együttes hatására kialakuló hosszúidejű villogás

erősségét a DAM flicker-kompenzáció csak kismértékben volt képes csökkenteni.

#### 5. A MÉRT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A mérések és az elvégzett ellenőrző számítások alapján megállapítható, hogy

- a DAM 120/35kV-os állomás 120kV-os rendszerén, ha a DAM villamos állomás V.sz. transzformátorán keresztül működtetett 80 tonnás UHP ívkemence üzemel, a szabványokban megengedett  $P_{st} < 1$  értéket tartósan és jelentősen meghaladó, ( $P_{st} \approx 1,8 \dots 2,0$ ) hosszúidejű flicker alakul ki!
- a villogás (flicker) magas értéke ( $P_{st} > 1$ ) a DAM 120kV-os állomás 120kV-os rendszerén gyakorlatilag csak a DAM UHP ívkemence üzemétől függ, értékének változása elhanyagolható más külső (flickert generáló) fogyasztók hatásától.
- Megállapítható, hogy a DAM ívkemence által generált villogás erőssége a Felsőzsolca állomáson közel felére csökkent.
- a DAM UHP ívkemence flicker kompenzáló berendezés üzemállapota, (bekapcsolt vagy kiiktatott állapota), ha az ózdi ívkemence üzemel, nincs jelentős hatással a DAM állomás 120kV-os rendszerén megjelenő flicker szint alakulására.. A flicker kompenzáció bekapcsolt állapotában a  $P_{st} > 1$  érték a teljes üzemidő 58,6%-ban, a kompenzáció kikapcsolt állapota mellett  $P_{st} > 1$  érték az idő 60,98%-ban alakult ki

#### 6. IRODALOM

- [1] MSZ-EN 61000-3-3 szabvány
- [2] J. MCKIM :The UIE Flickermeter Demystified, <http://www.ce-mag.com/archive/mayjune/McKim.html>, 1999.
- [3] MSZ EN 50160; A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos feszültség jellemzői.
- [4] VÁRADINÉ. SZARKA ANGÉLA: Leállási idő mérésére alkalmas tesztberendezés vezérlésének fejlesztése. „Innováció és Tudás” Konferencia 2005, Miskolc. pp 101-106.
- [5] SZARKA TIVADAR, KOVÁCS ERNŐ, RADÁCS LÁSZLÓ, VÁRADINÉ SZARKA ANGÉLA, GYURKÓ ISTVÁN: A DAM2004 Kft. 80 t. UHP ívkemence üzem okozta hálózati villogás (flicker) és más hálózati zavarok mérése, vizsgálata (Szakmai jelentés 2006)

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben közreadott tudományos kutatás „A felsőoktatás minőségének javítása kiválósági központok fejlesztésére alapozva a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területein” című, TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 számú projekt támogatásával készült. Ezért a Szerző köszönetét fejezi ki..

# OPTIKAI ELVEN TÖRTÉNŐ KONTÚRVONAL FELISMERÉS

## OPTICAL METHOD FOR CONTOUR LINE DETECTION

*Szalontai Levente\*, Dr. Kovács Ernő\*\**

### ABSTRACT

*A new way for detecting edges in colour digital images and the idea behind is described together with some initial results of the method. The new method is based on the optical phenomena of dispersion and colour mixing. An optical system was built together with a colour digital camera for the purpose to study the theory. The advantage of this idea is the novel approach in edge recognition.*

### 1. BEVEZETÉS

Az élfelismerési módszerek a számítógépes képfeldolgozási eljárások egy speciális területe, amelynek nagy jelentősége van a mechatronikai gyakorlatban, ahol egyre több optikai eljárást alkalmaznak a gyártásban és a minőségellenőrzésben egyaránt. A bemutatandó eljárás újdonság értéke a módszer alapelvében rejlik, mely során kihasználásra kerül az optikai prizma kínálta természetes fénybontás és színkeverés jelensége. Az eljárás előnye lehet még az újdonságán kívül, hogy a színes digitális képek esetén élfelismerésre alkalmazott eljárásokkal szemben, megfelelően kidolgozott algoritmusokkal kevesebb számítási kapacitást igényelhet, így az élfelismerés gyorsabbá válhat színes képek esetén.

A digitális elektronikus eszközeink jelenlegi nagyfokú fejlettségi szinten lehetőséget adnak arra, hogy a fizikai külvilágot jól közelítően számszerűsítve arról információt kapjunk illetve azon automaták segítségével változtatásokat végezzünk. Ezekkel a környezetükről információt gyűjtő és abba beavatkozó mesterséges (intelligenciával rendelkező) rendszerekkel a mechatronika interdiszciplináris tudományterület foglalkozik. Hasonlóan az emberhez az ilyen rendszerek sok információval láthatóak el a környezetükről, ha azokat a tárgyról érkező látható fény digitalizálására képes kamerával egészítjük ki.

A beérkező digitális jel számítógépen történő feldolgozásával, értelmezésével a számítógépes képfeldolgozás foglalkozik. A képfeldolgozás során először az ún. alacsony szintű műveletek kerülnek végrehajtásra, melyek közé sorolható például a képen látható kontúrvonalak megkeresése a további információszerezés érdekében.

A legkülönbözőbb területeken találkozni optikai képfeldolgozó alkalmazásokkal, mint például - élelmiszeripari, gépipari, gyógyszeripari, - minőségbiztosítási területeken, gépjárművek baleset megelőző rendszereiben [11], automatizált videó felügyelő rendszerekben [12], robot navigáció, pozicionáló alkalmazásokban, 3D modell rekonstrukció stb. Nagy előnye ezen kamerás rendszereknek, hogy amit eddig az emberek esetében szemmértéknek neveztek, azt itt matematikai eljárások segítségével könnyen szám(m)értékké lehet konvertálni és mint így, számos mérnöki tevékenység alapját képező mérésekre – hossz mérés - alkalmassá tehető. Jelentős előnye, hogy nincs szükség kontaktusra a mérendő objektum és mérőeszköz között, így az egységnyi felületen egyre növekvő pixelszámú és gyorsabb működésű digitális képfelvévők fokozatosan nyernek teret az ipari alkalmazásokban.

Digitális multispektrális képeken alkalmazott élkereső eljárások feladatukat tekintve egy többdimenziós vektortérben kell, hogy a digitális jelben történő gyors változásokat megtalálják, mely változások a keresett kontúrvonalakhoz köthetők általában.

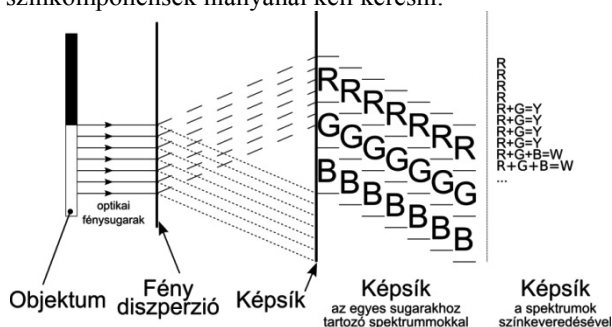
Jelen cikkben a digitális képfeldolgozás alacsony szintű élkeresési feladatát egy új módszer segítségével próbáljuk megoldani [8]. A módszer digitális színes képek esetén alkalmazható, mely során felhasználjuk az optikai prizma fénybontó fizikai tulajdonságát és a szétbontott fény komponenseinek színkeveredését, majd az így nyert digitalizált képen színkorrekció és küszöbszint alkalmazása után kapjuk a lehetséges éltérképet. Az eljárás újdonsága mellett előnye lehet még a hagyományos, multispektrális képeken alkalmazott élkereső eljárásokkal szemben [2-7] a kevesebb számítási kapacitás igény.

\*tanársegéd, Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék

\*\*egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék

## 2. SZÍNSZÓRÓDÁSON ALAPULÓ ÉLFELISMERÉS

A színszóródás jelensége -más néven kromatikus abberáció- egy közismert, nemkívánatos jelenség az optikai rendszerek többségében. Ugyanakkor azonban észrevétel alapján és elképzelés szerint ez a jelenség felhasználható egymáshoz képest elcsúsztatott képek létrehozására is, melynek során, a színkomponenseire szétbontott fény és az így nyert elcsúsztatott képet képrögzítőn felfogva a leképezett térrész felől érkező fény fénykomponenseinek és intenzitásainak lokális változásai implicite megjelennek. Ezek a változások megfigyelés szerint általában a keresett kontúrvonalakhoz köthetőek! Az elképzelt metódus a következő (1. ábra): az objektum fehér színű részéről érkező fénysugarak egyenesen haladva, fénytörő közegen keresztül diszperziót szenvednek, majd a fénykomponenseire bontott fényt egy ernyőn felfogva az egyes sugarakhoz tartozó komponensek színkeveredés után egy elcsúsztatott képet alkotnak. A kapott kép bizonyos részein egyes komponensek hiányoznak, így ott nem kapjuk vissza az eredeti fehér színt, de tovább vizsgálódva a fehér szín újra kikeverődik, így az éleket a színes képen ezen felbontott színkomponensek hiányánál kell keresni.



1. ábra. Elméleti vázlat

### 3. ÉLFELISMERŐ ELJÁRÁS GYAKORLATI MEGVALÓSÍTÁSA

Az eljárás működéséhez szükséges, hogy a fény fénytörést szenvedjen, így komponenseire bontódva kerüljön rögzítésre. Ehhez az optikai rendszerbe egy fénytörésre alkalmas optikai eszközt kell beépíteni. A digitalizált színes képen a megfelelő színkomponenseket kell megkeresni, melyek közvetlenül az éleket jelölik ki.

#### 3.1. Optikai megvalósítás

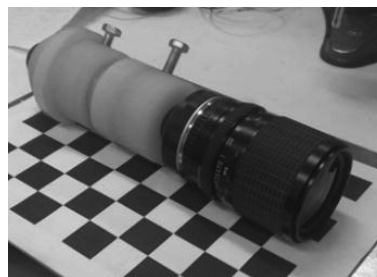
Két különböző elgondolásból született optikai rendszer került megépítésre az eljárás használhatóságának ellenőrzése céljából.



2. ábra. Optikai megoldás 1.

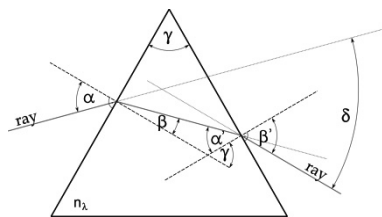
Az első megoldás esetében egy  $45^\circ$  csúcshözzel rendelkező üveg prizma került alkalmazásra az objektív elé építve, melynek hátránya, hogy a prizma beesési szöge és az eltérítési szöge közötti kapcsolat nem lineáris függvény, ezért a kapott kép erősen torzítani fog, melyet kalibrálni kell a torzítás kiküszöbölése végett. Előnye az egyszerűbb kivitelezhetőség, kisebb fókusz távolság (2. ábra).

A második megoldás változatában az objektív és képszorító között egy Amici egyenes állású prizmat és egy változatható fókusz távolságú objektívet felhasználva érjük el a kívánt hatást, mely megoldás hátránya a nehezebb megvalósíthatóság és a nagyobb fókusz távolság, előnye viszont a torzításmentes egyenes állású kép (3. ábra).



3. ábra. Optikai megoldás 2.

Az első megoldás jelentős torzítása a beesési és kilépő fénysugár nemlineáris kapcsolata miatt adódik, 4. ábra, illetve az összefüggést az (1) képlet tartalmazza.



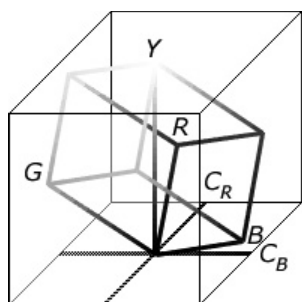
4. ábra. Eltérítési szög háromszög prizma esetén

Az  $\alpha$  belépő és  $\beta'$  kilépő szög közötti eltérítési szög  $\delta$  függvénykapcsolata:

$$\delta = \arcsin(\sqrt{n_x^2 - \sin^2 \alpha} \sin \gamma - \cos \gamma \sin \alpha) + \alpha - \gamma \quad (1)$$

### 3.2. Szoftveres megvalósítás

Az előbbieken leírt módon színtonkomponenseire bontott fényt digitalizálva, a feladat a színtonkomponensek meghatározása a digitalizált képen, melyek az éleket jelölik ki. Egyszerűbb esetekben pl. fekete-fehér átmenet ez nem nehéz feladat, de amikor az él különböző árnyalatú színek átmenetén található, akkor már a színkeveredést jelensége is szerepet játszhat és a feladatot nehezebbé teszi. Az algoritmus általánosan használhatóvá tétele végett, szükséges a képen színtonkorrekciót végezni, mely segítségével a valós színeket tudjuk visszaállítani. Ehhez a [9] irodalomban megjelent elmélet alapján működő algoritmus továbbfejlesztett változatát – Multi Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR - használtuk fel. Az algoritmus nem feltétlenül szükséges a módszer működéséhez, de jelentősen javíthatja annak pontosságát, ennek számszerű kimutatása további vizsgálatot igényel. Az algoritmus az emberi látásérzékelés nagyobb szín-dinamikataromány tömörítő képességét és színvisszaadási tulajdonságát hivatott modellezni digitális színes képek esetén. Ezt követően érdemes a képet RGB színtérről  $Y C_b C_r$  színtérre konvertálni, ekkor a pixelhez rendelt három érték a következő értékeknek felelnek meg:  $C_b$  - kék,  $C_r$  - vörös,  $Y$  - fényerő. A két színtér kapcsolatát az 5. ábra mutatja, illetve a vonatkozó matematikai összefüggéseket a (2) egyenlet tartalmazza.



5. ábra. RGB  $Y C_b C_r$  színterek kapcsolata

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2)$$

Az új színtérre konvertált értékeken a kék és vörös spektrumokhoz tartozó értékek megjelölése küszöbszint vizsgálattal elvégezhető. Az analízis eredménye egy bináris kétdimenziós halmaz amelyen vázkészítés vagy egyéb eróziós műveletek után kapjuk az élek helyét tartalmazó éltérképet. Az éltérképre és így a felismert kontúrvonalakra vonatkozó kritériumokat Canny fogalmazta meg [13].

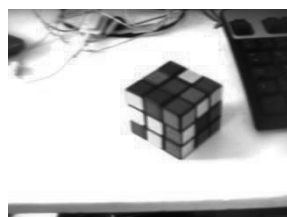
### 4. EREDMÉNYEK

Az előzőekben ismertetett eljárással készült színes képet a 6.a. ábra mutatja, melyet Sony XDC-710CR Bayer szűrős ipari kamerával és a bemutatott 1-es jelű optikai megvalósítás felhasználásával készült.

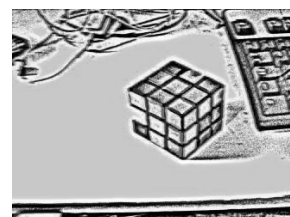
A szoftveres feldolgozása során a következő műveleteket végeztük el a 6.c-d. ábrákon látható bináris képek eredményeként:

- Kép torzításmentessé tétele
- Retinex algoritmus alkalmazása a képen
- $Y C_b C_r$  színtérre történő konvertálás
- Küszöbszint alkalmazás

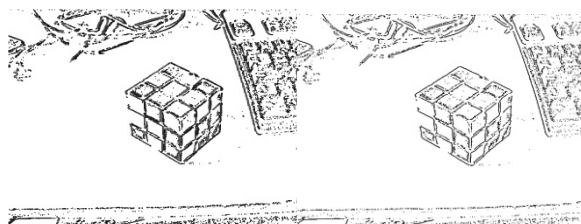
Az eljárás felhasználhatóságát élkeresési célra egyelőre emberi értékelést alapján határoztam meg. Ha a felismert élek jó korrelációt mutatnak a szubjektív emberi megfigyelő által vélelmezett élekkel, a módszer megfelel az élfelismerési kritériumnak. További mennyiségi, számszerűsített összevetése a módszernek ismert és alkalmazott eljárásokkal csak az előbb támasztott kritérium megfelelése után képzelhető el. Az eljárás csak az optikai kiegészítéssel ellátott képfelvévő rendszer esetén alkalmazható, ezért számszerűsítése ismert ún. „ground-truth” adatokkal nem lehetséges, ebben a feladatban a [10] irodalom nyújthat segítséget.



6.a. ábra  
Eredeti színes kép



6.b. ábra Retinex  
feldolgozás után



6.c. ábra Küszöbszint  
alkalmazás

6.d. ábra Éltérkép

A 6.b. ábra mutatja az eredeti felvétel színtonkorrekció utáni állapotát, melyet a MSRCR algoritmus alkalmazásával nyerünk, ennek során az intenzívebb lokális színtonkomponenseket meg tudjuk határozni, illetve a paraméterek változtatásával a szín dinamikája és telítettsége állítható. Ezt követően az eredményt  $Y C_b C_r$  színtonkoordináta- rendszerbe konvertálva, és küszöbszint analízist végrehajtva kapjuk a bináris képet, mely a

lehetséges éleket jelölő pixeleket tartalmazza, 6.c ábra. Annak érdekében, hogy 1 pixelnyi széles, az éleket jelölő éltérképet megkapjuk, ún. karcsúsító (thinning) eljárást kell alkalmaznunk, így áll elő a 6.d. ábra eredménye. Az utóbbi két képet a Baddeley [14] által ismertetett bináris képek esetén alkalmazható hibametrika mérőszámmal össze lehet vetni a más élkereső eljárások által kapott képekkel, így számszerűleg jellemezhetővé válik az eljárás.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A képfeldolgozással azon belül is az élfelismerés módszereivel foglalkozó szakirodalomban nem szereplő új színes képeken alkalmazható élfelismerési eljárás elméleti és kezdeti eredményeit mutattam be jelen cikkben. Az eljárás színes digitális kamerákkal készített képek esetén alkalmazható, melynek újdonság értéke főként a módszer alapelvében rejlik, mely során kihasználjuk az optikai prizma által kínált természetes fénybontás és színkeverés jelenségeit, melynek segítségével következtetünk a digitalizált színes képen fellelhető élek helyére. Az eljárás használhatóságának eldöntését egyelőre a szubjektív emberi ítélet kritériuma alapján tettük meg. Továbbá a módszer alapelvéből fakadóan azt várjuk, hogy a színes képeken alkalmazott élfelismerő eljárásokkal legfeljebb azonos, de inkább kevesebb számítás igényel. Az eljárás alkalmazásának előzetes lehetősége olyan mechatronikai rendszerek estén merül fel, amelyben vizuális visszacsatolás található, illetve egyéb képfeldolgozási műveletet tartalmazó ipari feladatok esetén. További feladat éltérképek létrehozása és az eljárás számszerű mennyiségi jellemzése más eljárásokkal való összevethetőség érdekében, a módszer paramétereinek optimalizálása érdekében.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 7. IRODALOM

- [1] B. JAHNE: Digital Image Processing, Springer, 2002
- [2] G. PAPARI, N. PETKOV: Edge and Line Oriented Contour Detection: State of the Art, Image and Vision Computing, 29, 2011
- [3] R. LUKAC, B. SMOLKA, K. MARTIN, K.N. PLATANIOTIS, A.N. VENETSANOPOULOS: Vector Filtering for Color Imaging, IEEE Signal Process. Mag. Spec. Issue on Color Image Process., 22, 74–86, 2005
- [4] A. KOSCHAN, M. ABIDI: Detection and Classification of Edges in Color Images, IEEE Signal Proc., 22, 1, 2005
- [5] S. DIZENZO: A Note on the Gradient of a Multi-Image, Comp. Vis., Graph. and Im. Proc., 33.1, 116-125, 1986
- [6] I. PITAS, A.N. VENETSANOPOULOS: Order Statistics in Digital Image Processing, Proc. IEEE, 80.12, 1992
- [7] R. LUKAC, K.N. PLATANIOTIS: Color Image Processing: Methods and Applications, CRC Taylor&Francis, 2006
- [8] L. SZALONTAI, E. KOVÁCS: Basic Concept to a Novel Edge Detection Method, Microcad Scientific Conference, Miskolc, 2012
- [9] E. H. LAND: The retinex theory of color vision, Scientific American, 237, 108-128, 1977
- [10] N. L. FERNANDEZ-GARCIA, A. Carmona-Poyato, R. Medina-Carnicer, F.J. Madrid-Cuevas: Automatic Generation of Consensus Ground Truth for the Comparison of Edge Detection Techniques, Image Vision Computing, 26.4, 496-511, 2008
- [11] M. H. HÖRTER: Spotlight on Hazards, dSpace Magazine, 12-17, 2011/2
- [12] URL OF EUROPEAN INDECT PROJECT: <http://www.indect-project.eu>
- [13] A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6, 679-698, 1986
- [14] A.J. BADDELEY: An error metric for binary images. In W. Förstner and S. Ruwiedel, editors, Robust Computer Vision, pages 59-78, Karlsruhe, 1992. Wichmann

# ANDROID ALAPÚ ÁLLAPOTFELMÉRŐ RENDSZER NEUROKOGNITÍV ÉS KERINGÉSI PROBLÉMÁK KORAI FELISMERÉSÉRE

## ANDROID BASED MEDICAL EQUIPMENT FOR EARLY DIAGNOSIS OF NEUROCOGNITIVE AND BLOOD CIRCULATION DISORDERS

Dr. Gáti Attila<sup>\*</sup>, Ferenc István<sup>\*\*</sup>, Dr. Kellényi Lóránd<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

*The aim of the presented project was to add a new item to the family doctors standard equipment extending their opportunities to diagnose diseases even in a very early phase thus helping the patient to the relevant specialist, where based on the clinical symptoms the exact diagnose can be set up, and adequate treatment still augurs well. Components of the newly developed device are already well known and widely applied as part of the armor of the modern clinical medicine, however the novelty of our proposal is to integrate them into a single device, which is cheap enough to be available for GPs. Integrating photoplethysmography, tremor analysis and mental chronometry into a single diagnostic appliance is an idea originating from professor Kellényi, University of Pécs, Hungary, and the experimental copies of his invention were built at the University of Miskolc in cooperation with Bay-Nano Institute. After the successful tests a new stage of the development begun, and a miniaturised, battery operated, handful size new generation of the device was designed and is presented in this paper.*

### 1. A DIAGNOSZTIKAI KÉSZÜLÉK FUNKCIÓI

Az állapotfelmérő rendszer három különböző vizsgálat elvégzésére, és azok kombinált kiértékelésére alkalmas. A három fő diagnosztikai terület a következő.

<sup>\*</sup> Miskolci Egyetem

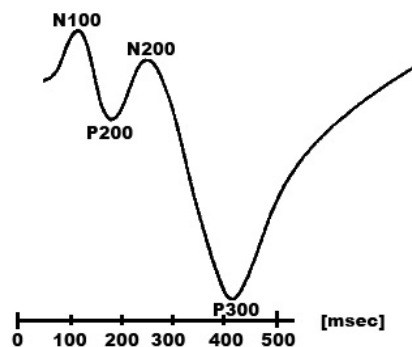
<sup>\*\*</sup> Miskolci Egyetem

<sup>\*\*\*</sup> Pécsi Tudományegyetem

### 1.1 Egyszerű és feltételes reakcióidő

A kognitív eseményfüggő potenciál (ERP) non-invazív vizsgálata hatékonyan alkalmazható egy sor agyi elváltozás, például az Alzheimer-kór korai stádiumú diagnosztizálására. Sutton és Desmedt két egymástól független laboratóriumban már 1965-ben kapcsolatot mutatott ki az ERP és a reakcióidő között. Felfedeztek egy úgynevezett P300 ERP hullámot, amely csak akkor jelenik meg, ha az ingeret követően döntést kel hozni.

Köszönhetően ezen felfedezésnek "a P300 mérése viszonylag olcsó, ugyanakkor a klinikai kivizsgálásokkal azonos megbízhatóságú eljárás a kognitív képességek vizsgálatára" [1]. A reakcióidő úgy definiálható, mint az inger és a vizsgált személy reakciója között eltelt idő. Az inger típusától függően az agy különböző területein aktivitás figyelhető meg. A 1. ábra egy ilyen EEG hullámformát mutat be a jellemző – többek közt a P300 - komponensek feltüntetésével [2].



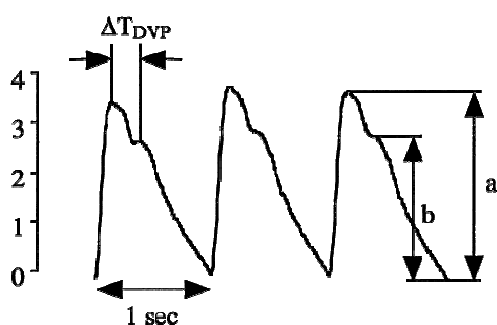
1. ábra Az ERP komponenseinek sematikus ábrázolása

Mindkét típusú, a gyakorlatban is használt vizsgálat célja a kognitív funkciók lassulásának mérése, és komoly műtétek utóhatásaként jelentkező neurodegeneratív elváltozások kimutatása EEG nélkül. Az egyszerű reakcióidő mérés (sRT) esetén a

páciensnek egy véletlenszerű időközönként fellépő hangingerre kell gombnyomással reagálnia egy adott maximális időkereten belül. A készülékkel mérni kell a hanginger és a válasz között eltelt időt. Feltételes reakcióidő (cRT) mérés esetén a célingerek közé elvértve jól elkülöníthető, más hangmagasságú zavaró ingereket iktatunk be, amelyeket figyelmen kívül kell hagyni. [3].

