

**MISKOLCI EGYETEM**  
**GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



**PRECÍZIÓS LÉZERINTERFEROMETRIKUS**  
**MOZGÁSANALIZÁLÁSI MÓDSZEREK MÉRNÖKI**  
**ALKALMAZÁSOKKAL**

PHD ÉRTEKEZÉS

**Béres Miklós**

okleveles gépészmérnök (MSc),

**SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**  
**GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK TÉMATERÜLET**  
**SZILÁRD TESTEK MECHANIKÁJA TÉMACSOPORT**

Doktori iskola vezető

**Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella**

a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport vezető

**Prof. Dr. Szeidl György**

egyetemi tanár

Tudományos vezető

**Prof. Dr. Paripás Béla**

egyetemi tanár

**Miskolc**

**2022**



## TARTALOM

<b>TARTALOM.....</b>	<b>I</b>
<b>1 BEVEZETÉS .....</b>	<b>3</b>
<b>2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS, A TÉMA JELENTŐSÉGE ÉS IDŐSZERŰSÉGE .....</b>	<b>4</b>
2.1 <i>A téma jelentősége és időszerűsége.....</i>	4
2.2 <i>A lézeres mozgásanalizáló módszerek áttekintése.....</i>	5
2.2.1 <i>Precíziós lézerinterferometrius módszerek .....</i>	5
2.2.2 <i>Egyéb, a gépiparban használt lézeres (optikai) módszerek .....</i>	10
2.3 <i>A lézer, mint mérőeszköz gépgyártástechnológiai alkalmazása.....</i>	13
2.3.1 <i>Forgácsoló megmunkálásoknál használt lézeres eljárások .....</i>	13
2.3.2 <i>Lézeres mérés esztergálásnál.....</i>	13
2.3.3 <i>Fúrási forgácsolási folyamat vizsgálata lézer segítségével .....</i>	15
2.3.4 <i>Lézeres mérések marásnál .....</i>	16
2.3.5 <i>Közös tapasztalatok a lézeres mérésekkel kapcsolatban.....</i>	17
<b>3 MÉRÉSI EREDMÉNYEK .....</b>	<b>20</b>
3.1 <i>A Fizikai Tanszék Michelson típusú lézerinterferométerének átépítése .....</i>	20
3.2 <i>A LIMA és LDV készülékek összemérése.....</i>	24
3.2.1 <i>Következtetések .....</i>	29
3.3 <i>Fúrósár szabad rezgéseinek mérése LDV módszerrel .....</i>	30
3.3.1 <i>Mérési körülmények.....</i>	30
3.3.2 <i>Mérési eredmények .....</i>	31
3.3.3 <i>A befogott fúrósárak rezgéseinek leírása .....</i>	36
3.3.4 <i>Következtetések .....</i>	39
3.4 <i>Fúrósár fúrás közbeni rezgéseinek mérése LDV módszerrel.....</i>	39
3.4.1 <i>Mérési körülmények.....</i>	39
3.4.2 <i>Mérési eredmények .....</i>	40
3.4.3 <i>Következtetések .....</i>	45
3.5 <i>Fúrósár fúrás közbeni rezgéseinek mérése LDV és LTV módszerekkel .....</i>	46
3.5.1 <i>Mérési körülmények.....</i>	46
3.5.2 <i>Mérési eredmények .....</i>	47
3.5.3 <i>Következtetések.....</i>	51
3.6 <i>Lakóépület rezgések mérése LDV módszerrel.....</i>	52
3.6.1 <i>Mérési körülmények.....</i>	52
3.6.2 <i>Mérési eredmények .....</i>	53
3.6.3 <i>Következtetések.....</i>	57
3.7 <i>Épületek rezgéseinek mérése laboratóriumi körülmények között.....</i>	58
3.7.1 <i>Mérési módszer .....</i>	58
3.7.2 <i>mérési eredmények.....</i>	59
3.7.3 <i>Következtetések.....</i>	65
<b>4 TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....</b>	<b>66</b>
<b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>68</b>

<b>SUMMARY .....</b>	<b>70</b>
<b>KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS .....</b>	<b>HIBA! A KÖNYVJELZŐ NEM LÉTEZIK.</b>
<b>HIVATKOZÁSOK .....</b>	<b>73</b>
<b>ÁBRÁK JEGYZÉKE .....</b>	<b>79</b>

## 1 BEVEZETÉS

A Michelson-interferométer a precíziós elmozdulás mérés legősibb eszköze[1]. Hagyományos fényforrásokkal már a XIX. század végétől használták, de a lézerek feltalálásával az 1960-as évektől kezdve ez a módszer is új erőre kapott. A Miskolci Egyetem (korábban Nehézipari Műszaki Egyetem) Fizikai Tanszéke és a Wigner Fizikai Kutatóközpont (korábban Központi Fizikai Kutató Intézet) az 1980-as években kifejlesztett egy precíziós lézerinterferometrikus elmozdulásmérőt (LI03) [2], [3]. Az eszköz működési elvéből következően – melyet a későbbiekben részletezünk – hitelesítés nélkül is pontosan méri az elmozdulást, és a mikronos felbontású adatokból pontosan számítható a pont sebessége (megfelelő szoftveres háttér mellett).