## 1.2 FOTO-PLETIZMOGRÁFIA

A leggyakoribb halálokok listáját a kardiovaszkuláris megbetegedések vezetik, ezért ezek korai felismerése és diagnózisa fontos szerepet játszik a mortalitási ráta csökkentésében. A foto-pletizmográfia (PPG) egyike a non-invazív diagnosztikai módszereknek.



2. ábra Jellegzetes PPG jel [4]

Noha Alrick Hertzman már 1937-ben bevezette a reflexiós módszert az ujjban lévő vér mennyiségi változásainak vizsgálatára, a PPG mégis csak az utóbbi évtizedben válhatott elterjedt diagnosztikai módszerre köszönhetően az infravörös optoelektronikai eszközök érzékenységben, méretben, megbízhatóságban és reprodukálhatóságban bekövetkezett fejlődésének [5,6].

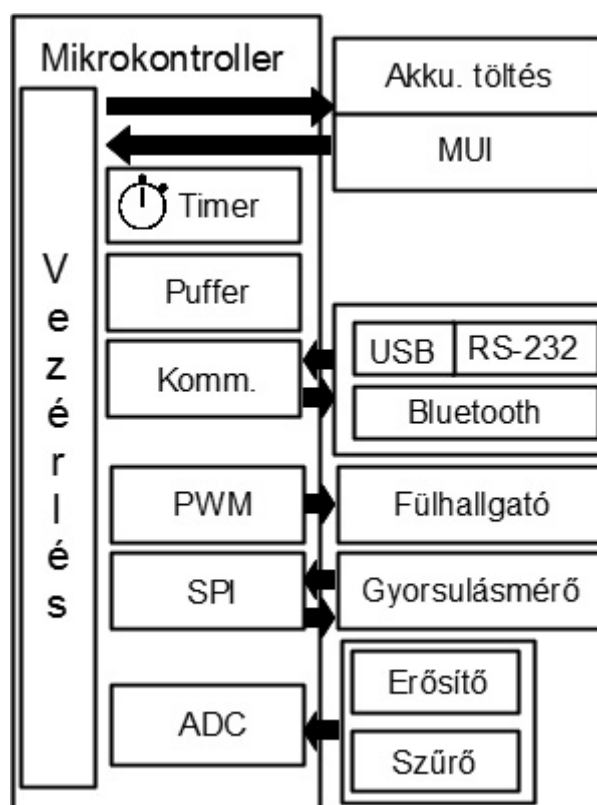
## 1.3 TREMOR ANALÍZIS

Az emberi test mozgásának vizsgálata az emberiség érdeklődésének középpontjában van már évszázadok óta, mindazonáltal gyorsulásmérővel történő közvetlen méréséről először J.R.W. Morris számolt be 1973-ban [7], és a foto-pletizmográfiahoz hasonlóan szintén csak az elmúlt évtizedben került a köztudatba. A tremor úgy definiálható, mint a testrészek akaratlan, ritmikus oszcillációja. A végtagok elmozdulását regisztrálva mind a fiziológiás, mind a patológiás tremor mérhető. A vizsgálat során kisméretű félvezetős piezoelektromos gyorsulásmérőt tart a páciens a kinyújtott kezében. Noha az egészséges embernek is van fiziológiás tremora, részletes frekvencia analízis segítségével számos megbetegedés is diagnosztizálható már egészen korai stádiumban, mint például a Parkinson-kór, drogok

által kiváltott remegés, drog vagy alkohol elvonási tünetek, metabolikus zavarok. [8-9]

## 2. A HARDVER FELÉPÍTÉSE

A mérőrendszerhez tervezett célhardver egy mikrokontroller vezérlésű kártya, amelyen az alapvető perifériák találhatóak meg, ahogy a 3. ábrán látható. A fő modulok a következők: fotopletizmográfiahoz szükséges szűrő-erősítő és A/D átalakító áramkörök, SPI-vel (Serial Peripheral Interface) csatlakozó digitális gyorsulásmérő modul, a reakcióidő méréshez egy nyomógomb és egy piezzo csipogó, akkumulátortöltést vezérlő áramkör, valamint a kommunikációs modulok.



3. ábra .A mérőeszköz felépítése

Mivel a mérésiértékelés, grafikus megjelenítés, adattárolás erőforrás igényes feladatait egy általános célú eszközre bíztuk, a különféle vizsgálatokhoz tartozó szenzorok kezelésére, az adatok továbbítására elegendő egy egyszerű és olcsó, általános célú mikrovezérlő. A feladat ellátásához szükséges funkciókat, úgy mint A/D konverzió, pulzusszélesség moduláció, soros kommunikációs interfészek (SPI, UART), digitális I/O portok, időzítők számlálók szinte valamennyi mikrokontroller típus képes megvalósítani.

Az áramkör diagnosztikai funkciókat megvalósító komponenseiről részletesebben a következő alfejezetekben olvashatunk.

## 2.1 REAKCIÓIDŐ MÉRÉSE

A reakcióidő mérés megvalósításához az eltelt idő milliszekundumos pontosságú mérésének lehetősége, véletlenszám generálása valamint hangjelzések szükségessége. Ezek a funkciók a mikrokontrollerbe integrált modulok használatával implementálhatóak legegyszerűbben. Az időméréshez egy számlálóregiszter tartalmát inkrementálja a rendszer órajele, majd egy bizonyos értéket elérve interrupt keletkezik. A megszakítások számlálásával képezzük mind a sípszók között eltelt véletlenszerű időintervallumokat, mind pedig a sípszó és gombnyomás - a páciens válasza - közti reakcióidőt. Kétféle hangmagasságú sípszót kell generálni, amelyeknek a frekvenciája nem kötött, de jól elkülöníthetőnek kell lenniük, erre kielégítő megoldást nyújt a mikrovezérlő pulzusszélesség modulációt (PWM) megvalósító modulja. A véletlen szekvenciák összeállítása szoftveres úton történik. A program fejlesztéséhez a gyártó PC-s fejlesztőkörnyezetet (AVR Studio) és keresztfordító (avr-libc) biztosít. A gazdag függvénykönyvtárak között megtalálható véletlenszám generáló random library, ennek pszeudorandom generáló függvényét használja a szoftver.

## 2.2 PLETIZMOGRÁFIA

A pletizmográfia vizsgálathoz egy infravörös adó-vevőből álló szenzor jeleit kell megfelelő jelkondicionálást követően digitalizálni. A jelek erősítését, szűrését egy analóg áramkör biztosítja, a digitalizálást pedig a mikrokontroller 10 bites SAR típusú analóg-digitál átalakítója végzi. Mind az előzetes számítások, mind a tapasztalatok igazolják, hogy 250Hz-es mintavételezéssel és a mikrokontroller beépített AD konverterének használatával a szívgörbe rögzíthető. A szenzor formája, elhelyezése azonban szignifikáns kérdés, hiszen a visszavert jel erőssége nem csak a bőrfelszín közeli hajszálerek állapotától függ, hanem attól is, milyen erővel rögzítjük az eszközt.

## 2.3 TREMOR ANALÍZIS

A tremor analízis elvégzéséhez a fiziológiás kézremegés horizontális és vertikális komponenseinek rögzítése szükséges. Ezen feladat megvalósítására ma már rendelkezésre állnak olyan kis fogyasztású piezoelektromos MEMS szenzorok, amelyek digitális interfészekon keresztül konfigurálhatóak és olvashatóak ki. A mérőeszközben egy ilyen MEMS szenzor található, SPI-vel csatlakoztatva a mikrokontrollerhez.

## 3. ANDROID ALAPÚ ADATGYŰJTŐ ÉS KIÉRTÉKELŐ ALKALMAZÁS

A hagyományos mobiltelefonokat felváltó ún. okostelefonok képességei már elegendőek a diagnosztikai készülék segítségével rögzített adatok kiértékelésére, tárolására és megjelenítésére. Az egyik legdinamikusabban fejlődő platform az Android, amely komoly támogatást nyújt platformfüggetlen java alkalmazások fejlesztésére. A készülékhez a Miskolci Egyetemen szakdolgozat keretében [11] kifejlesztett szoftver főbb elemei a következők

### 3.1 KOMMUNIKÁCIÓ

A kommunikációs programmodul feladata a mérőkészülék távvezérlése az érintőképernyőn kiválasztott funkciónak megfelelően és a mikrokontroller által továbbított mérési adatok fogadása. Ezen kívül lehetőséget teremt a rögzített adatoknak egy személyes számítógép felé történő továbbítására is.

### 3.2 ADATOK TÁROLÁSA

Triviális, hogy a mérőrendszernek a mért adatok tárolására is képesnek kell lennie, ugyanakkor a mért adatokat össze kell tudni kötni a páciensen személyes információival is. Mivel a kétféle információ gyökeresen más struktúrájú, és a személyi adatok védelmét szabályzó jogi háttér miatt más kezelést is igényel, a személyi adatok egy titkosított adatbázisban, míg a regisztrált mérési eredmények fájlokban kerülnek tárolásra. A program lehetőséget teremt a személyi adatok bevitelére, módosítására illetve a számítógéppel való szinkronizálásra.

### 3.3 MEGJELENÍTÉS, KIÉRTÉKELÉS

Lehetőség van az adatok mind on- mind offline módban történő megjelenítésére. Az online megjelenítés lehetővé teszi a hibás mérések azonnali felismerését és kiszűrését, míg az offline megjelenítés nagyobb számítási és időigényű elemzések elvégzésére illetve hosszabb adatfolyamok komplex elemzésére szolgál. A legfontosabb kiértékelő programmodulok például a reakcióidő mérésénél statisztikai kiértékelés, a tremor vizsgálatnál FFT analízis, a szívgörbén a jel digitális szűrése, a görbe jellegzetes pontjainak és intervallumainak beazonosítása.

Természetesen a programkomponensek kiválasztására, kezelésére a mobilhasználók által megszokott menürendszer szolgál.



4. ábra képernyőkép a szívgörbe felvételéről

#### 4. KONKLÚZIÓK, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A jövő tervei közt további miniatürizálás és ergonómiai tervezés szerepel. Az E-egészségügy nagyon újszerű szó a közegészségügy és az orvosi informatika találkozási pontjára, amely az Internet és kapcsolódó technológiák által továbbított vagy minőségileg javított egészségügyi szolgáltatásokra vonatkozik. [10] Az Európai Digitális Agenda részeként 2012 és 2020 közötti időszakban zajlik az E-egészségügy akcióterve. Amint a normák és szabványok jóváhagyásra és bevezetésre kerülnek, az eszköz adatformátumát és kommunikációs protokollját a szoftver módosításával összhangba lehet azokkal hozni.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

"A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"

- [1] POLICH J. Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clinical neurophysiology: official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology* 1 October 2007 (volume 118 issue 10 Pages 2128-2148 DOI: 10.1016/j.clinph.2007.04.019) [PubMed: 2715154]
- [2] J. T. CACIOPPO, L. G. TASSINARY, G. G. BERNTSON *Handbook of Psychophysiology* Second Edition, Chapter 3. Cambridge University Press 2000.
- [3] STEFANICS G., KELLÉNYI L., JAKAB A., KOVÁCS P., THURÓCZY Gy., BALÁS I. (2003): Investigations of human cognitive processes by analysis of event related potentials (P300), reaction times and physiological tremor. *A Magyar Tudományos Parkinson Társaság Konferenciája*. Budapest. Poszter.
- [4] PHILIP J. CHOWIENCZYK, et al. Photoplethysmographic assessment of pulse wave reflection: Blunted response to endothelium-dependent beta 2-adrenergic vasodilation in type II diabetes mellitus *J. Am. Coll. Cardiol.* 1999;34;2007-2014
- [5] J. ALLEN. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement, *Physiol. Meas.* 28 (2007) R1–R39 2007
- [6] D. SOMMERMEYER, U. NIXDORFF, M. SCHWAIBOLD, B. SCHÖLLER, A. BOLZ, Determination of arterial stiffness by peripheral photoplethysmography for prediction of cardiovascular risk. *ESC Congress 2009*, 29 August - 9 September Barcelona
- [7] J.R.W. MORRIS, Accelerometry—a technique for the measurement of human body movements. *Journal of Biomechanics*, Vol 6, Iss 6, November 1973, Pages 729-732, IN17,733-736
- [8] A. GODFREY, R. CONWAY, D. MEAGHER, G. ÓLAIGHIN, Direct measurement of human movement by accelerometry. *Medical engineering & physics* 1 December 2008 (volume 30 issue 10 Pages 1364-1386 DOI: 10.1016/j.medengphy.2008.09.005)
- [9] KELLÉNYI L., JAKAB A., STEFANICS G., KOVÁCS P., BALÁS I. : Új vizsgálati eljárás és mérőkészülék a Parkinson-kór, a tremorok és a kognitív folyamatok analíziséhez stereotaxiás műtéti kezelés során. *A Magyar Tudományos Parkinson Társaság Konferenciája*. Budapest. Poszter.
- [10] G EYSENBACH, What is e-health? (*JMed Internet Res* 2001;3(2):e20 doi:10.2196/jmir.3.2.e20)
- [11] Bartók Roland: Mobil technológia alkalmazása egészségügyi állapotfelmérő készülékhez, szakdolgozat, Miskolci Egyetem 2011.

# MÓDSZER INKREMENTÁLIS JELADÓ MODELL- ALAPÚ HIBA-DETEKTÁLÁSÁRA

## METHOD FOR MODEL BASED FAULT DETECTION OF AN ENCODER

Füvesi Viktor\*, Kovács Ernő\*\*

### ABSTRACT

*The paper introduces a nonlinear modelling of a complex drive chain of a moving measurement equipment using Locally Linear Neuro-Fuzzy (LLNF) model. The developed model was used for detecting the systematic impulse fault of the built in sensor. The model was developed based on collected data from the real system but the faults were artificially generated. Different structured neural networks were used to sign the occurrence of faults.*

A rendszer hibáinak kimutatására számos módszer található az irodalomban: pl. a paritás egyenletek [1] és obszerverek [3] alkalmazásán alapuló eljárások, de a paraméter-közelítéses eljárásra [2] és neurális hálózatok alkalmazására is van példa [5, 7].

A cikk egy speciális neuro-fuzzy modell kifejlesztését és alkalmazását mutatja be a vizsgált ipari mérőrendszerben található egyik érzékelő hibájának észlelésére. Többretegű, előretrétegzett neurális hálózat került felhasználásra a különbségképzésből származó jelsorozat és a hibát kimutató jel előállítására.

### 1. BEVEZETÉS

Az ipari rendszerek alap követelményei közé tartozik a pontosság, megbízhatóság és biztonság. A vizsgált rendszerekben felmerülő hibák minél korábban történő észlelése segíthet a rendszerleállások, anyagi károk elkerülésében vagy súlyosabb esetben az emberi élet megővésében is. Azt a folyamatot, amikor a rendszer esetleges hibáinak kimutatását végezzük, hiba-detektálásnak nevezzük. A sikeres hiba-detektálás kihathat akár a termelékenységre is.

A különféle szenzorok és érzékelők a manapság használatos ipari berendezések fontos építőköveivé váltak. A hibásan működő érzékelők vagy a rendszer mechanikájában felmerülő egyéb hibák hátrányosan befolyásolják a rendszer működését.

Számos elméleti eredmény született az analitikus redundancián alapuló hiba diagnózis témakörében a 80-es évek elejétől napjainkig. A módszerek nagy része a vizsgált rendszer modelljének segítségével végzi a hiba kimutatását. A monitorozott rendszer modellje felhasználható egy ún. hibajel-képzésre (residual), amely egy olyan mennyiség, ami érzékeny a rendszer hibás működésére, üzemzavaraira [1].

### 2. VIZSGÁLT RENDSZER BEMUTATÁSA

A szárazföldi kísérleti olajfúrások során, az esetlegesen kőolajat magában foglaló, kiemelt kőzetmag mélységnek pontos meghatározásához, a kőzet természetes gamma sugárzásából származó gamma spektrumot használják. A helyszíni gamma-log regisztrátum mélységadatainak pontosításához a kiemelt kőzetszelvényeket laboratóriumi körülmények között is megvizsgálják. A fúrás helyszíni eredményeinek és a laboratóriumi vizsgálatok eredményeinek korrelációjából a kőzet mélységének meghatározása pontosítható. A mérések során az egyik legfontosabb kritérium, hogy a felvett gamma spektrum és a hozzá tartozó mélységértékek ne csússzanak el egymáshoz képest. Ezért a gamma sugárzás mérő detektor minél pontosabb mozgására van szükség.



1. ábra MGL-01F Gamma-log rendszer

\*tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, Műszerfejlesztési és Informatikai Osztály

\*\*egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék

A ME AFKI Műszerfejlesztési és Informatika Osztálya egy mobil gamma-log berendezést (MGL-01F) fejlesztett ki. A gamma-sugárzásmérő detektor egy kis kocsiban foglal helyet, ami egy speciális sínrendszeren halad. A vizsgált közetmag pedig sínrendszer közepén, a kialakított tartóban foglal helyet.

A berendezés hajtását egy 200W-os AC szervomotor adja. A motor kihajtótengelyére egy 70-es lassító áttételű csigahajtómű csatlakozik. A kocsi bal hátsó kereke a hajtott kerék. A rendszer pontosságáról egy jeladó gondoskodik, ami a berendezés bal első kerékhez van csatlakoztatva.

### 3. A RENDSZER MODELLEZÉSE

A vizsgált rendszer viselkedésének leírásához szükség van a rendszer minél pontosabb matematikai modelljére. A vizsgált hajtásláncból és mechanikából álló rendszer egy, a természeténél fogva dinamikai rendszer. A modellalkotás során a bemenetek és kimenetek közti rejtett összefüggést próbáljuk felfedni. Ebben az esetben a rendszer leírható egy több bemenetű, egy kimenetű modell segítségével (MISO).

A modell a valós rendszeren történt mérések alapján lett kifejlesztve. A mérések során változtatásra került a kocsi gyorsulása és sebessége, a megtett út viszont állandó maradt. Az így született mérésekből egy adatbázis került kialakításra, amiből a modellezéshez felhasznált betanító, hitelesítő és teszt mintakészletek lettek összeállítva, úgy hogy a három mintakészlet egymástól független adatokat tartalmazott. A mérések során mértük a három fázisfeszültséget és fázisáramot valamint a jeladó impulzussorozatát. A nyers adatok elő-feldolgozáson estek át, mint szűrés (a zajok eltávolítása miatt) és újra-mintavételezés a későbbi betanítás felgyorsítása érdekében).

A rendszer a neurális hálózatok egy speciális fajtájával került modellezésre.

#### 3.1. LLNF modell és LOLIMOT algoritmus

A radiális bázis függvény (RBF) hálózat egy kiterjesztéseként ismert lokálisan lineáris neurális hálózatot (Local Linear Neuro Fuzzy, LLNF) használtuk a rendszer modellezésére. Ebben a struktúrában a kimeneti réteg neuronjainak súlyai, a neuronok bemenetének lineáris kombinációjával kerültek helyettesítésre. Az RBF hálózatot skálázni és normalizálni kell a feldolgozáshoz [6, 7, 8].

A LOLIMOT hálózat kimenete ( $y_e$ ) a következő módon számítható (1) [17]:

$$y_e = \sum_{i=1}^M \phi_i(\underline{u})(w_{i0} + w_{i1}u_1 + \dots + w_{ip}u_p) \quad (1)$$

Ahol:  $M$  neuronok és egyben a részmodellek száma;  $\underline{u}$  a bemeneti vektor;  $p$  a bemenetek száma;  $w_{xy}$  az  $x$ . neuronban az  $y$ . súly;  $\Phi_i$  a normalizált Gauss-féle érvényességi függvény (2),(3).

$$\phi_i(\underline{u}) = \frac{\mu_i(\underline{u})}{\sum_{j=1}^M \mu_j(\underline{u})} \quad (2)$$

$$\mu_i(\underline{u}) = \prod_{j=1}^p \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u_j - c_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right) \quad (3)$$

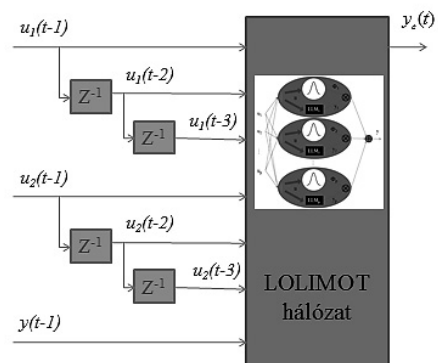
Ahol  $c$  a centert és  $\sigma$  a szórást jelenti. A modellben a  $w$  paraméterek lineáris paraméterek még a  $c$  és  $\sigma$  nemlineáris paraméterek.

A hálózat betanítása a lokálisan lineáris modell fa algoritmussal (LOLIMOT) lehetséges, ami stabil és gyors konvergálást biztosít. A betanítás folyamata két részből áll: a) a betanítás első felében a bemeneti teret képezzük le az érvényességi függvény paramétereinek meghatározásával, b) a második lépés során a lokális modellek (LLM) optimalizációja folyik a legkisebb négyzetek módszerének segítségével.

Alapesetben ez a hálóstruktúra nem alkalmas dinamikai rendszer modellezésére, ezért külső dinamikai bemeneti konfigurációt alkalmaztunk. A transzformált áram és feszültség szolgált bemenetként és a kocsi mozgását leíró időfüggvény pedig kimenetként.

#### 3.2. ARX külső dinamika

A berendezésen végzett mérések alapján betanításra került FIR (Finite Impulse Respond) típusú külső dinamikával rendelkező hálózat is, de nem szolgáltatott megfelelő eredményt. Jó és stabil megoldást adott azonban az ARX (Autoregressive with eXogenous), ami FIR esetén is használt  $u_1$  és  $u_2$  bemenetek mellett, a kívánt  $y$  kimenetet is a bemeneti térbe helyezi.



2. ábra ARX típusú háló-struktúra

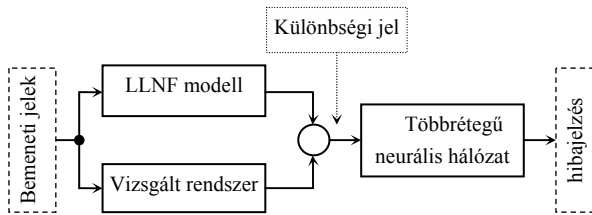
A formázott és transzformált mérési paraméterek alapján felépített, a kocsi elmozdulást közelíteni képes

modell született, amelyet felhasználtunk a rendszer egyik hibafajtájának kimutatására is.

#### 4. HIBADETEKTÁLÁS MÓDSZERE

A felépített modellel a rendszer számos hibája kimutatható. A cikk keretében a jeladó szenzor egyik hibájának detektálása kerül bemutatásra. A hibás jelsorozatok mesterségesen lettek előállítva a mérésekből. A hiba kimutatásának folyamata a következő (3. ábra):

- A folyamattal vagy vizsgált rendszerrel párhuzamosan futtatjuk a korábban felépített modellt. Mind a két rendszer a modell és a valós rendszer ugyanazt a bemenetet kapják. A modell és a rendszer kimeneteiből számítható egy különbség, ami nagyon kis érték a rendszer hibátlan működése esetén és a használt modell pontosságának függvényében.
- Ha hiba keletkezik a rendszerben, akkor a generált különbségnek az értéke megnő. A hibás és hibátlan állapot szétválasztására a neurális hálózatok nagyon jó osztályozási képességét használjuk ki. A generált különbség felhasználható egy többrétegű neurális hálózat bemeneteként, ami a kimeneten hibajelzést hoz létre.



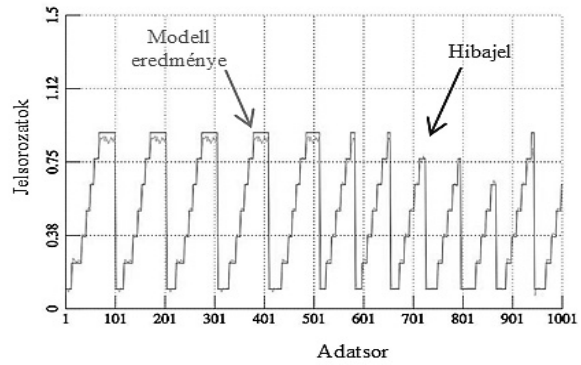
3. ábra Hibadetektálás módszere

#### 5. RENDSZERES SZENZOR HIBA

A forgó jeladók egy lehetséges hibája, hogy az egy fordulat alatt leadott impulzusok száma rendszeresen eltér a specifikált értéktől. Látszólag teljesen hibátlanul működik a jeladó, de a leadott impulzusszám nem megfelelő. Ezt a hibatípust okozhatja a jeladó mechanikus vagy elektronikus hibája, de a berendezés egyéb mechanikus hibája is.

A feltételezés az volt, hogy a jeladó négy impulzussal kevesebbet szolgáltat fordulatanként és a hiba egy körülfordulás alatt két alkalommal is előfordul, így egy hiba alkalmával két impulzus veszik el.

A hibamentes és a hibásan működő jeladó impulzusszámának különbségét képezve egy lépcsőzetesen változó függvényt kapunk. Egy körülfordulás alatt két lépcső születik. Az egyik legjobb eredményt produkáló háló eredménye és a kívánt kimenet a 4. ábrán látható.



4. ábra Az egyik legjobb eredményt produkáló hálózat kimenete és a hálózattól megkívánt kimenet

A hibadetektálást végző neurális háló betanításához három független mintakészlet készült: a) a hálózat tanításához, b) a tanítás leállításához, ami azért fontos, hogy a hálózat elsajátítsa a tanító mintakészletbe foglaltakat, de képes legyen még extrapolációra is, c) a teszteléshez, ami különféle háló-típusok összehasonlításához volt szükséges. A mintakészletek a kocsli különféle sebessége és gyorsulása mellett született mérésekből származó, előfeldolgozott jelsorozatok összefűzéséből születtek. A szimulációkban változtattuk a hiba első megjelenésének időpontját is.

STRUKTÚRA	TÍPUS	MEGVALÓSÍTOTT FÜGGVÉNY
1. Konfig.	NNFIR	$y_s(t) = f(u(t))$
2. Konfig.	NNFIR	$y_s(t) = f(u(t), u(t-1))$
3. Konfig.	NNFIR	$y_s(t) = f(u(t), u(t-1), u(t) - u(t-1))$
4. Konfig.	NNARX	$y_s(t) = f(u(t), u(t-1), \dots, y(t-1))$
5. Konfig.	NNARX	$y_s(t) = f(u(t), u(t-1), \dots, y(t-1), y(t-2))$
6. Konfig.	NNARX	$y_s(t) = f(u(t), u(t-1), \dots, y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-1) - y(t-2))$

1. táblázat Vizsgált háló-konfigurációk struktúrája

Több háló-konfigurációt teszteltünk a hibajel előállítása érdekében. A vizsgált struktúrákban változtattuk a rejtett rétegben elhelyezett neuronok számát és a struktúra bemeneti konfigurációját. Hat bemeneti konfigurációt teszteltünk és öt rejtett neuron számot használtunk a vizsgálat során. A különféle hálókonfigurációk, a hálózat típusok és a hálózat által megvalósított átviteli függvényt az 1. táblázat tartalmazza.

Általában a neurális hálózat jóságát az átlagos négyzetes hibával (MSE) értékelik. Jelen esetben a különféle háló-struktúrák értékelésére a neurális struktúra hibajelének deriváltja használható fel. A korábban említett lépcsős hibajel a deriválás során

impulzusokká fajul. Az így képzett jelsorozat jól kiértékelhető.

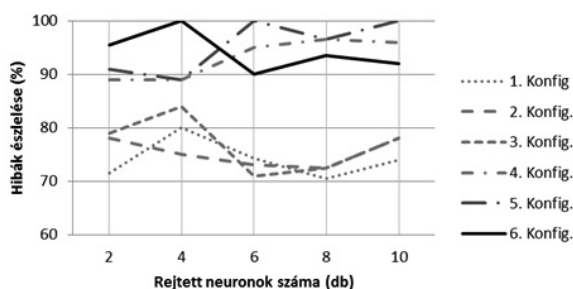
A teszt jelsorozat 66 hibát tartalmazott összesen. Az aktuálisan vizsgált hálózat teljesítményét két tényező határozza meg: a) a valós hiba felismerése (RF), b) hibás hibafelismerés (BA). A helyes időben képzett hibajelek számából és a hibás hibaimpulzusokból a (4) képlet szerint képeztünk egy relatív hibaimpulzus számot, ami a vizsgált, betanított neurális hálózat hiba felismerő képességét (HFK) relatív hiba jellegű mennyiségként értékeli.

$$HFK = \frac{RF}{RF + BA + MF} \cdot 100\% \quad (4)$$

Ahol RF: felismert hibák száma, BA: a hibás jelzések száma, MF: téveszett jelzések száma.

A kiértékelés során az számított jó hibajelzésnek, ahol a hálózat kimenetéből generált impulzus nagysága elérte a megkívánt impulzus nagyságának 30%-át.

Az 5. ábra mutatja a különféle neurális hálóstruktúrák eredményeinek összesítését. A vizsgált hálózatkonfigurációk közül az NNARX típusú hálóstruktúrák produkálták a legjobb eredményeket (pl. 5. konfiguráció). Az NNFIR típusú hálózatoknál 4 rejtett neuronnál érte el az eredményt, míg az NNARX esetén több neuronra volt szükség.



5. ábra A vizsgált hálóstruktúrák eredményeinek értékelése

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy az olajiparban használatos eszköz nemlineáris modelljét építettük fel neurális hálózat segítségével. A modell felépítése és betanítása a rendszeren történt mérések felhasználásával történt.

Bemutattunk egy módszert a mérőrendszer inkrementális jeladója egyik hibájának detektálására. A módszer a valós rendszer kimenete és a vele párhuzamosan futó modell kimenete által generált különbségből egy neurális hálózat segítségével létrehozott hiba-detektáló jel megalkotásán alapul.

A neurális hálózat osztályozási tulajdonságát kihasználva képesek voltunk a vizsgált kocsikerekek körülfordulása során 2 alkalommal jelentkező szenzorhiba 100%-os pontossággal észlelésére.

A vizsgálatok során több hálózatot elemeztünk és megállapítottuk, hogy a legjobb eredményt az NNARX struktúra szolgáltatja.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## IRODALOM

- [1] SCHWARTE, A.; ISERMANN, R.: Neural Network Applications for Model Based Fault Detection with Parity Equations, Proc. of 15<sup>th</sup> Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Barcelona, 21–26 July 2002, Vol. 15, Part 1.
- [2] LU, Y.; COLLINS, E. G.; SELEKWA, M. F.: Parity Relation Based Fault Detection, Isolation and Reconfiguration for Autonomous Ground Vehicle Localization Sensors. Proc. of 24<sup>th</sup> Army Science Conference, 2004.
- [3] JIANG, B.; CHOWDHURY, F. N.: Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observer. Journal of the Franklin Institute, Vol. 342, Iss. 7, November 2006, pp. 726-736.
- [4] CAPRIGLIONE, D.; LIGUORI, C.; PIANESE, C.; PIETROSANTO, A.: On-line Sensor Fault Detection, Isolation and Accommodation in Automotive Engines. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, Iss. 4, Aug. 2003, pp. 1182-1189.
- [5] BÖRNER, M.; STRAKY, H.; WEISPFENNING, T.; ISERMANN, R.: Model based fault detection of vehicle suspension and hydraulic brake systems. Mechatronics, Vol. 12, Iss. 8, October 2002, pp. 999-1010.
- [6] RAZAVI-FAR, R.; DAVILU, H.; PALADE, V.; LUCAS, C.: Model-based fault detection and isolation of a steam generator using neuro-fuzzy networks, Neurocomputing 72, 2009, pp. 2939–2951.
- [7] NEKOU, M.A.; SAJADIFAR, S.M.: Nonlinear System Identification using Locally Linear Model Tree and Particle Swarm Optimization, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006., (ICIT 2006), pp. 1563-1568.
- [8] NELLES, O., FINK, A.; ISERMANN, R.: Local linear model trees (LOLMOT) toolbox for nonlinear system identification, In IFAC Symposium on System Identification (SYSID), Santa Barbara, USA, June 2000.

# EGYENÁRAMÚ KISMOTOR VISELKEDESE ÉS MÉRÉSE A VILÁGHÁLÓN

## SMALL-SIZE D.C. MOTOR PERFORMANCE AND TEST VIA INTERNET

*Dr. Szentirmai László \**

### ABSTRACT

*Internet is such an infrastructure on which an electrical machine or system can be built. The new virtual laboratory developed recently incorporates two subsystems: FieldPoint based measurement subsystem for sensor, actuator and motor test, and a GPIB e-net based complex measurement subsystem for electronic circuit analysis. FieldPoint software contains measurements for small d.c. motor, and two others. Controllable parameters are power supply voltage and load, measurable parameters include power supply voltage, armature current, rotational speed and motor temperature, computable parameters are power and motor torque. From any location of the world an authorized engineer, academic or student can check the motor, find an error or get further information without the need of individual presence on the spot.*

### 1. BEVEZETÉS

Az internet egy új eszköz a mérnöki tudományok, a felsőoktatás és az ipar együttműködéséhez, a "tudás" szabad áramlásához. A villamos gépek és hajtások szabályozása az elektronika és informatika legújabb eredményeit is magába foglalja kezdve a tudományos kutatás és műszaki fejlesztés állomásaitól, a tervezés, működés, a mérések, sőt az alkalmazások és karbantartás területén is az Internet hozzáférés támogatásával. Ez az új lehetőség növeli a gyártmányok minőségét és csökkenti a műszaki fejlesztés időtartamát és költségét. A biztonsági feltételek és szabványok fejlesztésével, a globális internetkapcsolatok gyors növekedésével fenti célok az új nagysebességű eszköz révén elérhetők.

A világháló valamennyi emberi tevékenység elválaszthatatlan elemévé vált. A technológia nagymértékben szélesíti a lehetőséget az együttműködő kutatásra, műszaki fejlesztésre és kísérletezésre, mert nincs szükség a kutató és a vizsgálóállomás, valamint berendezései fizikai jelenlétére. Mérnökök egészen

távol, akár a világ másik részén is, dolgozhatnak a világháló beiktatásával távolról irányítható különböző műszerekkel és berendezésekkel. A rendelkezésre álló legújabb technikai fejlesztés megvalósulásával ugyanazokat a célkitűzéseket meg lehet valósítani, mint a tényleges laboratóriumban, sőt az esetek jó részében még sokkal hatékonyabban és eredményesebben is.

Az Internet - fentiek alapján - egy olyan infrastruktúra, amelyikhez egy villamos gépet vagy rendszert is telepíthetünk.

1. Az ember-gép közötti párbeszédet biztosító interfész kialakításához különböző médiumok szolgáltatnak lehetőséget beleértve a médiumok interaktív működtetését.
2. Szabványos kommunikációs szoftver lehetővé teszi, hogy az adott villamos motor vagy rendszer – mivel az internethez kapcsolódik – a szoftver útján bármely internet csatlakozásról elérhető.
3. Változó hardver és szoftver alkalmazható, amelyek az interneten keresztül szétoszthatók annak megfelelően, hogy az adott elképzelést megvalósítsák.

Mindezek a célkitűzések a való világtól eltérően, a XX. század utolsó évtizedében útjára indult virtuális laboratóriumban vagy más kifejezéssel internet-alapú laboratóriumban megvalósíthatók. Az új technológia gyakorlati megvalósítása érdekében [1] egy egyenáramú kismotor laboratóriumi vizsgálata, műszaki tulajdonságai, mérése, legfontosabb jelleggörbéi a világ bármely más részén tartózkodó részére is elérhetők. A fejlesztési munka első része az egyenáramú állandó mágnesű 25 watt teljesítményű kismotor műszaki viselkedésének leírásával, műszaki tulajdonságainak beállításával és mindezekhez szükséges virtuális laboratórium megteremtésével indult.

A tanulmány az elméleti alapvetésekkel és a laboratórium gépészmérnökök számára való hozzáférését segítő tudományos ismeretekkel kívánja megismertetni az érdeklődőket. A témaválasztás fontosságát aláhúzza, hogy a kisteljesítményű és kisméretű állandómágnesű egyenáramú motor rendkívül kedvelt mechatronikai rendszerekben.

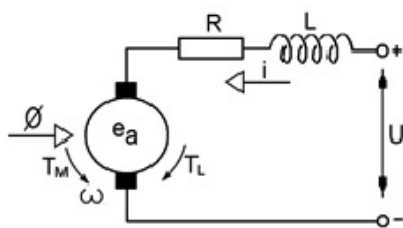
\* Prof. Emeritus, Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék

## 2. EGYENÁRAMÚ MOTOR

### 2.1. Működés átmeneti (tranzien) üzemállapotban

Az egyenáramú motor működését kezdetben külön a mágneses tér és külön a tekercsekből alkotott villamos áramkör számításával vizsgálták. Ma azonban a tekercselést a villamos ellenállással és induktivitással vesszük figyelembe, az állandó mágnesek által létrehozott mágneses teret ( $\Phi$ ) pedig a forgórész (armatúra) kefékre merőleges irányában ábrázoljuk (1. ábra); a jelölések magyarázata a következő:

- R – az armatúra tekercselés ohmos ellenállása,
- L – az armatúra tekercselés induktivitása – H,
- $e_a$  – az armatúratekercselésben indukált feszültség,
- U – a kapocsfeszültség
- i – az armatúratekercselés áramfelvétele
- $\Phi$  – a mágneses fluxus póluspáronként – (Wb)
- $\omega$  – szögsebesség – (1/s)
- $T_M$  – a motor által kifejtett nyomaték (Nm)
- $T_L$  – a terhelés nyomatéka;
- J – a mechanikai tehetetlenségi nyomaték,
- K – a gépálladó, amely magába foglalja az armatúra hosszát és átmérőjét, valamint a tekercselés jellemzőit és a póluspárok számát, ezért géptípusonként eltérő.



1. ábra Állandó mágnesű egyenáramú kismotor kapcsolási rajza

A villamos/(elektromos) időállandó az armatúra tekercselés két jellemző adatának hányadosa:

$$T_e = \frac{L}{R}, \text{ amelynek értéke a szokásos géptípusokban 5}$$

és 80 ezredmásodperc (milliszekundum) közötti érték. A mechanikai tehetetlenségi (inercia) időállandó:

$$T_i = \frac{RJ}{(K\Phi)^2}, \text{ amelynek értéke a villamos időállandó}$$

többszöröse:  $T_i = (3..6) T_e$

Az átmeneti (tranzien) üzemállapotban az áramerősség és a szögsebesség egyaránt függ az időtől, ezért a következő egyenleteket írhatjuk fel:

$$u = e_a + iR + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Az indukált/generált feszültség az armatúratekercsben a mágneses fluxussal ( $\Phi$ ) – amely állandó mágnessel gyártott motor esetében állandó, vagyis idő független, -

továbbá az  $\omega$  szögsebességgel arányos és befolyásolja a K gépálladó is:

$$e_a = K\omega\Phi \quad (2)$$

A motor nyomatékát alapvetően az armatúratekercselés felvett áramerőssége szolgáltatja, és az ugyancsak arányos a mágneses fluxussal is:

$$T_M = K\Phi i \quad (3)$$

Az armatúrát a motor és a terhelés nyomatékának különbsége hajtja, ezért a mechanikai tehetetlenségi nyomaték és a szög-gyorsulás befolyásolja:

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

Az egyenletrendszer megoldásához érdemes áttérnünk az időtartományról a frekvenciatartományra a Laplace-transzformáció segítségével. Fenti egyenletrendszer a frekvencia-tartományban következőképpen alakul:

$$U(s) = E_a(s) + I(s)R + LsI(s) \quad (5)$$

Átrendezve:

$$U(s) - E_a(s) = \frac{1}{R + sL} I(s) \quad (6)$$

$$E_a(s) = K\Omega(s)\Phi(s) \quad (7)$$

$$T_M(s) = K\Phi(s)I(s) \quad (8)$$

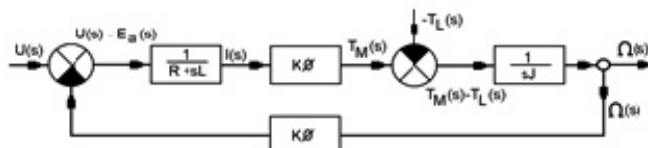
Mivel  $\Phi$  időben nem változik

$$T_M(s) - T_L(s) = Js\Omega(s) \quad (9)$$

Az új egyenletrendszer alapján felrajzolhatjuk a blokk-diagramot (2. ábra). Meghatározható a motor nyomatéka az (7) egyenlet, az  $I(s)$  és a  $K\Phi$  segítségével.

Felhasználható egy egyszerűsítés, amely gyakorlati tapasztalaton is alapul: a kapocsfeszültség nem időfüggő, tehát állandó.

Feltételezzük, hogy induláskor, vagyis az átmeneti állapot kezdetén a terhelő nyomaték  $T_L = 0$ , vagyis a motor üres járásban, terhelés nélkül indul. Ekkor még nincs nyomaték különbség, tehát a különbségképző szerv eltűnik.



2. ábra Egyenáramú kismotor blokk diagramja

A feszültségre vonatkoztatott átviteli (transzfer) függvény  $Y_u$  a kimeneti és a bemeneti jelek hányadosa:

$$Y_u = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{R+sL} K\Phi \frac{1}{sJ}}{1 + \frac{1}{R+sL} K\Phi \frac{1}{sJ} K\Phi} \quad (10)$$

Az áramerősség a frekvenciatartományban az (5) egyenletből:

$$Y(s) = \frac{U(s) - E_a(s)}{R + sL} = \frac{U(s) - K(s)\Phi}{R + sL} \quad (11)$$

Az armatúra áramerősségre vonatkoztatott átviteli függvény bevezetve a villamos és mechanikai időállandókat:

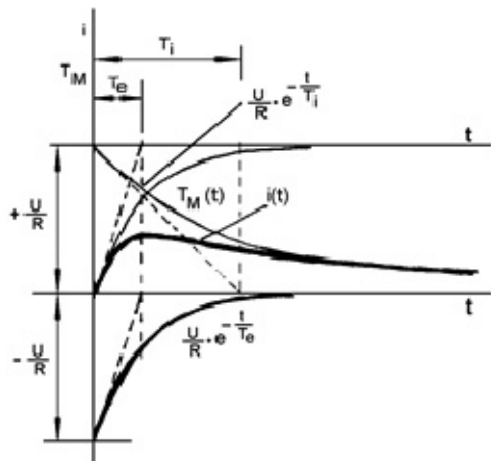
$$Y_{iu} = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{U(s) - K\Omega(s)\Phi}{R + sL}}{U(s)} = \frac{sT_i}{R(1 + sT_i)(1 + sT_e)} \quad (12)$$

Az armatúra tekercselés tranziens árama felírható:

$$i = \frac{U}{R} \left( e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{-\frac{t}{T_e}} \right) \quad (13)$$

A motor által kifejtett nyomaték (8) egyenlet felhasználásával:

$$T_M = \frac{U}{R} K\Phi \left( e^{-\frac{t}{T_i}} - e^{-\frac{t}{T_e}} \right) \quad (14)$$



3. ábra Armatúra-áramerősség és motor nyomaték az időtartományban

Mind az áramerősség, mind a motor nyomaték az időtartományban ábrázolható a (13) és (14) egyenletek ismeretében (3. ábra).

## 2.2 Működés állandósult állapotban

Állandósult állapotban az egyenletek a következőképpen alakulnak:

$$U = E_a + IR \quad (15)$$

$$E_a = K\omega\Phi \quad (16)$$

$$T_M = K\Phi I \quad (17)$$

$$T_M - T_L = 0 \text{ vagy átrendezve: } T_M = T_L = T \quad (18)$$

A szögsebesség-nyomaték jelleggörbét az (15) és (16) egyenletek rendezésével kapjuk meg:

$$\omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{R}{K^2\Phi^2} \cdot T_M \quad (19)$$

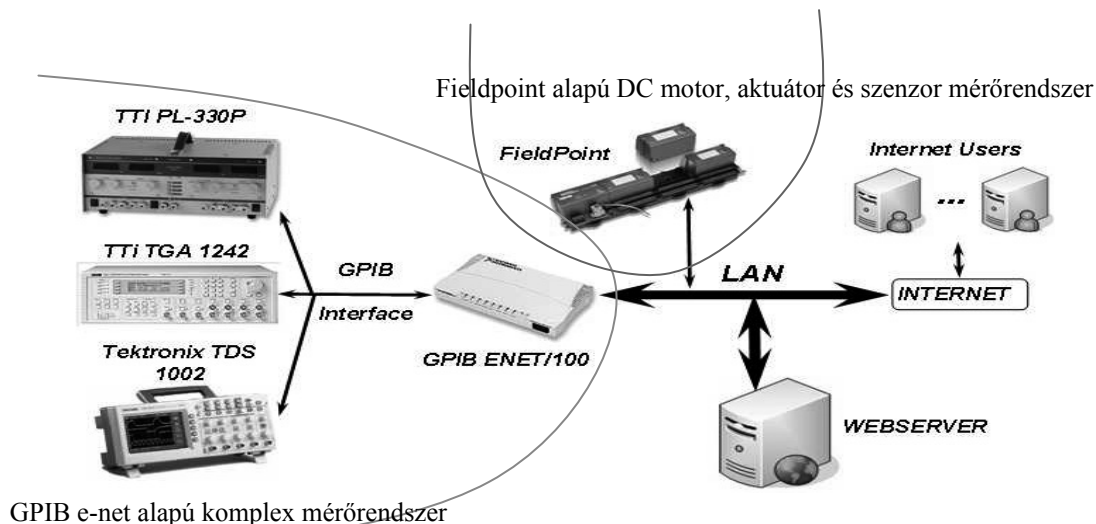
A szögsebesség – vagyis a motor fordulatszám-változtatására a leggyorsabb és gyakori megoldás a kapcsolófeszültség változtatása. Mivel fordulatszám-nyomaték jelleggörbe mind a négy sík negyeden áthalad, ezért az ilyen villamos hajtásokat négynegyedes (4/4) hajtásnak nevezzük.

## 3. KISMOTOR MŰKÖDÉSE ÉS MÉRÉSE A VILÁGHÁLÓN

Az Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszéken kifejlesztett virtuális laboratórium könnyű és ingyenes hozzáférést biztosít a használók (oktatók, kutatók, hallgatók) számára, akik rendelkeznek a használathoz megfelelő jogosítvánnyal.

Az új virtuális laboratórium a következő két alrendszerrel foglalja magába: lineáris távolságérzékelőt és motorterhelés szabályozó mérési rendszert integrálja a National Instruments FieldPoint berendezésével, valamint a komplex mérési rendszert az elektronikus áramkörök analizálásához, amely az IEEE-488 jelű szabványos protokollját használja. Emellett az általános célú interfész busz – az angol rövidítéssel GPIB – által szabályozott mérési rendszer alkotja a másik alrendszert (4. ábra). Az ábrán nyomon követhető a két alrendszer: LAN (Local Area Network) az Internet használókat az Internet Users jelzi, a világhálóra való csatlakozást a Webserver segíti elő.

A GPIB-enet alrendszer elemei: a programozható áramellátó (TTi-PL-330P), a programozható függvénygenerátor (TTi TGA 1242), amellyel különböző frekvenciájú és amplitúdójú és hullámalakú jelek generálhatók, a Tektronix TDS 1002 digitális tárolós oszcilloszkóp. A GPIB ENET 100 berendezés felelős a GPIB egység összekapcsolásáért és az internetes csatlakozásért.

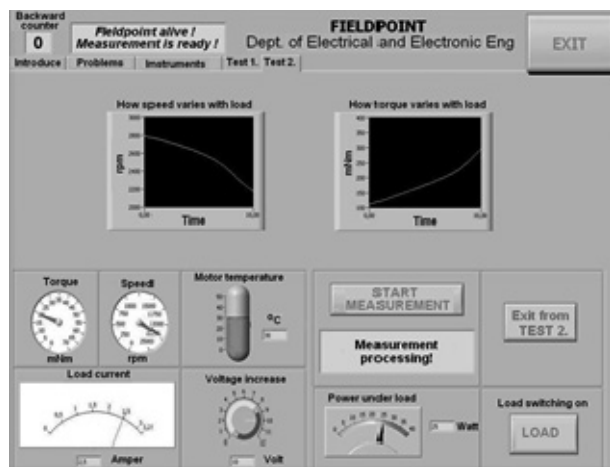


4. ábra Egy új virtuális laboratórium struktúrája

A kismotor terhelését egy, vele közvetlen tengelykapcsolatban álló egyenáramú generátor szolgáltatja. Szabályozható paraméterek a tápláló feszültség hullámalakja és paraméterei, valamint a terhelés. A mérhető paraméterek: a tápláló feszültség, az armatúra-áramerősség, a szögsebesség, ill. fordulatszám és a motor hőmérséklete. Számítható paraméterek: a teljesítmény és a nyomaték.

A középső két ablak a kismotor két jelleggörbéjét mutatja be. A baloldali: hogyan változik a sebesség a terheléssel (How speed varies with load) az időtartományban – ez hasonló a 3. ábrán bemutatott jelleggörbéhez, de az egyenestől az eltérést főleg a mágneses tér nem-linearitása okozza. A másik ablakban ugyancsak az időtartományban láthatjuk a nyomaték változását (How torque varies with load, mNm) ami az átmeneti üzemállapotra is jellemző lehet.

Az új laboratórium természetesen összetettebb feladatok elvégzésére is lehetőséget nyújt: ellenőrizhető a rendszer bármekkora távolságból is van a felhasználó, esetleges hibát is kereshet a rendszerben, sőt leírást is talál a követendő lépésekről, ha nem világos előtte a megoldandó feladat.



5. ábra Felhasználói interfész (interface) egyenáramú kismotor méréséhez

A 5. ábra az egyenáramú kismotor mérését mutatja az internet közvetítésével. Alul baloldalon az áramerősség mérése, mellette a feszültség változtatása, a mérés folyamatban van (measurement processing), a terhelés is mérhető (power under load), leolvashatjuk a teljesítményt (Watt) és azt is, hogy a terhelés be van kapcsolva (Load switching on). Alulról felfelé a második sorban leolvashatjuk a nyomatékot (Torque), a szögsebességet (speed) és a motor melegezésére jellemző hőmérsékletet is (Motor temperature).