A megépített két berendezés egyikét egyetemünk Fizikai Tanszékén oktatási célokra használtuk. Ez a készülék még nem mozgásanalizátor volt, hanem csak egy elmozdulásmérő, amely az elmozdulás adatokat  $\frac{1}{4}$  másodpercenként kijelezte. A másik berendezést már tekinthetjük mozgásanalizátornak, mert a mérési adatok egy saját gyártmányú mérőkártyán keresztül egy számítógépbe kerültek, amely feldolgozta azokat. Ezt az analizátort a Szerszámgépek Tanszékén (ma Szerszámgépeszeti és Mechatronikai Intézet) hosszú ideig sikeresen használták szerszámgépeken igen finom mozgások tanulmányozására (például stick-slip) [3]. Az analizátorok lelke, a lézer, az optika és a detektorok ugyan túléltek az elmúlt három-négy évtizedet, de a vezérlést, a mérési adatok gyűjtését végző elektronika nagyon elavult, csak részben működött, és egyáltalán nem volt illeszthető a mai korszerű számítógépekhez. Ezen okok miatt határoztuk el pár éve az analizátor vezérlő- és adatgyűjtő rendszerének felújítását a mai kor követelményeinek megfelelően. Ez praktikusán egy korszerű mérőkártya mérőrendszerbe integrálását (hardveres fejlesztés) és egy igényeinkhez igazított LabView mérőprogram megírását (szoftveres fejlesztés) jelentette. Én ezen a ponton kapcsolódtam be a fejlesztésekbe. A cél két olyan korszerűsített eszköz létrehozása, amelyek jó alapot adhatnak a módszer, ill. a módszer mérnöki alkalmazásainak további fejlesztéséhez.

Jól definiált mérnöki alkalmazásokhoz természetesen kiváló lézerinterferometrikus eszközök kaphatók a kereskedelemben is. Az általunk használt LDV és LTV eszköz is ilyen volt. Erős korlátokba ütközünk azonban, ha az alkalmazások fejlesztése a célunk, mert a kereskedelemben kapható eszközök rugalmatlanok; geometriájuk, mérőprogramuk, a kapott mérési adatok típusa nem változtatható. Ráadásul a javításuk reménytelen vállalkozás (garanciális időn túli meghibásodásuk esetén). Ezen okok miatt például a kereskedelmi LDV eszközünk ma részben a saját fejlesztésű mérő- és adat gyűjtő rendszerrel fut. A saját fejlesztések segítenek az eszközök működésének mélyebb megértésében, illetve az eszközök és alkalmazásainak tanítása során is.

## 2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1 A TÉMA JELENTŐSÉGE ÉS IDŐSZERŰSÉGE

A mérnöki gyakorlat fontos része az ellenőrzés és a karbantartás. Nemcsak egy „termék” élettartama (működése) alatt játszanak szerepet, hanem annak létrehozása (gyártása) során is. Lényeges szempont, hogy a gazdaságos előállítási vagy fenntartási költségek mellett garantáljuk a gyártás vagy a működés biztonságát is. Az eredményes karbantartási folyamat egyrészt a mérnöki rendszerek alkalmazás közbeni ellenőrzését jelenti, másrészt a lehetséges meghibásodások észlelését, és az annak megfelelő beavatkozásokat. A monitoring technikák főleg a rendszert érő hatások felügyeletével foglalkoznak, míg a károsodási jelenségek megfigyelésére különféle hagyományos érzékelőket és roncsolásmentes vizsgálati eljárásokat használnak (Non-Destructive Testing - NDT). A Structural Health Monitoring (SHM) egyesíti a szerkezeti dinamikát, a jelfeldolgozási technikát, valamint a mikroelektronikát, melyek segítségével minden pillanatban diagnosztizálható a szerkezet állapota és előre jelezhető bizonyos mértékig a hátralévő élettartama. Ugyanakkor az SHM a NDT-vel szemben beágyazott rendszereket, kommunikációs és adatfeldolgozó rendszereket és beavatkozó egységeket egyaránt magában foglal. Ahhoz, hogy a egy SHM képes legyen a felügyelet felé „riasztást” küldeni, mindenféleképpen ismerni kell a rendszerbeli folyamatok, ill a károsodások fizikáját, valamint egy károsodási szintet felállítania [1].

Különösen ígéretesek a fizika alapú mesterséges intelligencia-alkalmazások (Artificial Intelligence - AI), amelyek lehetővé teszik a mérnöki ismeretek és a terepi vizsgálatok eredményeinek beillesztését a döntéshozatali folyamatba. A gépi tanulás (Machine Learning - ML) és a mélységi tanulás (Deep Learning – DL, mely a a statisztikai modelleken alapuló neuronhálózatokat alkalmaz) az adatalapú SHM két hatékony módszere. Mindezek mellett az új generációs érzékelők lehetővé teszik a fejlett jel-, kép- és videófeldolgozási módszerek alkalmazását, és kihasználják az (IoT) paradigma előnyeit az egyes mérnöki területeken.

A folyamatfelügyelet (Process Monitoring - PM) a megfelelő teljesítmény elérésében játszik kulcsszerepet. Ez a monitoring technika három csoportot egyesít: modell-alapú, tudásbázisú és adat-alapú felügyelet. A másik két módszerhez képest a modell alapú módszer egzakt folyamatmodelleken alapul, például a különböző változók közötti fizikai összefüggések révén. Ennek eredményeként hajlamos pontosabb eredményeket adni, mint a másik két módszer, egészen addig, amíg a rendszermodell megbízható [5].

Ha egy olyan gépészeti szakterületet tekintünk, mint például a gépgyártás-technológia, jól megfigyelhetjük a fenti módszerek alkalmazásának terjedését. Mindemellett az elmúlt évtizedben a technológiai folyamatok sokszínűbbé váltak, s számtalan új gyártási eljárás is megjelent. Az elvárt minőség, a megbízhatóság és a fokozott termelékenység megemelt szintjének ugyanúgy követelmény ezeknél a folyamatoknál is [6][7]. A különböző állapot- és folyamatfelügyeleti

módszerek és eszközök segítenek az említett célok megvalósításában – és egyre nagyobb szerepet is kapnak [8].

Akár a felügyeletet, akár a karbantartási stratégiákat nézzük, ma számos különböző érzékelő típus és mérési eljárás áll rendelkezésünkre. A hagyományos érzékelők alkalmazása továbbra is korlátokba ütközik, és maga a mérés hibával terhelt [9][10]. Azok a mérési módszerek tehát (így a lézeres is), amelyek a többivel szemben érzékenyebben reagálnak a vizsgált fizikai jellemzőre, ebből a szempontból határozott előnyt jelentenek. Ezeknek jó része azonban a mérési módszer vagy a kiértékelés bonyolultsága, vagy egyedi felhasználási területe, vagy műszerezettségi igénye, költsége miatt nem terjedtek el [11][12]. Mondhatjuk ezt szinte valamennyi optikai eljárásra is, egyedül talán a CCD-szenzoros érzékelők alkalmazása jelent kivételt [13]. A lézer, mint mérőeszköz közel egy évtizede még költséges eszköz volt [14], mára azonban felhasználási köre kiszélesedett, egyrészt a jelentős árcsökkenés, másrészt az elektronikai ipar intenzív fejlődésének következtében. Nagyfelbontású kamerák, a helyi számítási feladatokat is ellátó intelligens eszközök, beágyazott rendszerek, mikrovezérlők térhódítása mellett a lézerek használata egyre gyakoribb [15].

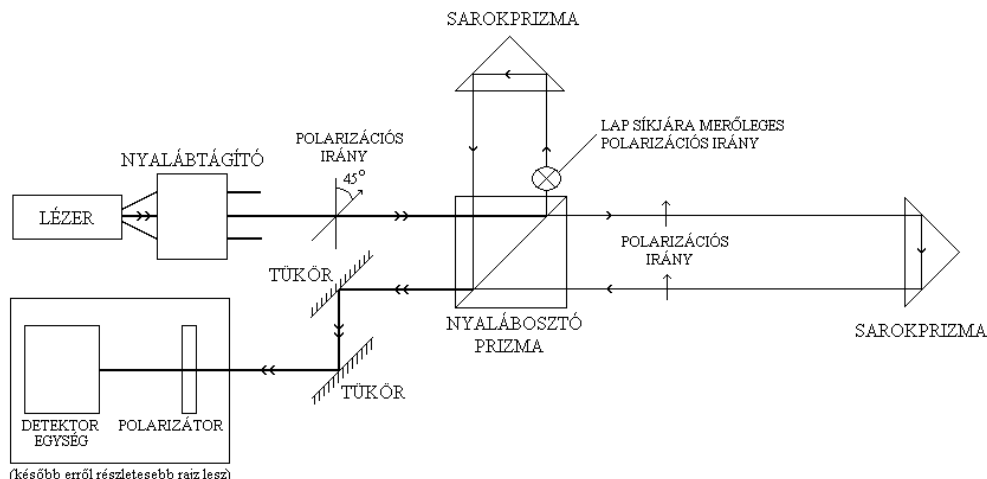
A lézerinterferometrikus eszközök távolról, nagy pontossággal és megbízhatósággal képesek mérni a mozgás paramétereit. Például az elmozdulást minimum  $0,1\mu\text{m}$  pontossággal, erre a pontosságra azonban a legtöbb mérnöki alkalmazásban nincs szükség. Ugyanakkor ezek az eszközök igen kényesek az elhelyezésükre (pl. rezgésmentes asztal), nem miniatürizálhatóak tetszés szerint, és eléggé drágák is. Ezen okok miatt jelenleg még számos mérnöki területen nem tekintik őket valóságos alternatívának. Részben ilyen az általunk választott két terület is: a gépipari fúrásoknál fellépő fúrószár rezgések és az épületek falainak szubmikronos rezgéseinek lézerinterferometrikus vizsgálata. Ilyen értelemben ez a disszertáció tekinthető egyfajta útkeresésnek is.