#### 4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

#### 5. IRODALOM

- [1] SZENTIRMAI, L. VÁRADI, Sz. A. and SZARKA, T.: Internet at the Service of Electrical Machinery and Drives. Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) Invited Paper. (Meghívott előadás és publikáció.) Istanbul, Turkey, September 2011.
- [2] IEEE LTSC, Final 1484.12.1 LOM Draft Standard Document, IEEE 1484.12.1-2002.
- [3] FieldPoint User Manual (2002), National Instruments, USA.

# OPTIKAI TÁVOLSÁGMÉRÉS LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

## ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF THE OPTICAL DISTANCE MEASURING

*Bodolai Tamás\**

### ABSTRACT

*Aim of the research work presented in this paper is determination of application possibilities and reliability of line scan cameras for motion and acceleration measurement. The question is what conditions have to be fulfilled to replace laser distance sensors by line scan camera for contactless vibration measurement, and how the range of the vibration frequency can be increased by the new method.*

### 1. BEVEZETÉS

A line scan kamera egy olyan speciális digitális kamera, amelynek szenzorjában az érzékelő pixelek egy sorban helyezkednek el. Ezeket a kamerákat az ipar számára, olyan területekhez fejlesztették ki, ahol a termékek valamilyen továbbító rendszeren folyamatosan mozgásban vannak. Ilyen kamerával megoldható, hogy a termékekről azok megállítása nélkül készítsünk nagyfelbontású képeket.

Az elsődleges ok, ami miatt felmerülhet, hogy ilyen kamerákat méréshez használják, az a magas sorsfrekvenciájuk. A fenti példára utalva, napjainkban egy csúcskategóriájú lézeres távolságmérő, amit rezgésméréshez használhatunk, maximum 20 kHz-es működési frekvenciával dolgozik. Ugyanakkor, line scan típusú kamerából általánosan elérhető a 80000 sorsfrekvenciájú, amely egy mérés során 80 kHz-es mintavételezési frekvenciának felel meg. Azokra az esetekre, amikor érintésmentes mérésre van szükség, de a lézeres távolságmérők kínálta működési frekvencia nem elegendő, jelenleg a méréstechnikának nincs megoldása. Úgy gondolom, hogy ilyen esetekben a line scan kamerák használata jó eredményt hozhat.

### 2. LEHETSÉGES MÉRÉSI ELVEK

A line scan kamera egy felvétele (frame) mindössze egy vonalból áll. Működését leginkább egy szkennerekhez hasonlítva lehet elképzelni. Éppen ezért a felületet, illetve mintát, amelyet a kamera lát, célszerű egyenes vonalakkól, fekete-fehér sávokból felépíteni. Itt jegyzem meg, hogy a mért tárgy felületére ragasztott minta ellenére, az alábbiakban ismertetett mérési módokat érintésmentesnek tekintem.

Egy, a kamera optikai tengelyén mozgó, arra merőleges felület mozgásának mérésére több lehetőség is van.

Az első kézenfekvő megoldás, hogy a kamera képén a fekete-fehér sávok pozíciója változzon, a felület mozgásának hatására.

A másik lehetőség már egy kicsit összetettebb. A fényképészetben sokszor problémát okoz, elsősorban makro-, illetve mikrofelvételek készítésekor a mélységélesség, azaz egy kontrasztos átmenet – esetünkben fekete-fehér átmenet – homályosan jelenik meg a képen. A fényképészetben ez a jelenség hibának fogható fel, eltekintve a művészi alkalmazástól. Azonban megfelelően felhasználva kiválóan alkalmazható távolság- és rezgésmérésre.

A harmadik elv, amelyet felhasználhatunk, a perspektivikus torzítás. Ennek a hatása leginkább akkor szembetűnő, amikor egy magas építményt akar az ember lefotózni közelről. A képeken általában szembetűnő, hogy az építmény valóságban párhuzamos élei a képen összetartanak.

A továbbiakban a teljesség igénye nélkül bemutatok néhány, a gyakorlatban is használható mérési módszert. A fenti elvek egymást kiegészítve is felhasználhatók.

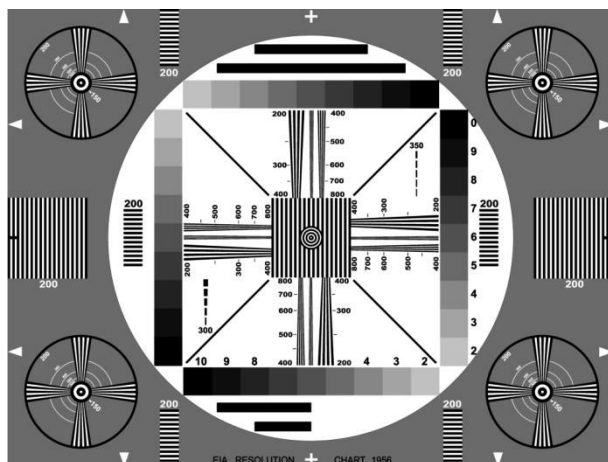
---

\*egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai –  
Elektronikai Tanszék

### 3. MÉRÉSI MÓDSZEREK

#### 3.1. Felbontásmérés alapján

A televíziók, monitorok, projektorok felbontását különböző tesztképek segítségével lehet mérni és beállítani. Egy ilyen tesztábra látható a következő képen.(1. ábra)



1. ábra EIA 1956 Resolution Chart<sup>[1]</sup>

Egy ilyen kép lényege, hogy különböző sűrűséggel összetartó vonalak helyezkednek el rajta. Ennek segítségével a felbontás úgy mérhető, hogy az összetartó vonalak mentén megkeresik azt a pontot, ahol még el lehet különíteni két egymás mellett lévő vonalat. A vonalak melletti skáláról olvasható le a felbontás értéke.

Ezt az elvet át lehet ültetni a kamerás távolságmérésbe is. A mérendő tárgy felületére elhelyezhetünk egy olyan mintát, amelyen különböző sűrűségű vonalak vannak párhuzamosan. Amikor a felület a kamera előtt pontosan az éles síkban helyezkedik el, akkor több vonalat lehet megkülönböztetni, mint amikor a felület elmozdul valamelyik irányba. Ekkor ugyanis a sűrűn elhelyezkedő vonalak az élesség csökkenésnek köszönhetően már nem lesznek megkülönböztethetők. Ezt az elvet illusztrálja a 2. ábra..



2. ábra Különböző sűrűségű vonalak

A módszernek több hátrány is van. Az első az előző sorokból hallgatólágoosan kiderült. Homályos képet kapok akkor is, ha az éles síktól a kamera felé, és akkor is, ha ellentétesen mozdul el a felület. Ezt a problémát ki

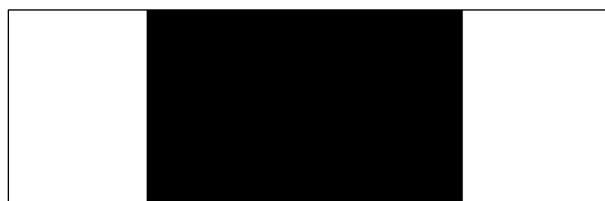
lehet küszöbölni, ugyanis ahhoz, hogy egy kamerát ezzel az elvvel lehessen használni, a tárgytávolságot nem lehet nagyra választani, azaz közelfényképezésről beszélünk, amelynek természetes velejárója a kép nagyobbodása a tárgy közeledésével, és kisebbedése annak távolodásával. Tehát a módszert kombinálva két vonal távolságának mérésével, amelyek a minta szélén, jól elkülöníthetően vannak elhelyezve, ez a probléma orvosolható. A nagyobbik gond az, hogy ilyen módszerrel a mérés felbontása erősen korlátos. Példának okáért egy 6144 pixellel rendelkező szenzor esetén a mérési tartományt hozzávetőlegesen 20-50 tartományra lehetne osztani, amely a mai viszonylatokban már elfogadhatatlan.

#### 3.2. Életlenség mérése alapján

Hasonlóan az előző módszerhez a kép-, tárgytávolság, objektív fókusztávolsága, rekesznyílása úgy van megválasztva, hogy a kívánt méréstartományon belül a mérendő felületre ragasztott minta az éles síktól előre és hátra erősen homályosodjon.

Azt, hogy egy valóságban kontrasztos átmenet a felvételen mennyire lesz életlen, a szóródási kör határozza meg. Ha egy fényképezőgép éles síkjában elhelyezünk egy fehér lapot, amelyen egy fekete pont van, akkor a felvételen is egy pontot fogunk látni. Azonban, ha az éles sík előtt vagy mögött helyezzük el, akkor a felvételen már egy nem kontrasztos szélű folt fog megjelenni, amely annál nagyobb, minél messzebb van az éles síktól.

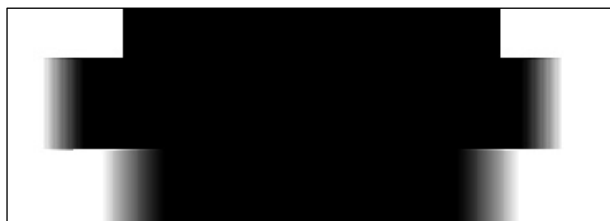
A mintát ennél a módszernél úgy kell kialakítani, hogy a kamera látóterében csupán két darab átmenet legyen, ami praktikusán egy széles vonallal oldható meg (3. ábra).



3. ábra Egy vonalból álló minta

A line scan kamera a fenti képből természetesen csak egy sort lát, és azt is csak akkor ilyen élesen, ha a felület éppen az éles síkban helyezkedik el. Amennyiben viszont elmozdul onnan, a kontrasztos átmenet homályossá válik. Az életlenség mértékét megfelelő matematikai algoritmussal meg lehet határozni, amelyből ezután az optikai paraméterek felhasználásával meghatározható a felület elmozdulása. Azt, hogy a felület a kamera felé vagy ellenében mozdult el, a két átmenet távolságának mérésével lehet megállapítani. A kamera felé elmozduló felület esetén

az átmenetek távolodnak egymástól. A 4. ábra az elv egy szimulált eredményét mutatja. Fentről lefelé: éles sík, kamerához közelebbi, távolabbi felület.



4. ábra Éles, közelebbi, távolabbi felület

A módszer előnye, hogy a fentebb már példaként említett, csupán 6144 pixeles kamerával is igen jó felbontású mérést lehet elérni, ami persze erősen függ a felhasznált algoritmus teljesítményétől is. Ezen felül a mérés eredményét nem befolyásolja, ha az optikai tengelyre merőleges síkon mozdul el a mérendő felület, feltételezve, hogy a használt minta a kamera látóterében marad.

A módszernek hátránya is van. Ha szeretnénk kihasználni az ilyen kamerák által biztosított magas mintavételi frekvenciát, akkor olyan megoldásban kell gondolkodnunk, amely egy hardveres előfeldolgozóval képes a kamera által szolgáltatott hatalmas adatmennyiséget olyan mértékűre redukálni, hogy az egy folyamatos mérés esetén is lementhető legyen. Ezt célszerű FPGA-val (Field-programmable gate array) megoldani. Ennél a módszernél ezalatt azt kell érteni, hogy valamilyen hardveres előfeldolgozónak kell meghatározni az élettenségek mértékét és a két átmenet távolságát. Ez önmagában nem okozna gondot, viszont a kamerák nagy adattovábbítási frekvenciájának köszönhetően az FPGA-ban alkalmazható lépések száma (egy soros ágba) erősen korlátozott. Ily módon kétséges, hogy megvalósítható-e a megfelelő eredményt szolgáltatató algoritmus.

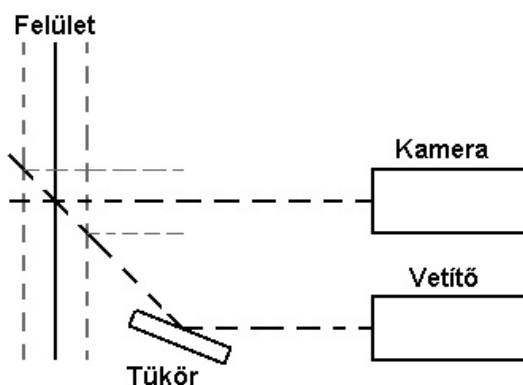
### 3.3. Vetítéses módszer

Amikor line scan kamerák alkalmazásában gondolkodunk, nem szabad megfeledkeznünk egy nagyon fontos dologról. Ez a megvilágítás erőssége. Ha egy átlagos digitális fényképezőgéppel szeretnénk például a családról képet készíteni, akkor a gép ISO 100-as fényérzékenység mellett beltéren hozzávetőlegesen 1/20 másodperces záridővel, kültéren 1/1000 másodperces záridővel dolgozna. Utóbbi azt jelentené a mérésünkben, hogy másodpercenként 1000 felvételt tud készíteni a kamera. A line scan kamerák pixelmérete általában kisebb a szokványos digitális fényképezőgépekben használatostól, ami azt jelenti, hogy ugyanolyan körülmények között több fényre van szüksége az azonos minőségű felvétel elkészítéséhez. A

cél persze a másodpercenkénti 80000 sor, ezért a felületet első közelítésben 80-szor erősebben kell megvilágítani a kinti fényképezéshez viszonyítva. Összességében elmondható, hogy amennyiben mérésre akarunk használni egy ilyen kamerát, feltétlenül gondoskodnunk kell erős, fókuszált megvilágításról, amit célszerűen vetítógéppel oldhatunk meg.

A mérési módszer lényege, ha már mindenképp szükségünk van egy reflektorra, vetítógépre, akkor nincs akadálya, hogy a mérendő felületre vetítsünk valamilyen mintát. A mérési elv a következő.

A vetítógéppel egy kontrasztos vonalat vetítünk a mérni kívánt felületre. Azonban a vetítés iránya a felület normálisával egy viszonylag nagy szöget zár be egy tükör segítségével, ahogy az a következő ábrán is szemléltetve van (az ábrán a szög  $45^\circ$ ). A kamera a felvételeket a vetített vonalat keresztezve készíti. Amikor a felület közeledik vagy távolodik a kamerától, a vetítési szögnek köszönhetően a vonal pozíciója a kamera felvételén meg fog változni. Az 5. ábrán a távolabbi, és közelebbi felületen elhelyezkedő vonal pozícióját szaggatott vonallal jeleztem.



5. ábra Vetítéses mérési elv

A mérési elv viszonylag egyszerű, azonban a kivitelezésénél néhány fontos szempontot figyelembe kell vennünk.

Az első lényeges pont, hogy a vetítőberendezést, a kamerát, a tükröt mereven egybe kell építeni, ugyanis csak így biztosítható, hogy álló felület esetén a vonal ne mozogjon. Talán ez a legkritikusabb pontja a módszernek. A merev összeépítés a kamera és a vetítő esetén nem okoz gondot, mert azok elhelyezkedhetnek közvetlenül egymás mellett is, de a tükör már problémát okozhat. A tükröt a kellő vetítési szög elérése érdekében a felülethez viszonylag közel kell elhelyezni, viszont a vetítőt és a kamerát az élettenség elkerülése végett a felülettől távolabb. Az élettenség egy bizonyos pontig nem okoz gondot, amennyiben egy vastagabb vonalat vetítünk a felületre. Éppen ezért egy ilyen rendszer tervezésénél mind a vetítő, mind a kamera esetén

figyelembe kell venni a mélységelesség közeli ( $t_k$ ) és távoli( $t_t$ ) határait, amelyek a tárgy távolságtól ( $t$ ), fókusz távolságtól ( $f$ ), a rekeszértéktől ( $R$ ) és a szóródási körtől ( $z$ ) függenek. <sup>[2]</sup>

$$t_k = \frac{t \cdot f^2}{f^2 + R(t-f) \cdot z} \quad (1)$$

$$t_t = \frac{t \cdot f^2}{f^2 - R(t-f) \cdot z} \quad (2)$$

Az összefüggésekből és a mérési elvből is jól látszik, hogy a mérési módszer azokban az esetekben alkalmazható igazán, amikor a felület elmozdulása néhány milliméter, esetleg centiméter. Ebben az esetben ugyanis a kamerát és a vetítőt nem szükséges a felülettől nagyon messze tenni, ugyanakkor alkalmazhatunk kellően nagy vetítési szöget is.

Bizonyos esetekben a módszer nagy előnyének tekinthető, hogy nem szükséges a mérendő felületre mintát ragasztani, bár megjegyzem, hogy a megfelelő eredmény érdekében célszerű, ha a felület matt és fehér.

Nagy előnye a berendezésnek, hogy a hardveres előfeldolgozóknak csak a fekete-fehér átmeneteket kell detektálnia és azok pozícióját átlagolni, amely manapság már egy FPGA-val problémamentesen megoldható.

Végiggondolva a mérés elvét az is szembe tűnő, hogy a felvételen a vonal pozíciójának megváltozása egyenesen arányos a felület elmozdulásával (nagy tárgy távolság esetén). Azt, hogy a felvételen egy pixel elmozdulásnak a felület milyen mérvű elmozdulása felel meg, elsősorban a vetítés szöge határozza meg. Ezen felül az alkalmazott objektív nagyítása is fontos tényező. Minél nagyobb a nagyítás és minél nagyobb a vetítés szöge az optikai tengelyre nézve, annál nagyobb lesz a felvételen az elmozdulás.

Ahogy az előző mérési elvnel sem, itt sem okoz gondot, ha felület az optikai tengelyre merőleges síkon mozog. Sőt az sem feltétlenül gond, ha a felület nem teljesen egyenes, esetleg dőlt. A rendszer ezekben az esetekben is az optikai tengelyen történő elmozdulást fogja mérni.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatási témám keretében arra keresem a választ, hogy a nagy sávszélességű line scan kamerák milyen módon, milyen esetekben használhatóak elmozdulás- és elsősorban rezgésmérés céljára.

Az utoljára bemutatott mérési elv egyaránt használható távolság- és rezgésmérésre, ugyanis a berendezés elemeinek és paramétereinek megfelelő megválasztásával lényegében bármilyen tartomány lefedésére alkalmassá tehető ésszerű határok között.

A homályosodás elvére ezt már nem lehet elmondani, ugyanis az élettenség elsősorban az objektív leképezési arányától (nagyítás) és a tárgy távolságtól függ. Nagymértékű homályosodást kis fókusz távolságú objektívvel, kis tárgy távolsággal érhetünk el. Ez természetesen nem okoz problémát, ha valaki, mint én is, kis amplitúdójú rezgéseket szeretne mérni ezzel a módszerrel. Itt a komoly problémát a hardveresen megoldandó előfeldolgozó algoritmus jelenti.

A legelső elv az alacsony felbontóképesség miatt semmilyen mérés esetén nem jöhet szóba.

Összességében azt mondhatom, hogy a vetítési elv univerzálisabban használható, kivitelezhető berendezést eredményezhet, azonban ha valaki kis amplitúdójú mozgásokat akar mérni nagy sebességgel, akkor a homályosodás elve egy jóval pontosabb, kisebb, kompaktabb érzékelőt eredményezne.

#### 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

#### 6. IRODALOM

- [1] JOHN M. EVANS LLC, Standards for Visual Acuity, 2006
- [2] SÁRKÓZI Z., DR. SEVCSIK J., KÚN M., Fotósok könyve, 1977

# FÁZISZÁRT HUROK ALKALMAZÁSA VILLAMOSHÁLÓZATI MÉRÉSADATGYŰJTŐ RENDSZEREKBE

## UTILIZATION OF PHASE-LOCKED LOOP CIRCUITS IN ELECTRICAL NETWORK DIAGNOSTIC SYSTEMS

*Kazup László\*, Marcsák Gábor Zoltán\*\**

### ABSTRACT

*A villamos hálózat vizsgálatának egyik eleme az úgynevezett gyors Fourier-analízis (FFT), mely során követelmény, hogy a regisztrátum a vizsgált jel egy vagy több teljes periódusát tartalmazza. Ellenkező esetben a kapott amplitúdó-frekvencia spektrum úgynevezett „sátras” jellegű lesz, azaz nem létező oldalharmonikusokat fog tartalmazni. Ezen jelenség elkerülése érdekében olyan mérési módszert kell alkalmazni, amely biztosítja, hogy a mintavételi frekvencia a mérendő jel frekvenciájának egész számú többszöröse legyen akkor is, ha a mérendő jel frekvenciája a mérés közben változik.*

### 1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai – Elektronikai tanszékén jelenleg is folynak elektronikai és szoftveres fejlesztő munkák a mind szigorúbb szabványügyi előírásoknak megfelelően.

A legújabb villamosenergia-minőség vizsgálatokra vonatkozó szabvány előírja a rendszer hálózati frekvenciához történő szinkronizálását a használni kívánt számítógépes mérésadatgyűjtő-digitalizáló berendezések esetén. Tanszékünkön az ezzel kapcsolatos hardveres és szoftveres fejlesztések két fő irányvonalon folynak.

A mintaszám szinkronizációs módszernél igyekszünk annyi mintát alapul venni, hogy az FFT analízis során egész számú periódusokat kapjunk. Előnye, hogy nem igényel külső hardvert, hátránya viszont, hogy viszonylag nagy (~10 kHz feletti) mintavételi frekvencia esetén működik megfelelő pontossággal, valamint szoftveresen kell megoldani az átlapolások problémáját<sup>[1]</sup>.

\* villamosmérnök, mechatronikai mérnök MSc hallgató

\*\* mérnök informatikus BSc hallgató

### 2. MINTAVÉTELI FREKVENCIA SZINKRONIZÁLÁSA PLL ÁRAMKÖRREL

A mintavételezés során egy PLL (Phase-locked loop) áramkör közreműködésével a mintavételi frekvenciát folyamatosan úgy szabályozzuk, hogy az mindig egész számú többszöröse legyen a hálózati frekvenciának, így a mintavételezett jel minden egyes periódusa azonos, egész számú mintából áll.

A mintavételi frekvencia forrása ez esetben a PLL áramkörrel együttműködő külső, feszültségvezérelt oszcillátor (VCO), melynek kimenete a mérésadatgyűjtő kártya digitális trigger bemenetére (PFI\*) csatlakozik.

Hátránya ennek a megoldásnak, hogy mivel a hálózati frekvencia kis mértékben ingadozik, emiatt a jel időtartománybeli vizsgálata körülményesebb, mivel két minta között eltelt idő nem állandó.

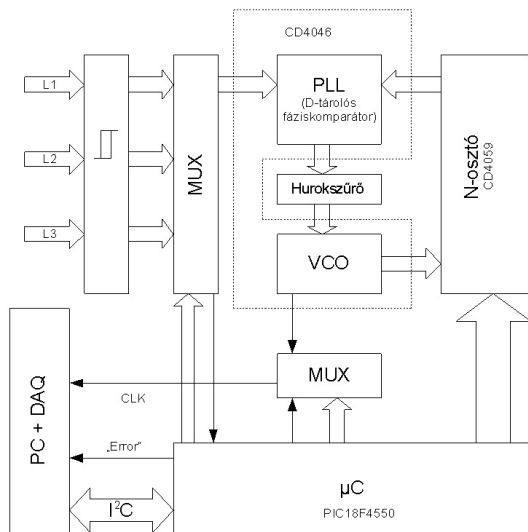
#### 2.1. A szinkronizáló áramkör

Munkánk első lépése a szinkronizációt megvalósító elektronikus áramkör tervezése, illetve kivitelezése volt. A szükséges alacsony (~50 Hz) működési frekvencia miatt több, a kereskedelemben kapható eszköz és PLL céláramkör erre a feladatra alkalmatlannak bizonyult, mivel azok működési frekvenciája általában a néhányszor 10 kHz-es tartományba esik. A tervezés során azonban egyéb műszaki és funkcionális követelményt is szem előtt kellett tartanunk.

Az áramkör alapja a CD4046 PLL integrált áramkör, mely kétféle fáziskomparátort, illetve egy feszültségvezérelt oszcillátort tartalmaz. A berendezés bemenetén a mérő-átalakítókról leágaztatott feszültségjeleket (melyek a hálózati fázisfeszültségek leosztott megfelelői) egy trigger áramkör fogadja négyszögösítve, TTL jelszintre illesztve. Ezek közül a mikrokontroller által vezérelt multiplexer választ ki egyet, mely a fáziskomparátor úgynevezett referencia-bemenetére kerül. A komparátor másik bemenetére a VCO „N”-el leosztott frekvenciájú kimeneti jele kerül,

amely osztást a CD4059 típusú programozható N-osztó végzi.

A fáziskomparátor kimenete a hurokszűrőn keresztül úgy vezérli a VCO-t, hogy annak frekvenciája mindig N-szerese a referencia frekvenciának (hálózati frekvenciának), kezdőfázisuk pedig megegyezik. Látható, hogy az N-osztó osztásaránya, melyet a mikrokontroller állít be, tulajdonképpen egy szorzótényező, ami azt adja meg, hogy hányszorosa legyen a mintavételi frekvencia a hálózati frekvenciának. Ezáltal teljesül az a fent megfogalmazott kitétel, miszerint a mintavételi frekvencia egész számú többszöröse legyen a hálózati frekvenciának. Ez a kimeneti (mintavételi) frekvencia így 50Hz-es lépésekben változtatható a megfelelő, I2C buszon kiadott utasítással.