## 2.2 A LÉZERES MOZGÁSANALIZÁLÓ MÓDSZEREK ÁTTEKINTÉSE

### 2.2.1 PRECÍZIÓS LÉZERINTERFEROMETRIKUS MÓDSZEREK

#### 2.2.1.1 A MICHELSON TÍPUSÚ LÉZERINTERFEROMETRIKUS MOZGÁSANALIZÁTOR

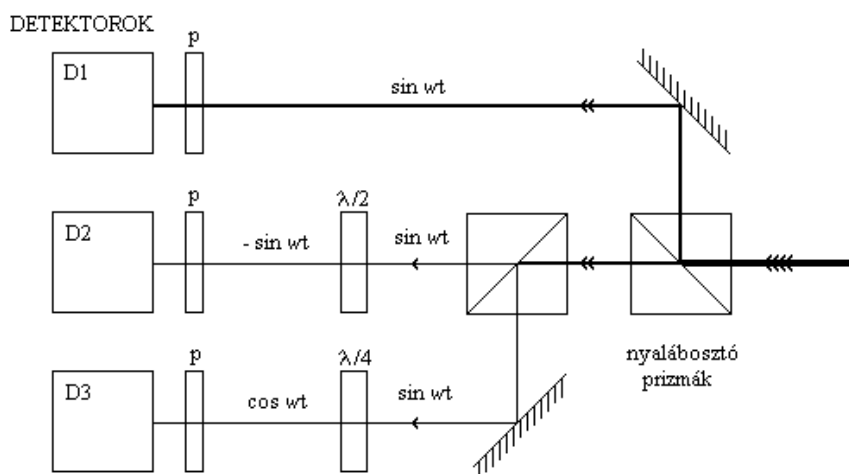
Az általunk épített Michelson-interferométerben a polarizáció felhasználásával a pontosságot kétszeresére növeltük és a mozgás irányát is mérhetővé tettük. A megnövelt pontosság  $\lambda/8$ . Az irodalomban számos hasonló megoldás található [16]. Az intézeti lézerinterferométer optomechanikai vázlatát az 1. ábra mutatja. Az interferométer „lelke” egy hőmérséklet stabilizált, egymódusú He-Ne lézer (UNIPHASE-1007). A módusának a frekvenciája  $4,7375 \cdot 10^{14}$  Hz, amely vákuumban 632,82 nm, normál levegőben 632,64 nm hullámhossznak felel meg. A nyalábtágítóval formált lézernyalábot a polarizációs osztóprizma két kb. egyforma intenzitású, egymásra merőleges nyalábra bontja, amelyeknek a polarizációja is merőleges egymásra. Az egyik nyaláb a referencia sarokprizmából (az ábrán fent), a másik a mozgatható mérő sarokprizmából (az ábrán jobbra) fog visszaverődni. A nyalábok abban a polarizációs osztóprizmában találkoznak újra, ahol előzőleg szétváltak. A két nyaláb fázisviszonyát a két ág úthossz különbsége fogja meghatározni. Ennek az útkülönbségnek természetesen a lézer koherencia hossz tartományán (ami néhány méter lehet) belül kell lennie.



1. ábra: Az intézeti lézertérferométer opto-mechanikai vázlata

Az egyesített nyalábot tükrök segítségével vezetjük a detektor egységbe. Ott a lézernyalábot osztóprizmák segítségével három részre bontjuk. Ezeket - megfelelő fázistolások ( $0$ ,  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ) kialakítása után, megfelelő orientációja polarizátorok mögött - három egymástól független fotodióda (BPx61) érzékeli. Ezen fotodiódák jelei közül az D1 és D2 jelek egymáshoz képest ellenfázisban-, míg az D1 és D3  $90^\circ$ -os fázisban van (2. ábra).

A detektorrendszer tehát összességében  $90^\circ$ -onként (negyed periódusonként) érzékel maximumot (vagy minimumot). A jelen eszközben a mérés ezek detektálására van alapozva, tehát az elérhető pontosság fény úthossz változás tekintetében  $\lambda/4$ . Ez pedig  $\lambda/8$  mérőági sarokprizma elmozdulásnak felel meg (mivel a fény oda is és vissza is megy). A három detektor jelsorrendje megadja a mérőkar mozgásirányát is.



2. ábra: A detektor rendszer (az 1. ábra bal alsó sarka) részletezve

Ahogy a bevezetőben is utaltunk rá, az eddig bemutatott elemek (lézer, optika, detektorok) időtállóan bizonyultak, azonban az analizátor vezérlő- és adatgyűjtő rendszerének felújítását el kellett végeznünk. Ezekről a fejlesztésekről – amelyeket a Fizikai Intézetben valósítottuk meg, a Wigner Fizikai Kutatóközpont támogatásával [17] – a saját mérések között számolunk be.

A lézertérferometriai mozgásanalizátorok csak egymódusú lézerekkel működnek megbízhatóan. Mivel a bennük lévő He-Ne lézerek erősítési görbéje szélesebb a módus



távolságnál, ezért megbízható, tartós egymódusú működés csak megfelelő hőmérsékleten stabilizált lézerekkel lehetséges. Ezt a hőmérsékletet az interferométer gyártásakor pontosan beállították, az azóta elmúlt több mint 30 év alatt azonban az esetlegesen bekövetkezett változások miatti utánállításra nem volt lehetőség. A fejlesztés során ezt az után állítást is el kellett végeznünk.

### 2.2.1.2 AZ LDV (LASER DOPPLER VIBROMETER)

Elsődlegesen sebességet mér, a működési elvét tekintve tehát alapvetően különbözik az előző pontban ismertetettől az LDV készülék. Ebben a kategóriában a Fizikai Tanszék egy Polytech PDV-100 típusú eszközzel rendelkezik [18]. A két különböző elven működő precíziós készülékekkel történő szimultán mérés, a mérési eredmények egybevetése, a különbségek elemzése mindenképpen izgalmas mérnöki feladat.

Az LDV berendezésből kijövő lézersugarat a vizsgálni kívánt objektum egy felületére kell fókuszálni, s e felület rezgésének sebességfüggvényére lehet következtetni a visszavert lézerfény frekvenciája segítségével a Doppler-effektus alapján[19]. Az LDV kimenete általában egy folyamatos analóg feszültség jel, ami egyenesen arányos a vizsgálandó sebesség lézersugár irányú komponensével. Az LDV rendszereknek előnye más hasonló mérőberendezésekkel szemben (mint pl. gyorsulásmérők), hogy könnyen vizsgálhatók vele nehezen hozzáférhető területek, vagy túl kicsi, vagy túl meleg felületek, melyekre nem tudunk egyéb fizikai energia átvivő egységet helyezni. Ugyanakkor hátránya, hogy csak pontbeli mérést tesz lehetővé.

Nevéből is adódik, hogy a mérési elv alapja a Doppler-effektus. Lényege, hogy ha a hullámforrás és a megfigyelő egymáshoz képest mozog, akkor a megfigyelő a hullám frekvenciáját és hullámhosszát a kibocsátott hullámétól eltérőnek fogja érzékelni. Ez az effektus, mely felfedezőjéről a Doppler-effektus nevet kapta, igen sok műszaki alkalmazásnak (mint a sebességmérés) képezi alapját.

Az akusztikai Doppler effektusnál a közeghez képest a megfigyelő és a hullámforrás is mozoghat  $v_m$ , illetve  $v_f$  sebességgel. Mindkét mozgás arra vezet, hogy a megfigyelő az eredeti  $f_0$  frekvenciától eltérő  $f$  frekvenciát érzékel. Ezeket közösen a

$$f = f_0 \frac{c \pm v_m}{c \mp v_f} \quad (1)$$

képletbe foglalhatjuk, ahol  $c$  a hullám fázissebessége az adott közegben, a felső előjelek a közeledésre az alsók pedig a távolodásra vonatkoznak.