1. ábra A PLL áramkör blokkvázlata

A korszerű mikrokontroller alkalmazása révén lehetőségünk nyílt további, felügyeleti és biztonsági funkciók megvalósítására is, amelyek tovább növelik a rendszer megbízhatóságát. Ezek közül az egyik a feszültségkiesés figyelése, korrigálása. Ugyanis ritkán, de előfordulhat, hogy az egyik fázisfeszültség kiesik, és ha a szinkronizáció éppen arra a feszültségjelre történik, annak hiánya esetén a fáziskomparátor leáll, VCO kimeneti frekvenciáját 0-ra csökkentve, így megszűnik a mérésadatgyűjtő rendszer mintavételi frekvenciája is.

A szoftveres átkapcsolás belső órajelre körülményes, ezért a mikrokontroller folyamatosan figyeli az aktuális szinkronizáló jelet, és ha az megszűnik, a MUX segítségével a soron következőt kapcsolja a PLL bemenetére. Amennyiben úgy érzékeli, hogy mindhárom jel kiesett, maga állítja elő az 50 Hz-hez számított mintavételi frekvenciát. Ezzel minimalizálható a mintavesztés, azonban az átkapcsolások ideje alatt a mintavételi frekvencia erősen ingadozik. Ennek a bizonytalanságnak az időtartama maximum 75 ms.

A mikrokontroller minden ilyen esetben üzenetet küld a PC-nek az I2C adatbuszon, mely tartalmazza a hiba okát és az aktuális állapotokat, ezáltal részletes naplózásra van lehetőség. Továbbá minden konfigurálás alkalmával egy belső EEPROM memóriába tárolja az aktuális beállításokat, és egy esetleges áramkimaradás után ezekkel az értékekkel indul újra a mérés, így nem szükséges minden alkalommal újrakonfigurálni a mérőberendezést.

## 2.2. A hálózati feszültség torzításának hatásai

A kapcsolat bemenetén lévő komparátorok a szinkronizálás során használt négyszög-feszültséget a hálózati szinuszosan váltakozó feszültség nullátmeneteire triggerelik. Ideális esetben csak a hálózati frekvencia változik, és a nullátmenetek időbeli bekövetkezése követi ennek a frekvenciának a változását.

Azonban, ha az adott villamos hálózaton problémák vannak, ill. túlsúlyban vannak a villamos motoros hajtások (ti. frekvenciaváltók, ill. fázishasítás elvén működő szabályzók), a fázisfeszültségek teljes harmonikus torzítása jelentős, akár 10% körüli is lehet, ráadásul értéke és a spektrum összetétele is folyamatosan változhat [2].

Jelentős a 3. és az 5. harmonikusok által okozott torzítás. Ez azt eredményezheti, hogy a hálózati frekvencia változatlanlansága mellett is elmozdulnak a nullátmenetek, mely jelenség mint változó hálózati frekvencia fog megjelenni a PLL bemenetén. Ennek hatására a kimeneti frekvencia is ingadozni kezd, minek következtében a szinkronizáció ellenére is kialakulhat sátras spektrumkép, mivel valójában nem annyit és úgy változik a hálózati frekvencia, mint azt a PLL a felharmonikusok miatt látja.

A jelenség kiküszöbölése megfelelő meredekségű aluláteresztő szűrővel lehetséges, mely kiszűri a nem kívánt felharmonikusokat, és így a nullátmenet-komparátor bemenetére tisztán az alapharmonikus reprezentáló szinuszos feszültség kerül. Egy ilyen szűrő alkalmazása azonban további problémákat vet fel. Állandó, illetve lassú ütemben, kis mértékben változó bemeneti amplitúdó esetén megfelelően működik az szinkronizáció.

Azonban hirtelen, nagy mértékű feszültségletörés vagy ugrás esetén (amely viszonylag gyakori jelenség a villamos hálózaton) a szűrő kimenete késéssel követi a bemeneti jel változását szintén nullátmenet-elcsúszást okozva, mely az előbbi gondolatmenet alapján bizonytalan mintavételi frekvenciát és sátras frekvenciaspektrumot okoz. Azonban belátható, hogy ez a bizonytalanság csak a feszültségletörések/-ugrások tartományára korlátozódik, azonban ha ezen jelenségek pontos frekvenciatartománybeli vizsgálata szükséges, ez a módszer sem ad kielégítő megoldást.

### 3. A PLL SZINKRONIZÁCIÓT TÁMOGATÓ MÉRÉSADATGYŰJTŐ SZOFTVER

A professzionális mérésadatgyűjtő szoftverekkel szembeni alapvető elvárás, hogy a hosszú, akár több héten át tartó mérések alatt is folyamatosan megbízhatóan működjenek. Ebből kifolyólag az elkészült berendezéshez a National Instruments LabWindows/CVI fejlesztőkörnyezetében, valamint NI PXI 8110 hardverkörnyezetben készítettünk el a PLL szinkronizációt támogató szoftver kísérleti verzióját, melynek tesztelése és rendszerbe integrálása jelenleg is tart.

#### 3.1. Az adatgyűjtésért felelős komponens

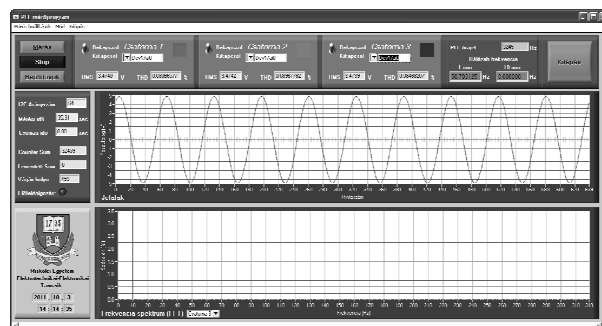
A program ezen részével szembeni legfontosabb követelmény a precíz és hibamentes működés. A mintavételezést az alapvető mérési paraméterek (mintaszám, frekvencia, órajel forrás, méréshatár) megadása után lehet elkezdni. A program különlegessége lényegében az, hogy a mintavételi frekvenciát nem a mérőkártya beépített órajel generátora szolgáltatja, hanem egy külső órajel bemeneten keresztül a PLL áramkör. A működés mechanizmusa egy egyszerű példával szemléltethető a legjobban.

A mérési szabvány szerint a mért jel paramétereit 10 periódusonként kell meghatározni, ebből adódik, hogy 50 Hz-es hálózati frekvencia valamint 3200 Hz-es mintavételi frekvencia esetén 640 darab mintát kell alapul venni a frekvenciatartománybeli vizsgálathoz. A PLL áramkör a mindenkor hálózati frekvencia egész számú többszörösének megfelelő órajel-frekvenciát biztosít a mérésadatgyűjtő kártya számára.

Mint az a fentiekből is látható, PLL szinkronizált mintavételezés esetén pontos és precíz vizsgálatok végzésére nyílik lehetőség a frekvencia-tartományban, azonban az időtartománybeli vizsgálat bonyolultabbá válik, ugyanis a mintaszámból következtetve már nem lehet egyértelműen megállapítani az egyes minták időbeli elhelyezkedését, mivel a hálózati frekvencia változásának hatására a mintaszám által reprezentált időintervallum is folyamatosan változik. Az általunk fejlesztett programban létrehozott megoldással sikerült áthidalni ezt a problémát.

A PLL órajel csatornája a mérőkártya külső órajel bemenete mellett annak egy digitális számláló (Counter) bemenetére is rá lett kötve, ezáltal folyamatosan mérni tudjuk a PLL által szolgáltatott órajel frekvenciáját (mely a PLL miatt a hálózati frekvencia függvénye), így meghatározható adott mintaszám által jelképezett időintervallum. A módszer használatához azonban egy pontos időalapra van szükség, melynek segítségével az órajel-impulzusok számát egy másodpercre nézve pontosan meg tudjuk határozni. A LabWindows/CVI erre is tartalmaz megoldást, mely az „Asynchronous

Timer”, magyarul aszinkron időzítő létrehozására szolgáló függvénykönyvtár. Ez az időzítő dedikált magas prioritású szálon fut, függetlenül a felhasználói interfésztől. Legnagyobb felbontása 1 ms, így megfelelő pontossággal beállítható az 1 másodperces időköz. Ezek eseményként futnak be, mely esemény által meghívott rutin a számláló értékéből így minden másodpercben meg tudja határozni a vett mintaszámot, közvetve pedig az aktuális hálózati frekvenciát.



2. ábra Az adatgyűjtésért felelős komponens

Az adatgyűjtés és mintavételezés menete megegyezik a legtöbb számítógépes mérésadatgyűjtő-rendszerrel használt módszerrel. A rendszer a DMA (közvetlen memória hozzáférés) vezérelt adatgyűjtést alkalmazza. A mintavételezést a CVI úgynevezett folyamatokban, taszkokban végzi. Ezekben állíthatjuk be a mérőkártya fizikai csatornáit. Mivel mi a kártya analóg és digitális bemeneteit is használjuk, ezért két független taszk használatára van szükség. Egyikben fut az analóg csatornák mintavételezése, a másik pedig a fent említett számláló algoritmus. A szoftver minden mérést egész percre szinkronizálva indít el. Mielőtt ez megtörténne, I2C buszon előzetesen elküldi a mérési paramétereket a mikrokontroller számára. Ezután a mintavételező és a Counter taszk egymással szinkronban fut külön-külön szálon. A szinkronizációt az aszinkron időzítő biztosítja.

A több napos mérések során keletkezett nagy mennyiségű adat feldolgozása, RMS, THD és egyéb paraméterek számítása a nagy mintaszám miatt meglehetősen időigényes feladat. A feldolgozási idők csökkentésére a program bizonyos származtatott mennyiségek számítását on-line módon, mérés közben végzi, tekintve, hogy az általunk használt NI PXI rendszer négymagos processzorral rendelkezik.

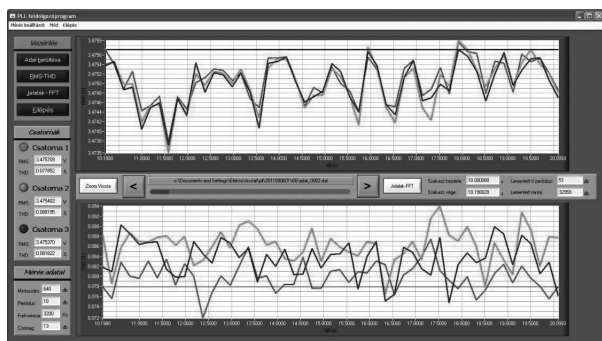
Hogy ezen számítások ne okozzanak problémát az időkritikus folyamatok szempontjából, egy saját, független szálon futnak. Ez a szál úgy kerül meghívásra, hogy a mintavételezést figyelve automatikusan elindul, ha van feldolgozható adatsomag. Biztonsági szempontokat szemmel tartva a mintavételező és feldolgozó szál soha sem használja egy időben ugyanazokat az adatokat, így elkerülhetőek a konkurens hozzáférésekből eredő programhibák. Jelenleg a mért

feszültség, ill. áramjelek THD, valamint RMS értékeinek on-line számítására képes a szoftver.

Az egyik legfontosabb feladat az adatok megfelelő struktúrában történő folyamatos, adatvesztés nélküli tárolása. A villamos mérésre vonatkozó szabvány szerint minden adatfájlnak egyenlő időintervallumot kell képviselnie, ajánlás szerint pontosan tíz percet. A programban ezt az időt másodperc alapon tetszőlegesen lehet szabályozni. Az aszinkron időzítő segítségével pontosan kiszámítható, hogy az adatfolyamban hol kell kezdődnie, illetve véget érnie egy adatfájlnak. Számolnunk kell az átlapolás jelenségével, azaz az utolsó tíz periódust az aktuális adatfájl végére csatoljuk, viszont az új adatfájlt pontosan ott szeretnénk elkezdni, ahol a jelzés befutott. Erre a vágási helyre a „Counter” értékből tudunk következtetni, melyből pontosan kiszámítható, hogy az adott adatfájlban mennyi mintának kell lennie. A program az egész mérés során lementi a másodpercekhez tartozó „Counter” értékeket is.

### 3.2. Az adatok elemzéséért felelős komponens

Az elemzést és megjelenítést végző programrész a villamoshálózat-analízis során szükséges néhány jellemzőt (frekvencia, teljes harmonikus torzítás, áram/feszültség effektív értéke) számítja ki és jeleníti meg grafikusan időtartományban, ill. lehetőség van a mintavett jelek frekvenciatartománybeli analízisére. A felhasznált módszerek nagy része megegyezik a méréstechnikában általánosan használtakkal, azonban a pontos időtartománybeli ábrázolásra a megszokottaktól eltérő módszer kidolgozása volt szükséges az időábrát jelentő fix mintavételi frekvencia hiánya miatt.



3. ábra Az adatok elemzéséért felelős komponens

Tekintve, hogy a tíz periódushoz tartozó mintaszám állandó, valamint a függetlenül futó számlálónak köszönhetően tisztában vagyunk a másodpercenkénti

mintaszámmal, ezért egy egyszerű algoritmussal következtethetünk tetszőleges adatsomag időtengelybeli helyére.

Ha változatlanul 640 mintával dolgozunk, és az első másodpercben 51 Hz volt a hálózati frekvencia, akkor a PLL 3264 Hz-es órajelet generált. Ebből kiszámítható, hogy az első tíz periódus 0-0,19608 s között volt. Ezt az algoritmust használva elfogadható pontossággal tudjuk ábrázolni az időtartományt. Elmondható tehát, hogy az adatok elemzése szempontjából nem jelent nagy gondot egy már kész programot PLL kompatibilissé alakítani.

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Mint az a fentiekből kiderül, a fáziszárt hurok alkalmazásának villamoshálózati mérésadatgyűjtő rendszerben van létjogosultsága és aktualitása. Természetesen egyaránt vannak előnyei és hátrányai. Hatalmas előny, hogy az FFT és egyéb műveletek nagyon pontosan végrehajthatóak a periódusra vetített állandó mintaszám miatt. Ráadásul ezt a PLL hardveresen biztosítja, a szoftver fejlesztésekor erre nem kell külön figyelmet fordítani. A módszer hátrányai közé sorolható, hogy az időtartomány és hálózati frekvencia kiszámításához nincsen segítségünk a változatlan mintavételi frekvencia, továbbá a hálózati feszültség torzításai, ill. letörési jelenségei is problémát jelentenek. Mivel azonban a szoftveres algoritmusoknak köszönhetően változó mintavételi frekvencia mellett is kielégítő pontossággal meghatározható a minták időbeli elhelyezkedése, megfelelő bemeneti jelkondicionáló eszközök alkalmazásával a rendszer széleskörűen felhasználható.

## 5. IRODALOM

- [1] BÁTORFI R., VÁRADINÉ SZ. A.: Development of New Measurement and Data Analyzing System Flexible Adaptable to Energy Quality Standard Changes. microCAD2008 International Scientific Conference, Miskolc, 2008. Section J, pp.13-19. ISBN978-963-661-821-6.
- [2] VÁRADINÉ SZ. A., BÁTORFI R.: Kis-és középállalatok villamos energia hálózatának vizsgálata, ENELKO2006 Nemzetközi Energetikai Konferencia, Kolozsvár, Románia, 2006. október 20-22. pp.149-154. ISSN 1842-45-46

# AZ ÜTKÖZÉS UTÁNI KÖLCSÖNHATÁSRA VONATKOZÓ (e,2e) KOINCIDENCIÁS MÉRÉSEINK RÖVID ÁTTEKINTÉSE

## A SHORT REVIEW OF OUR (e,2e) COINCIDENCE EXPERIMENTS FOR STUDYING THE POST-COLLISION INTERACTION

Paripás B.<sup>\*</sup>, Palásthy B.<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

*We present a short review of our (e,2e) measurements of electrons emitted after electron impact inner shell ionization of argon at different primary electron energies (350, 460 and 500 eV). Emitted LMM Auger electrons are detected in coincidence with the ionizing scattered electrons and the energy of the slow PCI inducer ejected electron is calculated from energy conservation. Particularly the effect of the very low energy (i.e. 0-5 eV) ejected electrons (strongly asymmetric energy sharing) is measured.*

### 1. Bevezetés

Az ütközés utáni kölcsönhatás alatt (post-collision interaction, PCI) a belső héj ionizáció során kibocsájtott (vagy szórt) elektronok és az ionállapot bomlása során kibocsájtott Auger- elektronok Coulomb-kölcsönhatásait értjük. Ezt a hatást – ami az Auger-elektronok csúcsalak torzulásában (beleértve az energia eltolódását is) mutatkozik meg – az elmúlt évtizedekben széles körben tanulmányozták. Egyszerű (nem koincidencia) Auger-mérésekben azonban a szórt és a kibocsájtott elektronokat nem detektálják. Ezekkel tehát a PCI effektust csak részben lehet tanulmányozni, mivel a PCI ezeknek az elektronoknak a sebességvektorától jelentősen függ.

A koincidencia technika az ütközési kinematika feltárásával lehetőséget ad részletesebb PCI vizsgálatok elvégzésére is. Elektronütközéses belső héj ionizáció után azonban három elektron van a végállapotban, közülük azonban csak kettő detektálható az (e,2e) módszerrel. Szerencsére a legtöbb esetben a harmadik (a nem detektált) elektron kinetikus energiáját az energia-

megmaradás törvényéből ki lehet számítani (mivel a nehéz target atom meglökődése elhanyagolható). A nem detektált elektron mozgásiránya azonban ismeretlen marad. Emiatt olyan méréseket célszerű végeznünk, amelyekben a PCI effektus alig függ ettől az iránytól. Ilyen az erősen aszimmetrikus energia eloszlás esete, ahol többletenergiát szinte teljesen a szórt elektron viszi el. A másik kilépő elektron (a kibocsájtott elektron) energiája így szükségképpen zérushoz közeli ( $< 4\text{eV}$  a tekintett esetekben). Ezek a nagyon lassú kibocsájtott elektronok a kialakult ion közelében vannak még annak Auger-bomlásakor is, jelentős PCI hatást okozva. (A PCI effektus akkor maximális, amikor a kibocsájtott elektron energiája a zérushoz tart.) A lassú elektronnak csak a sebesség nagysága fontos, más paraméterei a PCI-t érdemben nem befolyásolják.

A koincidencia mérések elkezdése előtt a PCI hatást egyszerű kísérletekben tanulmányoztuk ([1], [2]). A laboratóriumunkban néhány éve elindított koincidencia mérések lehetővé tették ezeknek a kutatásoknak a továbbfejlesztését is. Azóta a PCI hatást (e,2e) módszerrel vizsgáltuk argonon erősen aszimmetrikus energia-eloszlás esetén előbb 500 eV, később 350 eV primer energián ([3], [4]). Megállapítottuk, hogy zéró kibocsájtott energia környékén, ahol különösen erős PCI hatás várható, az Auger-spektrum nagyenergiás oldalán számos zavaró csúcs is megjelent. Ezek a szatellit vonalak részben rezonáns Auger-vonalak (követik a  $2p_{1/2} \rightarrow 3d$  és  $2p_{1/2} \rightarrow 4d$  belső-héj gerjesztéseket), részben gerjesztett külső héj ionállapotok ( $[3p^2]nl$ ) által okozott vonalak. Ezeknek a zavaró szatellit vonalaknak eliminálása nélkül a PCI tanulmányozása gyakorlatilag lehetetlen.

A rezonáns Auger-vonalakat egy külön kísérletben is tanulmányoztuk [5], ahol a szórt elektronok energiája a rezonáns Auger tartományba esett. 460 eV primer

<sup>\*</sup> egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Fizikai Tanszék

<sup>\*\*</sup> egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Fizikai Tanszék

energia környékén a  $[2p_{1/2}]3d$  és  $4d$  rezonáns Auger-vonalak mellett a normál, de erősen PCI torzított Auger-vonalak  $[2p_{3/2}]$  is láthatók. Jelen cikkben ezeket a spektrumokat a PCI szempontjából tanulmányozzuk. Ezt követően, az összehasonlítás kedvéért, felidézük a korábbi (500 eV és 350 eV primer energián kapott) eredményeinket is, így összegezve az (e,2e) módszerrel végzett PCI-re vonatkozó kísérleteinket.

## 2. A mérési módszer

### 2.1. Kísérleti berendezés

A kísérleti berendezésünket korábban már leírtuk [6], így itt csak röviden ismertetjük. A berendezés két elektrosztatikus spektrométerből áll, mindkettő ún. „doboz” típusú torzított terű hengertűkörös analizátor (CMA) [7]. Az Auger elektronspektrumot egy dupla hengeres analizátor méri, az adott  $E_{sc}$  energiájú szórt elektronokat pedig egy szimpla spektrométerrel detektáljuk. A target gáznyaláb tengelye merőleges a két spektrométer közös tengelyére és a lövedék elektronnyalábra is. A relatív energiafelbontása (FWHM) a szimpla és dupla spektrométereknek 0.9 % ill. 0.5 %.

### 2.2. Az átadott energia „ablakok”

A lövedék által az atomnak átadott energia ( $E_{tr}$ ) a primer és a szórt elektron energia különbségével egyenlő:

$$E_{tr} = E_p - E_{sc}. \quad (1)$$

Az átadott energia értéke határozza meg azokat az atomi folyamatokat, amelyeket a koincidencia spektrumban látni lehet. Belsőhéj ionizáció lehetséges és az Auger-csúcsok megjelennek a koincidencia spektrumban, ha az átadott energia ( $E_{tr}$ ) nagyobb vagy egyenlő a megfelelő ionizációs potenciálnál ( $E_{ion.}$ ). Ezeknek az energiáknak a különbsége adja meg a kibocsájtott elektron kinetikus energiáját:

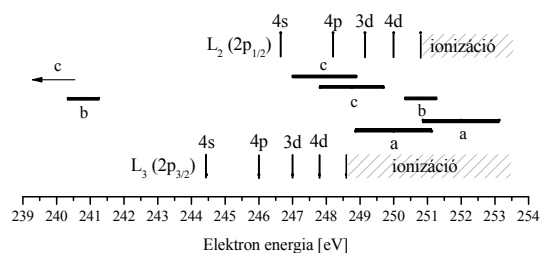
$$E_{ej} = E_{tr} - E_{ion.} \quad (2)$$

Ennek az energiának a szórása egyenlő az átadott energia szórásával, amit főleg a szimpla spektrométer energiafeloldása határoz meg (mivel a kísérleteinkben primer elektronnyaláb elektronszórása sokkal kisebb):

$$\Delta E_{tr}(\text{FWHM}) \approx \Delta E_{ej}(\text{FWHM}) \approx 0.009 E_{sc} \quad (3)$$

Erősen aszimmetrikus energia osztozkodás esetén a két kimenő elektron (a szórt és a kibocsájtott) a többlet-energián ( $E_0 - E_{ion.}$ ) nagyon aszimmetrikus módon osztozkodik, azaz a többlet-energiát szinte teljesen a szórt elektron viszi el ( $E_{ej} \approx 0$ ;  $E_{sc} \approx E_p - E_{ion.}$ ). Ezért a mi rendszerünkben a detektált elektron energia-szórásának csökkentése az analizátorok transzmissziós energiájának csökkentésével lehetséges. Az energia

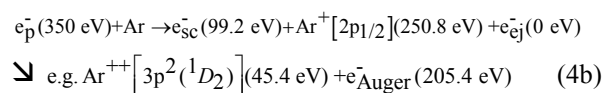
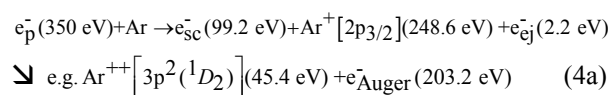
csökkentése azonban csökkenti az Auger folyamat valószínűségét, ami a mérési idő növekedéséhez vezet.



1. ábra: Az alkalmazott átadott energia „ablakok” helyzete az argon ionizációs éleihez és belső héj állapotaihoz képest (a) 500 eV, (b) 350 eV és (c) 460 eV primer energián.

Az alkalmazott átadott energia „ablakok” helyzetét az argon ionizációs éleihez és belső héj állapotaihoz képest az 1. ábrán láthatjuk. Az „ablakok” közepeit (a névleges átadott energiákat) közel tettük az ionizációs élekhez, a legtöbb esetben a két alhéj ionizációs potenciálja közé (248.6 és 250.8 eV közé). Ezekben az esetekben egy átlagos lövedék elektron csak az  $L_3$  alhéjra tud belső ionizációt okozni (az  $L_2$  alhéjra csak belső héj gerjesztés lehetséges). Az átadott energia szórása (az „ablak” szélessége) elbonyolítja a helyzetet és végeredményben  $L_2$  ionizáció is lehetséges, ha az  $L_2$  él az „ablakban” van. (Sőt azon túl is, mert a tényleges Gauss energia eloszlás túlnyúlik az FWHM „ablakon”).

A jobb megértés érdekében tekintsük a névleges energiákat a (b) átadott energia „ablakban” ( $E_{tr}=350-99.2=250.8$  eV) :



A koincidencia Auger elektronspektrumok mérése során tartottuk a 99,2 eV-es koincidencia feltételt, így a többlet-energiát szinte teljes egészében a szórt lövedék vitte el, a kibocsájtott elektron névleges energiája pedig zérushoz közeli volt (az  $L_2$  alhéjra pontosan zéró).