Ha  $v$  sebességgel mozgó tárgyról visszaverődő hullámot detektálunk az álló hullámforrás mellett, akkor mindkét típusú mozgással számolni kell. Ugyanis a vizsgált mozgó tárgy először „érezkeli” a hullámot (mozgó megfigyelő), majd „kibocsátja” (mozgó forrás). A végeredmény közeledő visszaverő tárgy esetén:

$$f = f_0 \frac{c + v}{c - v} \quad (2)$$

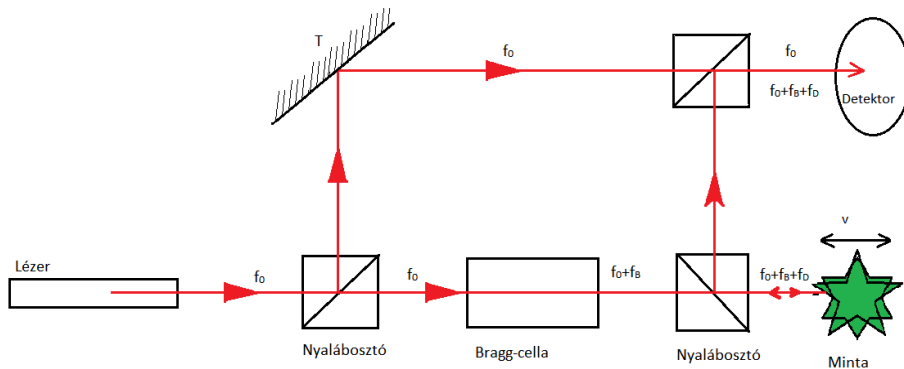
(Távolodó visszaverő tárgy esetén az előjelek ellentétesek.) Megjegyezzük, hogy ha a vákuumban terjedő fényt tekintjük, akkor a közeghez képesti mozgás értelmetlen, tekintve, hogy a relativitáselmélet szerint csak a relatív mozgás értelmezhető. Ez azonban nem befolyásolja a (2) képlet alkalmazhatóságát.

A vibrométer általában egy két lézersugaras interferométer, ami méri a frekvencia (vagy fázis) különbséget egy belső referencia nyaláb és a mérősugár között. A leggyakoribb típusú lézer egy LDV-ben a hélium-neon (He-Ne) lézer, de alkalmaznak lézerdiodákat, szálézereket és Nd:YAG lézereket is. A mérősugár a céltárgyra irányul és az arról szóródott fényt összegyűjtjük és interferáltatjuk a referencia sugárral a fotodetektoron (ami jellemzően fotodióda). A megfelelő frekvencia viszonyok eléréséhez a kereskedelmi vibrométerek esetén [19] tipikusan 20-40 MHz eltolás (esetünkben 20 MHz) szükséges a két lézersugár között. Ezt egy Bragg-cella, más néven akusztó-optikai modulátor segítségével érik el. A 3. ábra szemlélteti a vibrométer vázlatos felépítését. A lézerből érkező ( $f_0$  frekvenciájú) lézersugarat az első nyalábosztó osztja szét az ún. referencia- és mérősugárra. A mérősugár áthalad a Bragg-cellán, amely  $f_b$  frekvenciátolást ad hozzá, ez a lézersugár van a céltárgyra irányítva. A tárgy mozgása pedig hozzáad egy  $f_d$  Doppler-eltolást:

$$f = f_0 \frac{c+v}{c-v} @ f_0 \left(1 + 2\frac{v}{c}\right) = f_0 + f_d \quad (3)$$

Tehát

$$f_d = 2f_0 \frac{v}{c} = 2\frac{v}{\lambda} \quad (4)$$



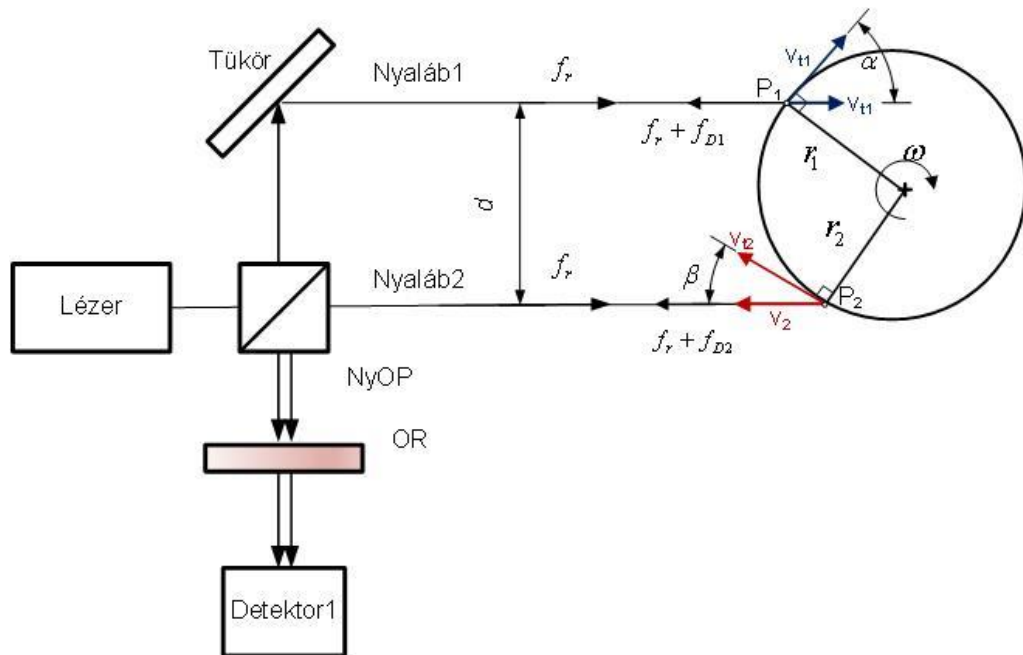
3. ábra: A vibrométer vázlatos felépítése

Mindez természetesen csak akkor igaz, ha nincs „koszinuszos” hiba, azaz ha a lézersugár és a sebességvektor párhuzamos. A fény a céltárgyról minden irányba visszaverődik, de a fény egy részét összegyűjti az LDV optikája és a nyalábosztón keresztül a fotodetektorra tükrözi. Ennek a fénynek a frekvenciája egyenlő  $f_0+f_b+f_d$ -vel. Ez a szórt fény interferál a referencia nyalábbal a fotodetektoron. A találkozó két hullám frekvencia különbsége is megjelenik ( $f_b+f_d$ ), mely érték a 10 MHz-es tartományba esik. Ez olyan intenzitás hullámzás, amelyet a fotodetektor már tud érzékelni (az eredeti  $10^{14}$  Hz-es változást nem tudja követni). A fotodetektor kimenete egy standard frekvencia-modulált (FM) jel, a Bragg-cellával mint vivőfrekvenciával és a Doppler-eltolással mint modulációs frekvenciával. Ebből a jelből demodulációval a céltárgy sebességének időfüggése meghatározható.

### 2.2.1.3 AZ LTV (LASER TORSION VIBROMETER)

A lézernyaláb irányának vonalában történő rezgéseket – amint azt az előző fejezetben bemutattuk – az LDV módszerrel tökéletesen mérhetjük. A fűrészi folyamat során azonban torziós rezgések is

történnek. Ezeket egy továbbfejlesztett Doppler interferometrikus módszerrel az LTV-vel (Laser Torsional Vibrometry) mérhetjük [14],[20]-[24].



4. ábra: Az LTV módszer (szögsebesség mérése kétsugaras technikával)

Ebben a módszerben a nyalábosztó prizmával (NyOP) kettéosztott lézernyaláb mindkét fele a forgó tárgyra (jelen esetben a forgó fúrószárra) esik. A 4. ábraán ezek a  $P_1$  és  $P_2$  pontok. A két nyaláb párhuzamos, a közöttük lévő távolság ( $d$ ) rögzített. Az általunk használt eszközben  $d=7.5$  mm, tehát a fúrószár átmérőjének ennél nagyobboknak kell lennie.

A  $P_1$  és  $P_2$  pontokról visszaverődött lézernyél különböző Doppler eltolódásokat szenved el ( $f_{D1}$  és  $f_{D2}$ ). Csak a lézernyaláb irányába mutató sebességkomponensek okoznak Doppler eltolódást:

$$f_{D1} = -2 \frac{v_1}{\lambda} = -\frac{2\omega r_1 \cos(\alpha)}{\lambda} \quad \text{és} \quad f_{D2} = 2 \frac{v_2}{\lambda} = \frac{2\omega r_2 \cos(\beta)}{\lambda}. \quad (5)$$

A távolodó  $P_1$  pontról visszaverődő lézernyél Doppler eltolódása természetesen negatív, de a közeledő  $P_2$  pontról pozitív. Ezt követően a két  $f_1=f + f_{D1}$  ill.  $f_2=f + f_{D2}$  frekvenciájú reflektált lézernyaláb, interferál egymással. Az eredő nyaláb intenzitása a két frekvencia különbségével fog változni (lebegni):

$$\Delta f = f_2 - f_1 = f_{D2} - f_{D1} = \frac{2\omega}{\lambda} (r_1 \cos(\alpha) + r_2 \cos(\beta)) = \frac{2\omega d}{\lambda} \quad (6)$$

mivel

$$d = r_1 \cos(\alpha) + r_2 \cos(\beta) \quad (7)$$

Vagyis az utóbbi összefüggés a végeredményt igen leegyszerűsítette: az eredő hullám intenzitása hullámszásának frekvenciája (a fotodetektor által mért áramjel változó összetevője) egyenesen arányos a pillanatnyi szögsebesség értékével. Az arányossági tényező  $2d/\lambda$ , ahol  $d$  a két lézersugár távolsága. Csak ez az adat számít, minden más geometriai adat érdektelen. Az általunk kölcsönvett készülék esetében  $2d/\lambda = 2.37 \times 10^4$  (dimenziótlán). (Ez egyébként a He-Ne lézer

633nm-es hullámhosszából és a két lézersugár 7,5mm-es távolságából könnyen ki is számolható.) A gyakorlatban a szögsebességet két részre szokás osztani: állandó rész  $\omega_0$  és változó rész  $d\omega$ , minket természetesen ez utóbbi érdekel.