### 2.3. Az átadott energia pontossága

Az 1. ábra azt sugallja, hogy az átadott energia (és szórása) értékének pontossága kulcsfontosságú. Valóban néhány tized eV hiba már nem megengedhető, mert az teljesen különböző PCI hatásra vezet, sőt rezonáns Auger-csúcsokat eredményezhet a koincidencia spektrumban. Az átadott energiát pontosan lehet mérni például a  $3s^{-1}$  külső héj ionizációval (e,2e) kísérletben [4]:

$$e_p^- + Ar \rightarrow e_{sc}^- + Ar^+ [3s] + e_e^- \quad (5)$$

A fenti direkt ionizációtól származó koincidenca spektrumbeli csúcs teljes szélessége (FWHM) nagyobb, mint az Auger-csúcsok szélessége és nagyobb az energia átadási „ablakok” szélességénél is. Ezt a szélességet, amelyre mindkét spektrométer hatással van, kísérleti (effektív) energia átadási „ablaknak” neveztük ( $\Delta E_{eff}$ ) [8] és az alábbi formulával számítjuk:

$$(\Delta E_{eff})^2 = (0.009 E_{sc})^2 + (0.005 E_e)^2 \quad (6)$$

Az  $Ar^+(3s^{-1})$  ionállapot irodalmi [9] energiája 29,2 eV, így a kibocsájtott 3s elektron kinetikus energiájából ( $E_{ej}$ ) a pontos energia átadás ( $E_{tr}$ ) kiszámítható a (2) egyenlet segítségével. A szórt lövedék elektronok energiájának ( $E_{sc}$ ) ismeretében a pontos primer energiát ( $E_p$ ) a (1) egyenlet segítségével számíthatjuk ki.

### 3. Eredmények és diszkusszió

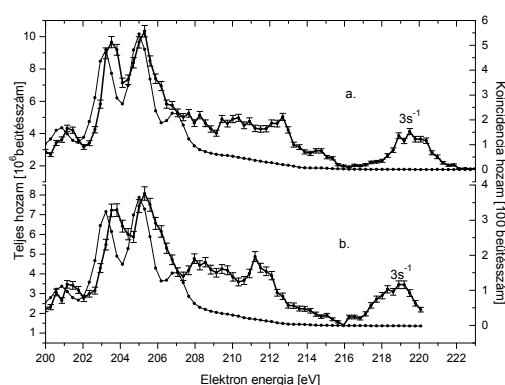
#### 3.1. Eredmények 460 eV primer energia környékén

Fentebb említettük, hogy a rezonáns Auger átmeneteket külön kísérletben [5] is tanulmányoztuk 460 eV primer energia környékén. Jelen cikkben ezeket a spektrumokat a PCI szempontjából vizsgáljuk. A 2. ábrán a teljes (nem koincidenca) és a koincidenca Ar LMM Auger elektron energia spektrumokat láthatjuk, ez utóbbiakat a 209,6 eV-os elektronokkal mértük koincidencaiban. A véletlen koincidenca arányát a korrelációs időspektrum alapján becsültük meg és 35 % alatt tartottuk. Ezt a járulékot – arányosan a primer beütésekkel – a cikkben szereplő spektrumokból már eltávolítottuk.

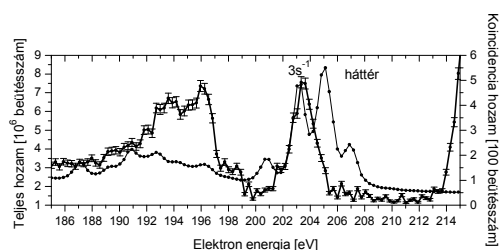
A koincidenca Auger-spektrum – a normál Auger-vonalak mellett – legalább két összetevőt is tartalmaz: a  $[2p_{1/2}]3d$  és  $4d$  belső héj ionállapotoktól eredő rezonáns Auger-vonalakat és a külső héj ionállapotokból kibocsájtott elektronok spektrumát. Ezek a spektrum kiértékelését erősen zavarják. Szerencsére az utóbbi összetevő külön is megmérhető. Tartva a 209,6 eV koincidenca feltételt, a primer energiát 442,4 eV-ra csökkentettük, ahol a belső-héj folyamatok a koincidenca spektrumban már nem láthatók. A 3. ábrán ezeket a teljes és koincidenca spektrumokat láthatjuk.

Feltételezhető, hogy a külső héjakról eredő elektronok koincidenca spektrumai a 442.4 eV és a 458.3 (457.55) eV primer energiákon ugyanolyan szerkezetűek, kivéve a kb. 15-16 eV eltolódást. Tehát a 3. ábrán látható koincidenca spektrum első része (185-206 eV) lesz a 2. ábrán szereplő koincidenca Auger-spektrum hátere. Természetesen eltekintve egy faktortól, amit a 2. és 3. ábrán lévő  $[3s]$  csúcsok magasságából számíthatunk ki.

Megjegyezzük, hogy a 197,5 eV alatti háteret az  $Ar^+[3p^2]4p$  gerjesztett ionállapotok és a  $Ar^{++}[3p^2]$



2. ábra. A teljes (nem koincidenca) elektron energia spektrum (vékony vonal) és a 209,6 eV elektronokkal koincidencaiban mért spektrum (hibajellel jelölve) a) 458.3 eV és b) 457.55 eV primer energiákon, argonon.



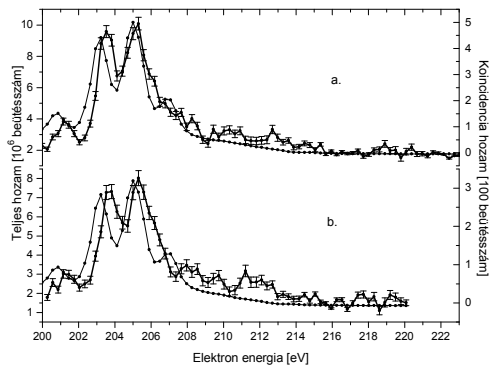
3. ábra. A teljes (nem koincidenca) elektron energia spektrum (vékony vonal) és a 209,6 eV elektronokkal koincidencaiban mért spektrum (hibajellel jelölve) 442.4 eV primer energián, argonon.

kétszeres ionállapotok keletkezésekor kibocsájtott elektronok okozzák. Ez utóbbiak interferálhatnak a kétlépéses Auger-folyamatból eredő elektronokkal. Ez az interferencia megkérdőjelezheti az általunk alkalmazott háttérlevonást.

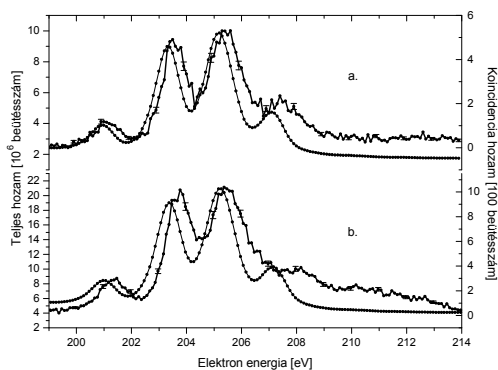
A lecsupaszított (csak PCI torzított) diagram Auger-spektrumot a 2. és 3. ábra különbségeként (eltekintve a fentebb említett faktortól) kaptuk meg. Ebben a spektrumban (4. ábra) a néhány tízed eV-os energia eltolódás (a nem koincidenca spektrumhoz mérve) jól látható, ez a lassú elektronoknak egy jól ismert PCI hatása.

#### 3.2. Összehasonlítás a korábbi eredményekkel

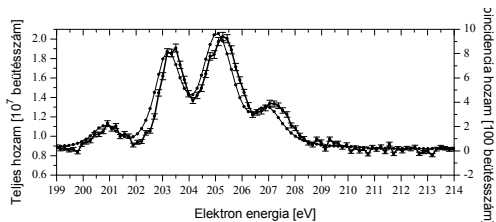
Korábban már tanulmányoztuk a PCI hatást argonon ( $e,2e$ ) módszerrel erősen aszimmetrikus energia-osztokodásnál, először 500 eV, majd 350 eV primer energiákon és az eredményeket publikáltuk is ([3], [4]). Az összehasonlítás kedvéért itt most felidézük ezeket az eredményeket. 500 eV primer energián a direkt folyamatok háttérét nem vontuk le, mert a külső héj folyamatok által produkált elektronspektrumot külön nem mértük.



4. ábra. A teljes (vékony vonal) és a háttérmentes koincidenca Ar  $L_{2,3}$ - $M_{2,3}M_{2,3}$  diagram Auger-spektrum (hibajellel jelölve) a) 458.3 eV és b) 457.55 eV primer energián argonon, koincidenca feltétel 209.6 eV.



5. ábra. A teljes (nem koincidenca) elektron energia spektrum (vékony vonal) és az a) 248 eV és b) 250 eV energiájú elektronokkal koincidenzában mért spektrum (hibajellel jelölve) 500 eV primer energián, argonon.



6. ábra. A teljes (nem koincidenca) elektron energia spektrum (vékony vonal) és a 99,2 eV elektronokkal koincidenzában mért spektrum (hibajellel jelölve) 350 eV primer energián, argonon a direkt folyamatok háttere nélkül.

### 3.3. Következtetések

Látható, hogy az összes koincidenca spektrum eltolódott – a nem koincidenca Auger-spektrumhoz képest – néhány tized eV értékkel a nagyobb energiák

felé. Ezt a hatást az okozza, hogy az Auger-elektron kielőzi a nagyon lassú kibocsájtott elektront. Emiatt az Auger-elektron kevésbé érzi az atomtörzs vonzását, tehát megnő az energiája. Minél kisebb a kibocsájtott elektron energiája, annál nagyobb a koincidenca spektrum energia eltolódása: pl. a 4. ábra b. részén nagyobb, mint az a. részén, és az 5. ábra b. részén is nagyobb, mint az a. részén. Ha az atomnak átadott energia sokkal kisebb, mint a  $L_2$  ionizációs él energiája (mérések 460 eV környékén), az  $L_2$  héjról eredő Auger-csúcsok teljesen eltűnnek, különösen a  $L_2(^3P)$  triplet 207 eV környékén. Ennél részletesebb analízis csak a háttérmentes spektrumok számítógépes kiértékelésével végezhető.

### 4. Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

### 5. Hivatkozások

- [1] B. PARIPÁS, G. VITÉZ, Gy. VÍKOR, K. TÖKÉSI and L. GULYÁS, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 34. (2001) 3301-3312.
- [2] B. PARIPÁS, G. VITÉZ, Gy. VÍKOR, K. TÖKÉSI, M. HUTTULA, A. CALO, H. AKSELA and S. AKSELA, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 37. (2004) 4507-4516.
- [3] B. PARIPÁS, B. PALÁSTHY, G. VITÉZ and Z. BERÉNYI, J. Phys. B: At. Mol. Phys. 41 (2008) 035201.
- [4] B. PARIPÁS, B. PALÁSTHY, Nucl. Instr. and Meth. B, 267 (2009) 275.
- [5] M. ZITNIK, M. KAVCIC, K. BUCAR, B. PARIPÁS, B. PALÁSTHY, K. TÖKÉSI, Nucl. Instr. and Meth. B 267 (2009) 260.
- [6] B. PARIPÁS and B. PALÁSTHY, Rad. Phys. Chem., 76 (2007) 565.
- [7] Á. KÖVÉR, D. VARGA, I. CSERNYI, E. SZMOLA, Gy. MÓRIK, L. GULYÁS and K. TÖKÉSI, Nucl. Instr. & Meth. A 373 (1996) 51.
- [8] B. PARIPÁS, B. PALÁSTHY, M. ZITNIK and K. TÖKÉSI, Nucl. Instr. and Meth. B (2011), doi:10.1016/j.nimb.2011.10.039
- [9] CVEJANOVIC, G. W. BAGLEY and T. J. REDDISH, J. Phys. B: At. Mol. Phys. 27 (1994) 5661

# ÁLLAPOT-ÁLLAPOT INTERFERENCIA KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA ELEKTRONSPEKTROSKÓPIÁVAL

## EXPERIMENTAL ASPECTS OF STATE TO STATE INTERFERENCE BY ELECTRON SPECTROSCOPY

Paripás B. \*, Palásthy B. \*\* és Matjaz Žitnik \*\*\*

### ABSTRACT

Any two autoionizing resonances with a common final ionic state can be made to interfere by an appropriate selection of electron impact energy. We have studied this state to state interference by coincident detection of electron pairs in the final state. At 457.3 eV electron impact energy a series of  $(e, 2e)$  spectra was measured for argon in 205 - 214 eV energy range for studying the neighbouring  $[2p3/2]3d$  and  $[2p3/2]4d$  resonances leading to the  $[3p2]3d$  final state.

### 1. A Fano-interferencia

Rezonancia során a találkozó két hullám az eredetiek összegénél kisebb vagy nagyobb amplitúdójú eredő hullámot hoz létre. Interferencia csak olyan hullámok között lehetséges, amelyek korreláltak, egymással koherensek, például azért, mert ugyanaból a forrásból jöttek két különböző úton. A legegyszerűbb esetben ezek geometriai utakat (trajektóriákat) jelentenek. A kvantummechanikában azonban ezek az utak ugyanannak a végállapotnak a különböző megkülönböztethetetlen formálódási módjait jelenthetik. A jól ismert esetben az  $E_F$  energiájú  $F(E_F)$  végső ion-állapot a  $G(0)$  kezdeti (alap) atomi állapotból formálódik közvetlenül (1a), vagy egy közbenső  $R(E_R)$  rezonancián keresztül (1b):

$$G(0) + e(E_0) \rightarrow F(E_F) + e_s(E_s) + e_a(E_a) \quad (1a)$$

$$G(0) + e(E_0) \rightarrow R(E_R) + e_s(E_s) \rightarrow F(E_F) + e_s(E_s) + e_a(E_a) \quad (1b)$$

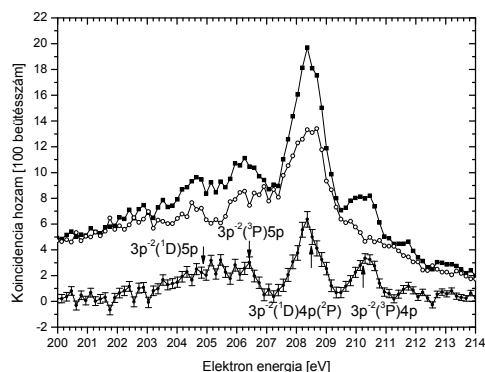
Mindkét folyamat során a primer elektron  $e(E_0)$  rugalmatlanul szóródik ( $e_s$ ) és egy másik elektron is ( $e_a$ ) kibocsájtódik. A rezonáns, kétlépéses folyamatban (1b) mindkét elektron energiája meghatározott ( $E_s = E_0 - E_R$ ;  $E_a = E_R - E_F$ ), ezért az elektron-energia spektrumban két csúcs található. A direkt folyamatban (1a) a végállapotbeli két elektron a többletenergia ( $E_0 - E_F$ ) folytonos módon osztozik. A kvantummechanikai

interferencia e két folyamat között (azaz a rezonáns és a direkt folyamat között) jön létre és Fano-interferenciának nevezik, amely egy jól ismert aszimmetrikus vonal alakra vezet az elektronspektrumban.

Koincidencia kísérletekben azonban, mind a szórt, mind a kibocsájtott elektront detektáljuk. A szórt elektronok energiáját adott  $E_s$  értéken tartva a kibocsájtott elektron energiája is meghatározottá válik ( $E_a = E_0 - E_F - E_s$ ). Tehát a koincidencia kísérletekben a direkt folyamatok is csúcsokat eredményeznek az energiaspektrumban, de ezek az  $E_0 - E_F$  többletenergia bármilyen felosztásánál lehetnek. Ennek a megfelelő beállításával a direkt koincidencia csúcsok pontosan egybe eshetnek a rezonáns folyamatból származó csúcsokkal. Ilyen típusú interferencia előfordulhat a rezonáns Auger-kísérleteinkben [1]. 344,9 eV primer elektron energián, 99 eV szórt energián a megfelelő direkt és rezonáns folyamatok:

$$Ar(^1S_0) + e_p(344.9) \rightarrow Ar^{*+}(3p^{-2}(^1D_2)4p)(37.4) + e_c(99) + e_{sc}^-(208.5) \quad (2a)$$

$$Ar(^1S_0) + e_p(344.9) \rightarrow Ar^{*+}(2p^{-1}(^3P_2)4p)(245.9) + e_c(99) \rightarrow Ar^{*+}(3p^{-2}(^1D_2)4p)(37.4) + e_c(99) + e_{sc}^-(208.5) \quad (2b)$$



1. ábra. Az  $E_0 = 344,9$  eV energián mért  $(e, 2e)$  spektrum (négyzetek) ( $E_s = 99,2$  eV) és a direkt ionizációs háttér (üres körök). A két spektrum különbségét (a rezonáns Auger-spektrumot) tele körökkel és hibajellel ábrázoljuk.

\* egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Fizikai Tanszék

\*\* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Fizikai Tanszék

\*\*\* egyetemi tanár, J. Stefan Institute, Ljubljana, Szlovénia

A mért (e,2e) spektrum, amely a direkt és a rezonáns folyamatból jövő elektronok eredő energiaeloszlását tartalmazza az 1. ábrán látható. A direkt folyamat részeseését egy másik kísérletben (ahol a rezonáns folyamat nem lehetséges) megmértük ( $E_0 = 340$  eV  $E_s = 99,2$  eV), majd az energia spektrumot 4,9 eV-vel visszatoltuk. Az erős direkt folyamattal történő interferencia miatt azonban a két spektrum különbsége nem szükségképpen az  $Ar[2p_{3/2}]4p$  állapotból kibocsájtott rezonáns Auger-spektrum. A [1] cikkben azt találtuk, hogy valószínűleg ez az interferencia okozza a  $3p^{-2}(^1D)5p$  és  $3p^{-2}(^3P)5p$  állapotokra vezető felrázóási folyamatok abnormálisan nagy intenzitását.

## 2. Az állapot-állapot interferencia

Van egy másfajta típusú interferencia is, ami módosíthatja a koincidencia spektrumokat. Tétélezzük fel, hogy két nem átfedő rezonanciát ( $R'$  és  $R''$ ) gerjesztünk alapállapotból elektronütközéssel, amelyek elektronemisszióval ugyanabba a végállapotba bomlanak:

$$G(0) + e(E_0) \rightarrow R'(E_{R'}) + e_{s'} \rightarrow F(E_F) + e_{s'} + e_{a'} \quad (3a)$$

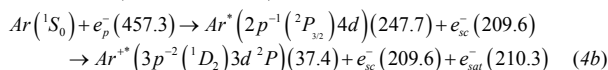
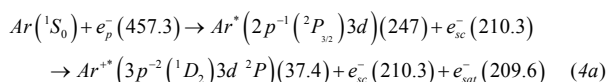
$$\rightarrow R''(E_{R''}) + e_{s''} \rightarrow F(E) + e_{s''} + e_{a''} \quad (3b)$$

(A direkt (1a) folyamat most is lehetséges.)

Az elektronpárokat koincidienciában mérjük két elektronspektrométerrel. Az interferencia feltétel megköveteli, hogy az egyik reakció csatornában szórt elektronnak az energiája (és spinje) megegyezzen a másik csatornában kibocsájtott Auger-elektron energiájával (és spinjével): ebben az esetben az  $(e_{s'}, e_{a'})$  és  $(e_{s''}, e_{a''})$  elektronpárok megkülönböztethetetlenek. Ilyen állapot-állapot interferencia csak egyetlen primer elektron energián lehetséges:  $E_0 = E_{R'} + E_{R''} - E_F$ .

Ilyen interferenciát már nem koincidiencia kísérletben is [2] megfigyeltek. (e,2e) kísérletekben azonban a szög szerinti integráció kevésbé fedi el az interferencia effektusokat, tehát a jelkontraszt növelhető. A mi (e,2e) méréseink során az argon  $2p$  rezonáns Auger-spektrumokat megfigyeltük [3]. Ebben a cikkben az ugyanezzel a (e,2e) eszközzel elvégzett első állapot-állapot interferencia kísérleteinkről számolunk be.

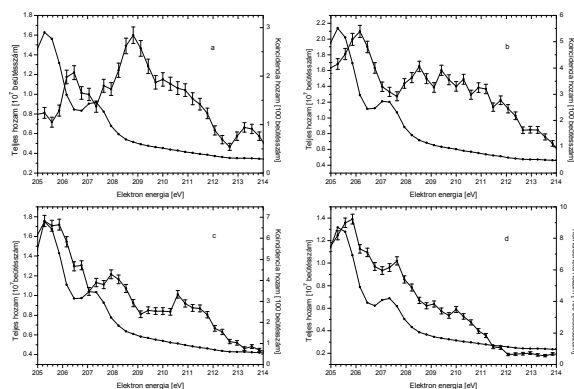
Az  $Ar^{+*}(3p^{-2}(^1D_2)3d/4d\ ^2P, ^2D)$  végállapot dublettel választottuk ki erre a célra  $E_F = 37,15 \setminus 37,40$  eV [4], amely rezonáns Auger-bomlással jelentős intenzitással keletkezik a  $[2p_{3/2}]3d$  és  $[2p_{3/2}]4d$  állapotokból köszönhetően az erős végső állapotbeli konfigurációs kölcsönhatásnak (FISCI). A megfelelő rezonancia energiák  $E_{R'} = 246,93$  eV és  $E_{R''} = 247,67$  eV [5], így az állapot-állapot interferenciát  $E_0 = 457,3$  eV ( $= 246,93 + 247,67 - 37,3$ ) energiánál várjuk. Mivel  $\Gamma_{2p} \approx 120$  meV, ezért a  $[2p_{3/2}]3d$  és  $[2p_{3/2}]4d$  rezonanciák átfedése jelentéktelen, az állapot-állapot interferencia a következő két reakciócsatorna között történhet:



## 3. Az állapot-állapot interferencia mérési módszerei

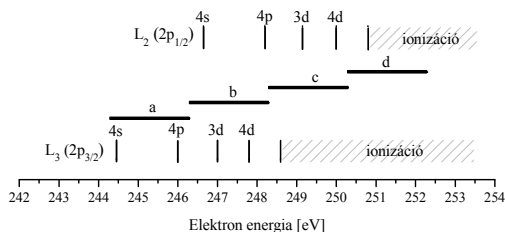
### 3.1. Az interferencia tartomány ( $E_A, E_B$ ) spektráltérképe

Az Auger-elektronspektrumot ( $E_B$ ) dupla (hengertükör típusú) analizátorral, az adott energiájú szórt elektronokat  $E_{sc}$  ( $E_A$ ) pedig szimpla spektrométerrel detektáltuk (innenlől inkább az  $E_B, E_A$  szimbólumokat használjuk, hogy a szórt és kibocsájtott elektronok megkülönböztethetlenségét hangsúlyozzuk). A két spektrométerrel a koincidiencia spektrumokat a  $205,0 \leq E_A(E_B) \leq 214,0$  eV energiatarományban 0,5 eV lépésközzel vizsgáltuk. Az energiaskálát az ismert energiájú LMM Auger-átmenetekkel kalibráltuk. A 29,2 eV kötési energiájú 3s elektron ionizációjához tartozó koincidiencia csúccsal monitoroztuk az  $E_0$  primer elektron energiát [3]. Az  $(E_A, E_B)$  spektrálsíkot (e,2e) spektrumok sorozatából alkottuk meg, ahol az  $E_A$  rögzített az  $E_B$  pedig léptetett. Az A spektrométer számlálási sebessége mutatta az elektronnyaláb és a targetgáz nyomás stabilitását. A 2. ábrán a 19 db (e,2e) spektrum közül 4 látható.



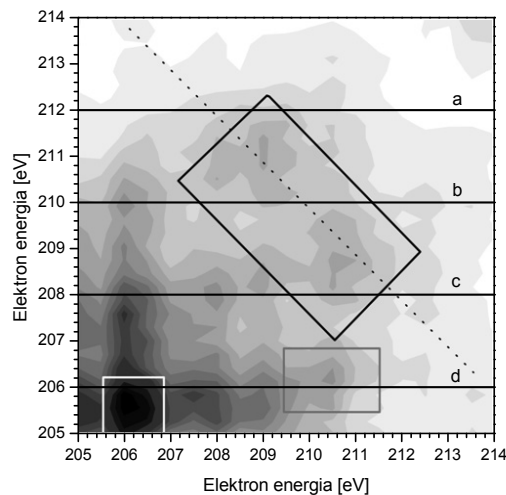
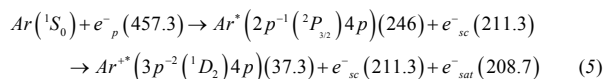
2. ábra. Az (e,2e) spektrum  $E_0 = 457,3$  eV primer energián,  $E_A$  rögzített az  $E_B$  léptetett; a)  $E_A = 212$  eV, b)  $E_A = 210$  eV, c)  $E_A = 208$  eV, d)  $E_A = 206$  eV. A hibajellel jelölt koincidiencia spektrumok a véletlen koincidienciát ( $\approx 30\%$ ) nem tartalmazzák.

Ezekre a spektrumokra az atomnak átadott energia „ablakok” ( $= E_0 - E_A$ ) helyzetét a 3. ábrán láthatjuk. A különböző  $E_A$  értékeken mért spektrumokat összenormáltuk egy fordított módon felvett (e,2e) spektrum segítségével ( $E_A$  változik,  $E_B = 212,0$  eV).



3. ábra. Az atomnak átadott energia „ablakok” helyzete az előző ábrán bemutatott spektrumokra

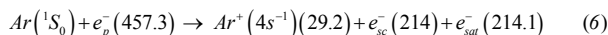
Az általunk mért spektrális térképet a 4. ábrán láthatjuk. A szórt és kibocsájtott elektronok megkülönböztethetlensége miatt a térképnek a 45°-os tengelyre nézve szimmetrikusnak kellene lennie, de instrumentális hatások elrontják ezt a szimmetriát. A különböző folyamatokat mutató térképi tartományokat a 3. ábra alapján azonosíthatjuk. A 206 eV környékén talált nagyon erős koinkidencia jelek az ugyanolyan energiájú szórt és  $L_2$ - $M_{23}M_{23}$  ( $^3P$ ) Auger-elektron párokhoz tartoznak. A rezonáns Auger-folyamatokból származó elektronok kör alakú foltokat eredményeznek. Pl. a (209eV, 211eV) körüli pont valószínűleg a következő folyamatból származik:



4. ábra. Az interferencia tartomány ( $E_A, E_B$ ) spektráltérképe  $E_0=457,3$  eV primer energián. (A sötétebbre színezett részek felelnek meg a nagyobb koinkidencia hozamoknak.)

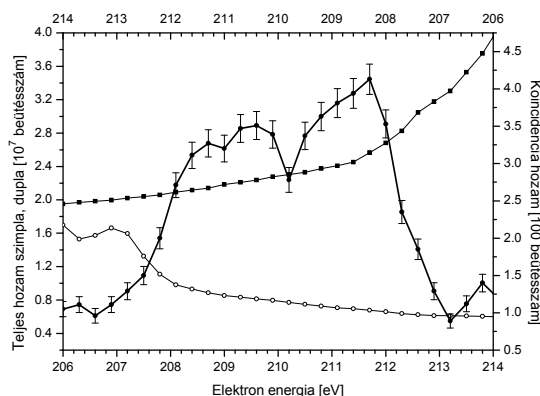
A direkt folyamatok járuléka  $-45^\circ$ -os csíkoknak felel meg, mivel a két elektron energiaösszege adott végállapot esetén állandó. A  $3p^{-2}nl$  gerjesztett ionállapotot energiája 36-40 eV, így ennek a széles csíknak a 4. ábrán szereplő szaggatott vonal környékén kellene lenni. Ennek a csíknak a hiánya azt mutatja, hogy a direkt folyamatok ezen a primer energián nagyon

gyengék a rezonánshoz képest. A 4. ábra jobb felső sarkában látható „folt” a  $4s^{-1}$  ionállapotnak megfelelő csík metszete:



### 3.2. Diagonális léptetés az interferencia tartományban

Ha a kiválasztott végállapotra koncentrálunk, akkor az állapot-állapot interferencia tanulmányozásának leghatékonyabb módszere a diagonális léptetés, ami azt jelenti, hogy mindkét spektrométert léptetjük, de ellentétes irányban. Egy adott végállapotra a két (szórt és kibocsájtott) elektron energiájának az összege állandó lesz ( $E_A + E_B = E_0 - E_F$ ), tehát az adatainkat a spektráltérkép  $-45^\circ$ -os irányú egyenesre mentén gyűjtjük. A „mágikus” 457,3 eV primer energián ez az egyenes a 4. ábrán szereplő szaggatott vonal ( $E_A + E_B = E_0 - E_F = 420$  eV), az ezen mért spektrumokat az 5. ábrán láthatjuk. A két teljes spektrum eltérése mutatja a szimpla és a dupla spektrométerek eltérő energiafelbontását ( $\Delta E_A(\text{FWHM}) = 0.009 E_A$  ill.  $\Delta E_B(\text{FWHM}) = 0.005 E_B$ ).



5. ábra. A diagonális léptetés eredménye 457,3 eV primer energián ( $E_A + E_B = E_0 - E_F = 420$  eV). Az energia spektrumot a szimpla (tele négyzetek, felső energiaskála) és dupla (üres körök, alsó energiaskála) spektrométerekkel mértük. A hibajellel jelölt koinkidencia spektrum adatait a véletlen koinkidenciákat ( $\approx 30\%$ ) nem tartalmazzák.

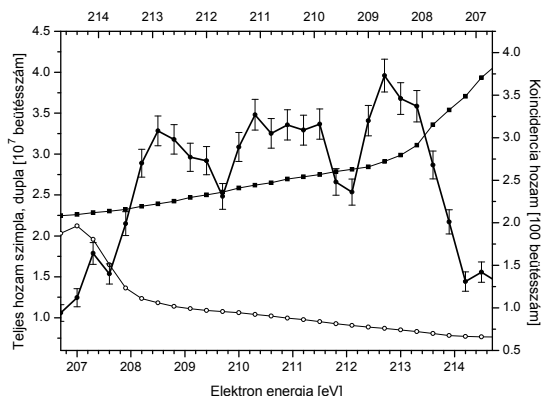
A diagonális léptetés nagy előnye az, hogy a direkt folyamat csak konstans háttérrel és nem csúcserű szerkezeteket hoz létre a koinkidencia spektrumban. Tehát a csúcsokat a rezonáns folyamatok okozzák. Mint a  $[2p]4p$  ((5) egyenlet) és a  $[2p]3d/4d$  ((4a) és (4b) egyenletek) gerjesztések hozzájárulhatnak ehhez az összetett szerkezethez létrehozva vonalpárokat a 208,7/211,3 eV és a 209,6/210,3 eV energiákon. Ez az összetett szerkezet szétszedhető, ha – tartva a végállapotot – a primer energiát megnöveljük. A 6.

ábrán a diagonális léptetés eredményét láthatjuk 458,7 eV primer energián ( $E_A+E_B=E_0-E_F=421,4$  eV). Ezen a primer energián az eredeti egyenletek ((5), (4a) és (4b)) helyébe a következők lépnek:

$$\begin{aligned} Ar(^1S_0) + e^- (458.7) &\rightarrow Ar^{**}(2p^{-1}(^2P_{3/2})4p)(246) + e^-_{sc} (212.7) \\ &\rightarrow Ar^{**}(3p^{-2}(^1D_2)4p)(37.3) + e^-_{sc} (212.7) + e^-_{sat} (208.7) \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} Ar(^1S_0) + e^- (458.7) &\rightarrow Ar^*(2p^{-1}(^2P_{3/2})3d)(247) + e^-_{sc} (211.7) \\ &\rightarrow Ar^{**}(3p^{-2}(^1D_2)3d^2P)(37.4) + e^-_{sc} (211.7) + e^-_{sat} (209.6) \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} Ar(^1S_0) + e^- (458.7) &\rightarrow Ar^*(2p^{-1}(^2P_{3/2})4d)(247.7) + e^-_{sc} (211) \\ &\rightarrow Ar^{**}(3p^{-2}(^1D_2)3d^2P)(37.4) + e^-_{sc} (211) + e^-_{sat} (210.3) \end{aligned} \quad (7c)$$



6. ábra. Ugyanaz, mint az 5. ábra, de 458,7 eV primer energián mérve ( $E_A+E_B=E_0-E_F=421,4$  eV)

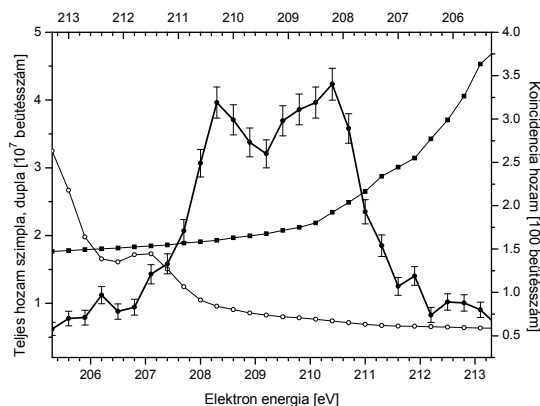
A szórt elektron csúcsok eltolódnak a primer energiák különbségével (ebben az esetben 1,4 eV-vel), de a rezonáns Auger-csúcsok a helyükön maradnak (tehát a spektrum, mozgó, és álló csúcsok kombinációja). A [2p]4p gerjesztés ((7a) egyenlet) járuléka valóban leválasztható, legalábbis a 212,7 eV-on levő, de a többi vonal leválasztása nem egyértelmű.

Ugyanennyivel csökkentve a primer energiát (455,9 eV-re), a szórt elektron csúcsok lefelé tolnak 1,4 eV-vel (209,9, 208,9 és 208,2 eV-re) és rácsúsznak az Auger-csúcsokra (208,7, 209,6 és 210,3 eV), ami egyszerűbbnek tűnő, de a valóságban még bonyolultabb spektrumot eredményez (7. ábra).

#### 4. Következtetések

Mind a spektráltkép (4. ábra), mind a diagonális léptetéssel kapott spektrumok (5-7. ábrák) azt sugallják, hogy a [3p<sup>2</sup>]4p végállapotra vezető [2p]4p elektron-ütközéses gerjesztés egy nagyon erős forrása a

koincidencia spektrumnak. Ez esetleg lehetetlenné teszi a [2p]3d/4d állapot-állapot interferencia megmérését. A végső konklúziót azonban csak az összes koincidencia spektrum egyidejű számítógépes kiértékelése után vonhatjuk le.



7. ábra. Ugyanaz, mint az 5. ábra, de 455,9 eV primer energián mérve ( $E_A+E_B=E_0-E_F=418,6$  eV)

#### 5. Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

#### 6. Hivatkozások

- [1] B. PARIPÁS, B. PALÁSTHY, M. ZITNIK and K. TÓKÉSI, Nucl. Instr. and Meth. B (2011), doi:10.1016/j.nimb.2011.10.039
- [2] VAN DEN BRINK J P, NIENHUIS G, VAN ECK J and HEIDEMAN H G M 1989, J. Phys. B 22 3501
- [3] M. ZITNIK, M. KAVCIC, K. BUCAR, B. PARIPÁS, B. PALÁSTHY, K. TÓKÉSI, Nucl. Instr. and Meth. B 267 (2009) 260.
- [4] MURSU J et al. 1996. J. Phys. B 29 4387
- [5] KING G C, TRONC M, READ F H and BRADFORD R C 1977 J. Phys. B 10 2479

# KOMPAKT KETTŐSRENDSZEREK DINAMIKÁJÁNAK SPIN-PÁLYA KORREKCIÓI

## SPIN-ORBIT CONTRIBUTIONS TO THE ANGULAR DYNAMICS OF COMPACT BINARY SYSTEMS

Majár János \*

### ABSTRACT

*The research for the first gravitational wave signal detection is one of the most active field in astrophysics [1,2,3,4]. Some of the most promising sources for detectable waveforms are inspiralling compact binary systems. Among the numerous numerical evaluations there are many challenges in analytical research, including the insertion of eccentric effects, and the rotation of the compact objects. In the present article the next step is detailed on this path, namely, the angular equations of the motion of the binary system are integrated for eccentric and circular orbits. Based on these expressions some details and investigations are foreshown.*

### 1. BEVEZETÉS

A gravitációs hullámok első közvetlen detektálásának talán legígéretesebb forrásai az úgynevezett kompakt kettősrendszerek. Az ezen kettősrendszerek által kisugárzott gravitációs hullámok kutatása során elengedhetetlen a kettősrendszert alkotó kompakt objektumok (melyek lehetnek fekete lyukak és/vagy neutron csillagok) mozgásának törvényszerűségeit részletesen leírni [5]. A kettősrendszer életének "bespirálzási" szakaszában erre a célra a poszt-newtoni közelítés a legalkalmasabb módszer. A detektálható gravitációs hullám jelalakok feltárásához ezen közelítés eredményeit kell összehangolni a hullámterjedést leíró post-minkowski multipól sorfejtéssel, melyben a kettősrendszert alkotó objektumok leírása forrástagok összegeként jelenik meg [6].

A detektált jeleket kiértékelő módszerek számára döntő fontosságú, hogy az elmélet által megjósolható gravitációs hullám jelalakok minél pontosabban közelítsék a valóságos források által kisugárzott hullámformát. Ezért szükséges a kettősrendszer leírásába minden fizikailag releváns effektus figyelembe vétele. Mi ezen effektusok közül a legalacsonyabb rendben fellépő kölcsönhatással foglalkozunk, amelynek oka a kettősrendszert alkotó objektumok forgása, illetve annak

hatásai a testek mozgására. Ezen túl igyekszünk a számításokat a lehető legáltalánosabb pályaalak esetében származtatni, így figyelembe vesszük a pálya excentricitásának hatásait is.

Azonban ekkor a kettősrendszer dinamikájának leírása nagyságrendekkel komplikáltabbá válik. Az említett forgási effektusok legalacsonyabb rendű járuléka az ún. spin-pálya kölcsönhatás, amely (többek között) a pályasík precesszációját okozza. Amíg a spinmentes esetben a kompakt objektumok mozgása egyetlen szögváltozóval leírható, a pályasík precesszációja miatt egy, vagy több további szögmenntiséget be kell vezetni a megfelelő, teljes leírás érdekében. Az egyenletek származtatását és megoldását tovább bonyolítja, hogy a spin-pálya kölcsönhatás részeként maguk a spin vektorok is precesszálnak [7].

Az ezen szögmenntiségeket leíró mozgásegyenletek (továbbiakban: szögegyenletek) kiintegrálásának fő nehézsége, hogy azok bonyolultan csatolt differenciálegyenlet-rendszert képeznek, ráadásul excentrikus pályák esetén ezek egyike sem integrálható analitikusan. A szakirodalomban fellelhető közleményekben ezért az egyenletek adott, speciális határesetekben történő kiintegrálásai szerepelnek [8], vagy a spin effektusokat a pályafrekvencia "kis" perturbációiként kezelő közelítő megoldások.

Ezen cikkben megadjuk egy kettősrendszert alkotó két kompakt asztrofizikai objektum (tömegeik  $m_1$  és  $m_2$ , a forgásukat leíró spin vektorok  $S_1$  és  $S_2$ ) szögegyenleteinek megoldását. A poszt-newtoni sorfejtés rigorózus alkalmazása mellett, ha a szögmozgást nem a szokásos polár-koordinátákkal, hanem Euler-szögekkel írjuk le, a differenciálegyenletek szétcsatolhatóak (a módszer részletei megtalálhatóak a [9] publikációban). Az integrálás során a pálya excentricitásának figyelembe vételéhez pedig felhasználásra kerül a pálya általánosított valódi anomália paraméterezése [10].

Bár a leírás 1 PN (PN a poszt-newtoni sorfejtés rendjeinek rövid jelölése) rendű korrekcióinak vizsgálata korábbi publikációban már szerepel [11], annak eredményeit itt ismét közöljük a kettősrendszer mozgásának lehető legteljesebb leírása érdekében.

\* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Fizikai Tanszék

A különböző poszt-newtoni rendhez tartozó járulékok megkülönböztetésére az alábbi jelölésrendszert vezetjük be. Minden fizikai mennyiség különböző típusú járulékait alsó indexszel jelöljük. Egy tetszőleges  $A$  mennyiséget ezzel az alábbi alakban bontunk fel:

$$A = A_N + A_{PN} + A_{SO} \quad (1)$$

ahol  $A_N$  jelöli a newtoni rendű tagokat (nulladrend),  $A_{PN}$  az első poszt-newtoni korrekció (ennek formális rendje 1 PN), illetve  $A_{SO}$  jelöli a spin-pálya korrekciókat (ezek formális rendje 1,5 PN). A számítások során minden részeredményt a fentihez hasonló formában rendezünk, a képlettömbök első sora tartalmazza a newtoni rendű tagokat és formálisan a korrekciókat, majd az azt követő sorokban az egyes korrekciók explicit alakja kerül részletezésre.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a különböző korrekciók ilyen szétválasztása csupán technikai jellegű, mivel a formulákban megjelenő paraméterek és időtől függő mennyiségek is tartalmaznak további, magasabb rendű korrekciókat. Ennek kiküszöbölésére csak a paraméter időfüggésének (ami ugyancsak tartalmaz magasabb rendű járulékokat) meghatározása után kerülhet sor, akkor a formális, technikai módszer egyben lényegi sorfejtéssé is válik, és így a vizsgált mennyiségek, és azok időfüggése konzisztensen, rendről rendre meghatározható.

## 2. SZÖGVÁLTOZÓK ÉS EGYENLETEIK

A kettősrendszer mozgásának leírásakor a cél a rendszert alkotó két objektum relatív helyzetét meghatározó  $\mathbf{r}$  szeparációs vektor időfüggésének kiintegrálása. A szeparációs vektor hosszára vonatkozó radiális egyenlet megoldására több, különböző módszer lelhető fel a szakirodalomban, ezeket nevezzük a pálya paraméterezéseinek. További kihívás azonban a szeparációs vektor irányának a leírása. Erre különböző numerikus módszereket szoktak alkalmazni, mivel a gömbi polár-koordináta-rendszer szögváltozóira vonatkozó egyenletek csatolt differenciálegyenlet-rendszert alkotnak. Egy másik jellemző módszer az egyenletek speciális határesetben történő analitikus megoldása (egy forgó objektum, teszt-részecske határeset, stb.)

Munkánk során a polár-szögek helyett Euler-szögek bevezetése mellett döntöttünk, mivel azok egy intuitívabb fizikai értelmezéshez vezetnek, illetve a szögegyenletek analitikusan megoldhatóak a pálya-paraméterezés felhasználásával. Ezen Euler-szögeket az alábbi módon vezetjük be. A szeparációs vektor alakja az Euler-szögek függvényében

$$\mathbf{r} = r \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \psi - \cos \iota \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \cos \psi + \cos \iota \cos \phi \sin \psi \\ \sin \iota \sin \psi \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ahol  $\iota$  a  $\mathbf{J}$  teljes impulzusmomentum-vektor és az  $\mathbf{L}_N$  pálya-impulzusmomentum által bezárt szög,  $\phi$  írja le  $\mathbf{L}_N$  precesszióját a konstans  $\mathbf{J}$  vektor körül (ezzel leírva a pálya precesszióját), illetve  $\psi$  mutatja meg az  $\mathbf{r}$  szeparációs vektor irányát a pillanatnyi pályasíkon [12].

A fenti szögek bevezetésekor fontos kiemelni már a számítások korai szakaszában, hogy a  $\iota$  szög legalacsonyabb rendű járuléka a 1,5 PN rendhez tartozó spin-pálya korrekció, alacsonyabb rendben az értéke nulla. A fent bevezetett jelölésekkel ez a  $\iota_N = \iota_{PN} = 0$  egyenlettel írható le, vagyis  $\iota = \iota_{SO}$ . Ennek legközvetlenebb eredménye számunkra az, hogy  $\cos \iota = 1$  az általunk vizsgált poszt-newtoni rendben.

A  $\mathbf{v}$  relatív sebességvektort az Euler-szögekkel az alábbi módon fejezhetjük ki:

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \dot{r} \\ r(\dot{\phi} \cos \iota + \dot{\psi}) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{r} \\ r\dot{Y} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

ahol a figyelembe vettük, hogy  $\iota = \iota_{SO}$ , és bevezettük az  $Y$  szöget, mint  $Y = \phi + \psi$ . Ez a szög látszólagos pálya-szöggként interpretálható, és a rá vonatkozó dinamikai egyenletet a  $\dot{Y} = v_{\perp} / r$  összefüggéssel származtatjuk [9].

Ezen eredmények felhasználásával a szeparációs vektor alakja az alábbi lesz

$$\mathbf{r} = r \begin{pmatrix} \cos Y_N - \sin Y_N (Y_{PN} + Y_{SO}) \\ \sin Y_N + \cos Y_N (Y_{PN} + Y_{SO}) \\ \iota_{SO} \sin \psi_N \end{pmatrix}. \quad (4)$$

A relatív sebességvektor komponenseinek kiszámítása, illetve a szögegyenletek származtatásának módszere részletesebben a [9] közleményben találhatóak meg.

## 3. ÁLTALÁNOS MEGOLDÁS ELLIPTIKUS PÁLYÁK ESETÉBEN

A szögekre vonatkozó mozgásegyenletek megoldásához elsőként szükségünk van az alábbi radiális egyenlet megoldására

$$\begin{aligned} \dot{r}^2 &= \frac{2E}{\mu} + \frac{2M}{r} - \frac{L^2}{\mu^2 r^2} + (\dot{r}^2)_{PN} + (\dot{r}^2)_{SO}, \\ (\dot{r}^2)_{PN} &= 3(3\eta - 1) \frac{E^2}{\mu^2} + 2(7\eta - 6) \frac{EM}{\mu r} - 2(3\eta - 1) \frac{EL^2}{\mu^3 r^2} \\ &\quad + (5\eta - 10) \frac{M^2}{r^2} - (3\eta - 8) \frac{M^2 L^2}{\mu^2 r^3}, \\ (\dot{r}^2)_{SO} &= \frac{2EL \cdot \sigma}{M \mu^2 r^2} - \frac{2}{\mu r^3} (2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{L} \cdot \sigma), \end{aligned} \quad (5)$$

ahol  $E$  a rendszer energiája,  $L$  jelöli az  $\mathbf{L}=\mathbf{J}-\mathbf{S}$  impulzusmomentum vektor hosszát,  $M = m_1 + m_2$  és  $\mu = m_1 m_2 / M$  a rendszer teljes és redukált tömege, illetve bevezettük az  $\eta = \mu / M$  mennyiséget. Továbbá bevezettük a spinvektorok súlyozott összegéit, vagyis  $\mathbf{S} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$  és  $\boldsymbol{\sigma} = \zeta_1 \mathbf{S}_1 + \zeta_2 \mathbf{S}_2$  rövid jelöléseket, ahol  $\zeta_1 = m_2 / m_1$  és  $\zeta_2 = m_1 / m_2$ . Végül  $A_0$  jelöli a Runge-Lenz vektor newtoni rendű hosszát, vagyis

$$A_0 = \sqrt{M^2 \mu^2 + \frac{2EL^2}{\mu}}. \quad (5)$$

### 3.1. A valódi anomália paraméterezés

Mivel excentrikus pályák esetén a radiális egyenlet analitikusan nem megoldható, egy alkalmas pálya-paraméterezést szokás bevezetni. A sok, különböző eljárás közül a valódi anomália paraméterezést választottuk, mivel az vezet a legátláthatóbb formulákra a gravitációs hullám jelalakok esetén [10]. A paraméterezést definiáló három feltétel a következő

$$r(\chi = 0) = r_{\min}, \quad r(\chi = \pi) = r_{\max},$$

$$\frac{dr}{d(\cos \chi)} = -(\gamma_0 + \gamma_{PN} + \gamma_{SO})r^2, \quad (7)$$

ahol  $r_{\min}$  és  $r_{\max}$  jelölik a pálya két fordulópontját, és mindhárom  $\gamma$  konstans értékű ( $\gamma_0$  newtoni rendű,  $\gamma_{PN}$  jelöli az 1 PN rendű korrekciókat, és  $\gamma_{SO}$  a spin-pálya járulék), amelyek az első két feltétel alapján határozhatóak meg.

A fenti definíciót követve a szeparációs vektor hosszának paraméter-függésére az alábbi kifejezéseket kapjuk

$$r(\chi) = \frac{L^2}{\mu(\mu M + A_0 \cos \chi)} + r_{PN}(\chi) + r_{SO}(\chi),$$

$$r_{PN}(\chi) = -\frac{2(2-\eta)MEL^2 + (6-\eta)M^3\mu^3}{\mu(\mu M + A_0 \cos \chi)^2} - \frac{2(6-\eta)M^4\mu^6 + 2(10-3\eta)EL^2M^2\mu^3 + (1-3\eta)E^2L^4}{2A_0\mu^3(\mu M + A_0 \cos \chi)^2} \cos \chi$$

$$r_{SO}(\chi) = \frac{2(2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma})}{A_0 L^2 (\mu M + A_0 \cos \chi)^2} \left[ A_0 (2M^2 \mu^3 + EL^2) + M \mu (2m^2 \mu^3 + 3EL^2) \cos \chi \right] - \frac{2EL \cdot \boldsymbol{\sigma} [A_0 M \mu^2 + (M^2 \mu^3 + EL^2) \cos \chi]}{A_0 M \mu^2 (\mu M + A_0 \cos \chi)^2}. \quad (8)$$

A mozgást leíró dinamikai változókat  $r$  függvényében igyekszünk megadni, és így a fenti összefüggések segítségével kiszámolható, hogy ezek hogyan függnek a paramétertől. Azonban egy teljes leíráshoz szükségünk van arra az információra is, hogy a  $\chi$  valódi anomália

paraméter és a koordinátáidő között mi a kapcsolat. Ezt a

$$\frac{dt}{d\chi} = \frac{\mu r^2}{L} + \left( \frac{dt}{d\chi} \right)_{PN} + \left( \frac{dt}{d\chi} \right)_{SO},$$

$$\left( \frac{dt}{d\chi} \right)_{PN} = \frac{\mu r^2}{2L^3} \left[ (\eta - 13)M^2 \mu^2 + (3\eta - 1)A_0^2 + (3\eta - 8)M \mu A_0 \cos \chi \right],$$

$$\left( \frac{dt}{d\chi} \right)_{SO} = -\frac{\mu r^2}{ML^5} \left[ (2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma})M \mu^2 (3M \mu + A_0 \cos \chi) - EL^2 \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma} \right]. \quad (9)$$

differenciálegyenlet írja le.

Bár a  $\chi(t)$  függvény analitikusan nem meghatározható, annak inverze igen, így a numerikus integrálás helyére numerikus invertálás kerülhet. Ennek a folyamatnak a részletei 1 PN rendig a [11] publikációban találhatóak meg. A jelen cikk számára releváns eredmény az, hogy a fenti differenciálegyenlet megoldása egy lineáris, és egy korlátos, periodikus, sima függvény összege.

### 3.2. A relatív sebességvektor komponensei

A mozgás leírásának fontos lépése a relatív sebességvektor nem-triviális komponenseinek meghatározása. A [9] cikk összefüggéseit felhasználva ezek az alábbiak lesznek. Az  $x$  (vagy párhuzamos) komponens

$$v_{\parallel} = \frac{A_0 \sin \chi}{L} + v_{\parallel PN} + v_{\parallel SO},$$

$$v_{\parallel PN} = \frac{2(\eta - 1)M^4 \mu^6 + 3(3\eta - 1)E^2 L^4}{2\mu^2 A_0 L^3} \sin \chi + \frac{2(4\eta - 5)EL^2 M^2 \mu^3}{2\mu^2 A_0 L^3} \sin \chi - \frac{(8 - 3\eta)M \mu A_0^2}{2L^3},$$

$$v_{\parallel SO} = -\frac{M \mu^2 [(2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma})M^2 \mu^3 - \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma} EL^2] \sin \chi}{A_0 L^5} - \frac{\mu^2 A_0^2 (2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \cos \chi \sin \chi}{L^5}, \quad (10)$$

illetve az  $y$  (vagy merőleges) komponens

$$v_{\perp} = \frac{\mu M + A_0 \cos \chi}{L} + v_{\perp PN} + v_{\perp SO},$$

ahol az egyes korrekciók az alábbiak lesznek

$$\begin{aligned}
v_{\perp PN} &= -\frac{2(9-10\eta)M^4\mu^6 + 2(7-8\eta)EL^2\mu^3M^2}{2\mu^2A_0L^3}\cos\chi \\
&\quad -\frac{3(1-3\eta)E^2L^4}{2\mu^2A_0L^3}\cos\chi + \frac{(2+\eta)M^3\mu^3 + (3+\eta)MEL^2}{2L^3} \\
&\quad + \frac{2(\eta-2)M^3\mu^3 + 4(\eta-2)MEL^2}{L^3}\cos^2\chi, \\
v_{\perp SO} &= -\frac{\mu[2\mathbf{L}\cdot\mathbf{S}(3M^2\mu^3 + 2EL^2) + \mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma}(4M^2\mu^3 + EL^2)]}{L^5} \\
&\quad -\frac{\mu^2M[4(M^2\mu^3 + EL^2)(\mathbf{L}\cdot\mathbf{S} + \mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma}) + EL^2\mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma}]\cos\chi}{A_0L^5} \\
&\quad + \frac{2\mu^2A_0^2\mathbf{L}\cdot\mathbf{S}\cos^2\chi}{L^5}. \tag{11}
\end{aligned}$$

### 3.3. A szögegyenletek megoldása

Jelen cikk fő célkitűzése a különböző szögmennyiségek időfüggésének meghatározása. Elsőként az  $\Upsilon$  szög-re vonatkozó differenciálegyenletet oldjuk meg a valódi anomália paraméterezés felhasználásával. Az  $\Upsilon$  szög-re vonatkozó differenciálegyenletet az alábbi alakra hozzuk

$$\begin{aligned}
\frac{d\Upsilon}{d\chi} &= 1 - \left(\frac{d\Upsilon}{d\chi}\right)_{PN} - \left(\frac{d\Upsilon}{d\chi}\right)_{SO}, \\
\left(\frac{d\Upsilon}{d\chi}\right)_{SO} &= \frac{\mu^3M(8\mathbf{L}\cdot\mathbf{S} + 3\mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma}) + A_0\mu^2(4\mathbf{L}\cdot\mathbf{S} + \mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma})\cos\chi}{L^3}, \\
\left(\frac{d\Upsilon}{d\chi}\right)_{PN} &= \frac{6M^2\mu^2 + \eta M\mu A_0\cos\chi}{2L^2}. \tag{12}
\end{aligned}$$

Ezen egyenleteket kiintegrálva az eredmény

$$\begin{aligned}
\Upsilon &= \Upsilon_0 + \chi - \Upsilon_{PN} - \Upsilon_{SO}, \\
\Upsilon_{SO} &= \frac{\mu^3M(8\mathbf{L}\cdot\mathbf{S} + 3\mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma})\chi + A_0\mu^2(4\mathbf{L}\cdot\mathbf{S} + \mathbf{L}\cdot\boldsymbol{\sigma})\sin\chi}{L^4}, \\
\Upsilon_{PN} &= \frac{6M^2\mu^2\chi + \eta M\mu A_0\sin\chi}{2L^2}. \tag{13}
\end{aligned}$$

Ezek az eredmények írják le a szeparációs vektor mozgását a pillanatnyi pályasíkon. A korábban már említett tény alapján - mely szerint a valódi anomália paraméter egy időben lineáris és egy periodikus függvény összegeként áll elő - látható, hogy csak a  $\chi$ -ben lineáris tagok tartalmaznak időben (is) lineáris eredményeket. Ezen tagok a pálya-frekvencia korrekcióiként viselkednek. Minden más járulék periodikus, korlátos perturbációkat ír le. Az eredmények alapján jól

látható, hogy az 1 PN rendű és spin-pálya korrekciók nem csak a pályafrekvenciák perturbációit írják le, hanem további, sajátos frekvencia-tulajdonságokkal rendelkező periodikus hatásokat is.

A fentihez hasonló módon járunk el a spin-precessziós egyenletek megoldásakor is [7]. Ekkor az egyes spin vektorok irányát gömbi polár-koordinátákkal adjuk meg, vagyis az  $i$ -vel indexelt spinvektor

$$\mathbf{S}_i = S_i \begin{pmatrix} \sin\alpha_i \cos\beta_i \\ \sin\alpha_i \sin\beta_i \\ \cos\alpha_i \end{pmatrix}, \tag{14}$$

ahol az  $\alpha_i$  szög az  $i$ -edik spin-vektor és a  $\mathbf{J}$  teljes impulzusmomentum vektor által bezárt szög, míg  $\beta_i$  írja le ugyanezen spin-vektor precesszióját. Mivel az  $\alpha_i$  szögek az általunk vizsgált PN rendben állandóak, ezért a precessziós egyenletek egyszerű precessziót írnak le. Az integrálás előkészítéseként a  $\beta_i$  szögeket felbontjuk  $\beta_i = \beta_{iN} + \beta_{iPN}$  formában, ahol  $\beta_{iN}$  newtoni rendű állandók, illetve

$$\beta_{iPN} = \frac{J\mu^2(4 + 3\zeta_i)(M\mu\chi + A_0\sin\chi)}{2L^3} \tag{15}$$

az 1 PN korrekciók (a számolás részletei megtalálhatóak a [7] publikációban).

Az objektumok mozgását leíró másik két szögmennyiség, vagyis  $\iota$  és  $\phi$  egyenletei önmagukban nem integrálhatóak ki, erre azonban a gravitációs hullámok leírásakor nincs is szükség, az egyenletekben csak a  $\iota_{SO}\sin\phi_N$  és  $\iota_{SO}\cos\phi_N$  szorzatok szerepelnek. Mint azt a [9] cikkben részleteztük, az erre vonatkozó egyenletek algebrai egyenletekké egyszerűsödnek, amelyek megoldásai

$$\begin{aligned}
\iota_{SO}\sin\phi_N &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^2 [A_i \sin\xi_i - B_i \cos\xi_i \\
&\quad - C_i \cos\beta_{iN} - \beta_{iPN} \sin\beta_{iN}] \sin\alpha_i S_i, \\
\iota_{SO}\cos\phi_N &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^2 [B_i \sin\xi_i + A_i \cos\xi_i \\
&\quad + C_i \sin\beta_{iN} - \beta_{iPN} \cos\beta_{iN}] \sin\alpha_i S_i, \tag{16}
\end{aligned}$$

ahol  $\xi_i = 2\Upsilon_N - \beta_{iN} = 2\Upsilon_0 + 2\chi - \beta_{iN}$ , és

$$\begin{aligned}
A_i &= -\frac{\eta\zeta_i v_{\parallel N} v_{\perp N}}{2}, \quad B_i = \left[ \frac{(2 + \zeta_i)\mu}{2r_N} - \frac{\eta\zeta_i v_{\parallel N}^2}{4} + \frac{\eta\zeta_i v_{\perp N}^2}{4} \right], \\
C_i &= \left[ -\frac{(2 + \zeta_i)\mu}{2r_N} + \frac{\eta\zeta_i v_N^2}{4} \right]. \tag{17}
\end{aligned}$$

Bár külön-külön a két szöget nem határozzuk meg, a fenti szögekombinációk fizikai tartalma a meghatározó: ezek a pályaimpulzus-momentum  $x$  és  $y$  koordinátái - vagyis ezek írják le a pályasík precesszióját  $\mathbf{J}$  körül. Jól látható az eredményekből, hogy ez nem egy egyszerű precesszió, mivel a  $\tau$  szög jól láthatóan nem állandó értékű a mozgás során.

Bár léteznek olyan határesetek, amelyekben a pálya nem precesszál, vagy a precesszió egyszerű ( $\tau = \text{konst.}$ ), ezek nagy része "túl speciális", vagyis túlságosan is lerögzíti a rendszer paramétereinek lehetséges értékét. Ez alól egy kivétel van, amikor  $\alpha_i = k\pi$ , mivel ebben az esetben a spin vektorok nem precesszálnak, és így a pályasík sem. Ez is elég erőteljes megkötés a kettősrendszer dinamikájára, de fizikailag releváns.

#### 4. A KÖRPÁLYA HATÁRESET

A körpálya határeset definiálásához a relatív sebességvektort az alábbi módon bontjuk fel

$$\mathbf{v} = \dot{r}\mathbf{n} + r\omega\mathbf{m}, \quad (18)$$

ahol a mozgás pályafrekvenciáját a korábban bevezetett szögmennyiségek segítségével a

$$\omega = \dot{\phi} + \dot{\psi} = \dot{\Upsilon} \quad (19)$$

alakban írhatjuk fel, és ennek segítségével a körpálya határesetet a

$$\dot{r} = 0, \quad \dot{\omega} = \ddot{\Upsilon} = 0 \quad (20)$$

feltételekkel definiálhatjuk. Mivel a szeparációs vektor hossza csak 2,5 PN rendben változik (a sugárzás visszahatása miatt), azt a számolásainkban konstans paraméterként kezeljük.

A fenti definíció további következménye, hogy körpálya esetben

$$\mathbf{v}_\perp = \frac{L}{\mu r} + \mathbf{v}_{\perp PN} + \mathbf{v}_{\perp SO},$$

$$\mathbf{v}_{\perp PN} = -\frac{L[(1-3\eta)Er + (4-2\eta)M\mu]}{\mu^2 r^2},$$

$$\mathbf{v}_{\perp SO} = \frac{2M\mu\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} - Er\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma}}{M\mu Lr^2}, \quad (21)$$

illetve ebből adódóan

$$\Upsilon = \frac{L}{\mu r^2}t + \Upsilon_{PN} + \Upsilon_{SO},$$

$$\Upsilon_{PN} = -\frac{L[(1-3\eta)Er + (4-2\eta)M\mu]}{\mu^2 r^3}t,$$

$$\Upsilon_{SO} = \frac{2M\mu\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} - Er\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\sigma}}{M\mu Lr^3}t. \quad (22)$$

Ezen eredmények azt mutatják, hogy körpálya határesetben - mivel a fenti  $\Upsilon$  korrekciók mind lineárisak az időkoordinátában - a spin-pálya kölcsönhatás csak a pályafrekvenciához ad járulékat a pályasíkon való mozgás tekintetében. Azonban, mint azt az alábbiakban megmutatjuk, a pályasík precessziójában továbbra is fellépnek a különböző frekvenciával rendelkező periodikus korrekciók.

A körpálya határeset feltételeit alkalmazva a spin precesszióra

$$\beta_i = \beta_{iN} + \frac{(4+3\eta_i)J}{2r^3}t, \quad (23)$$

illetve ennek felhasználásával a  $\tau_{SO}\sin\phi_N$  és  $\tau_{SO}\cos\phi_N$  szögekombinációkra

$$\tau_{SO} \sin \phi_N = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{A_i [\cos \beta_{iN} - \cos \xi_i]}{L} - \frac{\sin \beta_{iN} (4+3\eta_i)Jt}{2Lr^3} \right\} \sin \alpha_i S_i,$$

$$\tau_{SO} \cos \phi_N = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{A_i [\sin \xi_i + \sin \beta_{iN}]}{L} - \frac{\cos \beta_{iN} (4+3\eta_i)Jt}{2Lr^3} \right\} \sin \alpha_i S_i, \quad (24)$$

ahol bevezettük a  $\xi_i = 2\Upsilon_0 + 2Lt/\mu r - \beta_{iN}$  rövid jelölést, illetve az  $A_i$  koefficiensek alakja az alábbira egyszerűsödik

$$A_i = (2 + \zeta_i) \frac{\mu}{2r} + \frac{\zeta_i L^2}{4M\mu r^2}. \quad (25)$$

Ezen eredményekből is látszik, hogy csak nagyon speciális esetekben áll elő olyan dinamika, amelyben egyszerű precesszió lép fel, vagy egyáltalán nincs pályaprecesszió. A fenti összefüggések alapján az egyszerű precesszió feltétele az, hogy a kettőst alkotó objektumok fő paramétere (tömegek, spinek, stb.) meg kell egyezzenek. Másrészt, a pálya precessziójával csak

akkor nem kell számolni, ha mindkét objektumra igaz, hogy spinvektorai nem precesszálnak, akárcsak az excentrikus pályák esetében.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Eredményeink azt mutatják, hogy a pálya precessziója a kettősrendszert alkotó objektumok forgásának természetes következménye, és ez a precesszió több, különböző frekvenciájú hatás komplex összessége. Ezen hatások mindegyike megjelenik a detektálható gravitációs hullám jelalakban is.

Látható továbbá, hogy a spin effektusok által okozott korrekciók nem tekinthetők pusztán a pályafrekvencia kis perturbációinak. Egészen más jellegű járulékokkal kell számolni a pályásik precesszióját, illetve orientációját leíró szögmennyiségek kifejezéseiben, nem ritkán newtoni rendbe tartozó frekvenciákkal.

A gravitációs hullám jelalakok vizsgálata során ezen effektusokat mind számba kell vennünk, főleg, mivel azok igen alacsony (csupán 1,5 PN) rendben már lényegi járulékokkal egészítik ki a leírást. A gravitációs hullám detektorok adatait elemző módszerekbe ezeket így be kell építeni, mivel ezek nélkül fals, vagy csak túlságosan speciális esetben érvényes hullámalakokat találhatnak a mért adatok között.

2 PN rendben a két test forgása közötti, úgynevezett spin-spin kölcsönhatás ezt a képet tovább bonyolítja, mivel kinematikai feltételt kapunk arra, hogy körpálya határeset fizikailag releváns paraméterek esetén nem érhető el, a testek forgása korlátot szab a circularizációnak. Ez a spin-effektusok fontosságán túl azt is mutatja, hogy a testek forgásának hatásai sem hanyagolhatóak el a leírásban.

Fenti eredményeink meghatározzák a további kutatások irányát is. Amikor a mozgás szögmennyiségeit harmonikus függvénybe helyettesítjük, majd sorba fejtünk, szekuláris divergencia tagok lépnek fel. Ezek kezelésére komplex sorfejtéses módszert kell alkalmaznunk, amely különválasztja a frekvencia- és amplitúdó perturbációkat (az előbbieket helytelen kezelése vezet a szekuláris tagok fellépéséhez).

Ezen probléma megoldása után a mozgás részletes leírása alapján már származtathatóak a detektálható gravitációs hullám jelalakokra vonatkozó össze-

függések, melyek a hosszú távú kutatási tevékenység fő célkitűzését jelentik.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 7. IRODALOM

- [1] P. FRITSCHER, Proc. SPIE **4856**, szerk. M. Cruise és P. Saulson (SPIE, Bellingham, WA, 2003), 282 old.; gr-qc/0308090.
- [2] VIRGO, <http://www.virgo.infn.it>
- [3] Einstein Telescope, <http://www.et-gw.eu>
- [4] K. DANZMANN és társai: LISA - Laser Interferometer Space Antenna, Pre-Phase A Report, Max-Planck Institut für Quanten-optik, Report MPQ **233** (1998).
- [5] L. BLANCHET, Living Rev. Relativity **9**, 4 (2006).
- [6] L. E. KIDDER, Phys. Rev. **D52**, 821 (1995).
- [7] J. MAJÁR, Phys. Rev. **D80**, 104028 (2009).
- [8] C. KÖNIGSDÖRFFER, A. GOPAKUMAR Phys. Rev. **D71**, 024039 (2005).
- [9] J. MAJÁR, M. VASÚTH, Phys. Rev. **D77**, 104005 (2008).
- [10] Z. KERESZTES, B. MIKÓCZI, L. Á. GERGELY, Phys. Rev. **D72**, 104022 (2005).
- [11] J. MAJÁR, P. FORGÁCS, M. VASÚTH, Phys. Rev. **D82**, 064041 (2010).
- [12] L. GERGELY, Z. PERJÉS, M. VASÚTH, Phys. Rev. **D57**, 3423 (1998).

# CONTENTS

1. Nagy L.:	16. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:
STUDY OF THE INDUCTANCE OF A LINEAR	DERIVATION OF TOOL PROFILE BY CAXX
ELECTROMAGNETIC ACTUATOR..... 3	APPLICATION..... 63
2. Lénárt J.:	17. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:
CONTACTLESS VIBRATION MEASUREMENT..... 7	DETERMINATION OF TOOL PROFILE OF
3. Olasz A., Szabó T.:	BALLNUT ON TRADITIONAL BORE GRINDING67
INVERSE KINEMATICS OF A 4 DOF ROBOT .....11	18. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:
4. Jakab E., Lénárt J.:	APPROXIMATION OF TOOL PROFILE OF
CNC SHEET METAL MACHINES..... 15	GOTHIC-ARC PROFILE BALLNUT
5. Kiss D., Csáki T., Makó I.:	BY ELLIPSE..... 71
EXAMINATION OF THE MANUFACTURING	19. Tóth L.:
POSSIBILITIES	INVESTIGATION OF TRANSIENT SIGNALS
OF A HIGH PITCH BALL NUT ON CNC LATHE.. 19	BY VIRTUAL INSTRUMENTATION ..... 75
6. Csáki., Makó I., Hegedűs Gy.:	20. Szarka T.:
DEVELOPMENT PLAN OF AN EDUCATIONAL	INVESTIGATION OF FLICKER DISTURBANCE
ROBOTIC LABORATORY ..... 23	PROPAGATION..... 79
7. Iscsenko A.A., Barna B., Molnár L.:	21. Szalontai L., Kovács E.:
RENEWING WORN-OUT BEARING HOUSINGS	OPTICAL METHOD FOR CONTOUR LINE
USING METAL-POLYMER MATERIALS..... 27	DETECTION ..... 83
8. Takács Gy., Hegedűs Gy., Szilágyi N.:	22. Gáti A., Ferenc I., Kellényi L.:
COMPUTER AIDED MAINTENENCE OF	ANDROID BASED MEDICAL EQUIPMENT FOR
MACHINE TOOLS..... 31	EARLY DIAGNOSIS OF NEUROCOGNITIVE AND
9. Szilágyi A., Patkó Gy.:	BLOOD CIRCULATION DISORDERS..... 87
A POSSIBLE NONLINEAR MODEL OF A	23. Füvesi V., Kovács E.:
SUPERFINISHING DEVICE ..... 35	METHOD FOR MODEL BASED FAULT
10. Szilágyi A., Patkó Gy., Takács Gy.:	DETECTION OF AN ENCODER..... 91
EQUIVALENCE BETWEEN TRAPEZOIDAL-	24. Szentirmai L.:
AND BALLSCREW DRIVES .....39	SMALL-SIZE D.C. MOTOR PERFORMANCE
11. Szilágyi A., Takács Gy., Barna B., Demeter P.:	AND TEST VIA INTERNET ..... 95
MECHANICAL ANALYSIS OF A HYDROPLASTIC	25. Bodolai T.:
CLAMPING DEVICE ..... 43	ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF THE OPTICAL
12. Szilágyi A., Takács Gy., Velezdi Gy., Demeter P.:	DISTANCE MEASURING..... 99
VARIETIES OF SOLUTION FOR THE	26. Kazup L., Marcsák G. Z.:
IMPROVEMENT OF	UTILIZATION OF PHASE-LOCKED LOOP
A VERTICAL TURNING MACHINE ..... 47	CIRCUITS IN ELECTRICAL NETWORK
13. Csáki T., Lajtos J., Makó I., Szilágyi A.:	DIAGNOSTIC SYSTEMS..... 103
APPLICATION POSSIBILITIES OF REVERSE	27. Paripás B., Palásthy B.:
ENGINEERING ..... 51	A SHORT REVIEW OF OUR (E,2E) COINCIDENCE
14. Szilágyi A., Takács Gy., Barna B., Demeter P.:	EXPERIMENTS FOR STUDYING THE
EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON THE	POST-COLLISION INTERACTION ..... 107
REMANENT LIFETIME OF ROLLING-ELEMENT	28. Paripás B., Palásthy B., Matjaz Ž.:
BEARINGS ..... 55	EXPERIMENTAL ASPECTS OF STATE
15. Hegedűs Gy., Takács Gy., Patkó Gy.:	TO STATE INTERFERENCE BY ELECTRON
EFFECT OF THE MACHINING ACCURACY ON	SPECTROSCOPY..... 111
THE CONTACT ANGLE OF BALLSCREWS..... 59	29. Majár J.:
	SPIN-ORBIT CONTRIBUTIONS TO THE
	ANGULAR DYNAMICS OF COMPACT BINARY
	SYSTEMS.....115

# GÉP

## INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám

**President of Editorial Board**

Vesza József

**General Editor**

Dr. Jáрмаi Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**Deputy**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

### Dear Reader,

In the present, 03/2012 issue of the journal „Gép”, research results of the Centre of Excellence of Mechatronics and Logistics are presented in the form of publications. The project has been supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund, as well as the contribution of the units of the University of Miskolc participating in the research. The excellence center is made up of four scientific workshops, all of them being related to mechatronics and logistics. Complex research on the fields of mechatronics and logistics and the implementation of the research results seem inevitable, since both are consequences of the trends of Hungarian economic development and the policy of the Hungarian government (dynamic expansion of the automobile industry, the creation of regional logistical centers, etc.). Intelligent systems are only marketable with adequate costs, communication and legal environment, therefore the research from the above aspects concerning mechatronics and logistics are also beneficial.

The Centre of Excellence of Mechatronics and Logistics are made up of the scientific workshops Research and Development of Elements of Mechatronic Systems, The Enhancement of Reliability of Wired and Wireless Communication Systems for Mechatronics and Logistics Applications and Innovative Solutions for Enhancement of Competitiveness of Organizations. During the last years research period numerous lecturers, researchers and students have been given the opportunity to present their research results at acknowledged Hungarian and international conferences. Among its main objectives, the center intends to keep young lecturers, researchers in the region, to build networks with industrial companies and implement joint research with them.

The Robert Bosch Department of Mechatronics, the Department of Machine Tools, the Department of Electronic and Electrical Engineering as well as the Department of Physics are involved in the research group Research and Development of the Elements of Mechatronic Systems with seven research and development topics. Their research projects are performed in the topics of modelling, developing and research of starters, super-finishing equipment, ball screws, the production of components with intricate surfaces, electro-mechanical actuators, electricity networks and problems of atomic and solid state physics. The present collection of articles represents an important part of the recent year's work of the excellence center.

*Prof. Dr. Béla Illés*  
*university professor,*  
*leader of the Center of Excellence*

*Dr. Szabó Tamás*  
*associate professor,*  
*leader of the Research Group*

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.  
Postage-address: 3501. Pf. 55. Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+36-30) 9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1027 Budapest, Fő u. 68.  
Postage-address: 1371, Bp, Pf. 433  
Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: a.gaby@gteportal.eu, Internet: www.gte.mtesz.hu  
Responsible Publisher: Dr. Igaz Jenő Managing Director

<http://www.gepujsag.hu>  
Printed by Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67.  
Price per month: 1260 Ft.  
Distribution in foreign countries by Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat H-1389  
Budapest, Pf. 149. and Magyar Média H-1392 Budapest, Pf. 272.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**All articles are peer reviewed.**