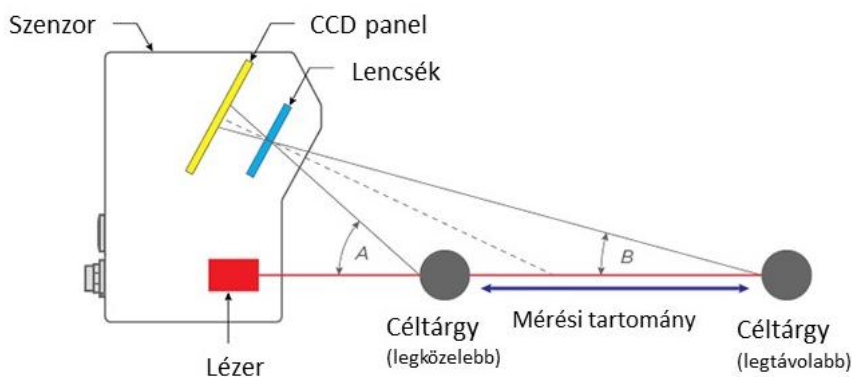
## 2.2.2 EGYÉB, A GÉPIPARBAN HASZNÁLT LÉZERES (OPTIKAI) MÓDSZEREK

Általában elmondható, hogy a precíziós lézerinterferenciás módszerek kielégítik a gépipar legkényesebb igényeit is, hisz a pontosságuk a fény hullámhosszának tört része (a 0,1  $\mu\text{m}$ -es tartományba vagy az alá esik). Ez a pontosság azonban különleges követelményeket támaszt a berendezések elhelyezésével kapcsolatban (pl. rezgésmentes asztal), amelyet a legtöbb műhelyben nem lehet teljesíteni. Ha megelégszünk a fény hullámhossz tartományába eső (tehát  $\mu\text{m}$ -es) pontossággal, akkor újabb mérési módszerek is képbe kerülhetnek. Ezek a módszerek nem tartoznak szorosan e munka tárgykörébe, mégis foglalkoznunk kell velük. Például azért, mert az irodalmi áttekintésben kikerülhetetlenek.

A legszélesebb körben használt lézeres távolságmérők működése a rövid lézerimpulzusok repülési idejének (TOF = time of flight) mérésén alapul [25][26]. Ezekben a kompakt műszerekben az elérhető időfelbontás jelenleg a pikoszekundum ( $1\text{ps}=10^{-12}\text{s}$ ) tartományba esik, az ennek megfelelő távolságmérési pontosság pedig kb. 1mm. Ez még a tolómérők pontosságát sem éri, tehát a precíziós gépiparban egyelőre nem jöhetnek szóba. (Megjegyezzük, hogy laboratóriumi körülmények között már a femtoszekundumos ( $1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$ ) időfelbontás és az ennek megfelelő 1  $\mu\text{m}$ -es távolságmérési pontosság is elérhető. Ez pedig előbb-utóbb meg fog jelenni a kompakt kézi műszerekben is.) Szóba jöhet viszont az alábbi két módszer [27].

### 2.2.2.1 A LÉZERES HÁROMSZÖGELÉSI MÓDSZER

A módszer vázlatát az 5. ábra mutatja be. A fókuszált lézernyaláb a céltárgyra esik. Ezt a fénypontot az optika egy helyzetérzékeny detektorra (pl. CCD panel) képezi le. A képpont helyzete és a céltárgy távolsága egyértelmű kapcsolatban van egymással. Az 5. ábra alapján rögtön szembetűnik a módszer hátránya is: a lézernyaláb beesési iránya és a mérési irány szöget zár be egymással.



5. ábra: A lézeres háromszögeléses módszer

A háromszögelési elven alapuló lézeres elmozdulásmérők ugyanakkor igen széles körben elterjedtek az utóbbi néhány évben. Az egy ponton mérő lézeres háromszögelés-érzékelő gyakran használt eszköz például a felületprofil mérésére [28][29]. Gyors válaszidő mellett egyszerű felépítéssel, jó ismétlési pontossággal, nagy érzékenységgel és viszonylag széles működési

tartománnyal rendelkeznek. A háromszög alapú kereskedelmi rendszerek a mérési tartományától és technikai megvalósításától függően az érzékelési tartomány pontossága 3 és 300  $\mu\text{m}$  között változik.

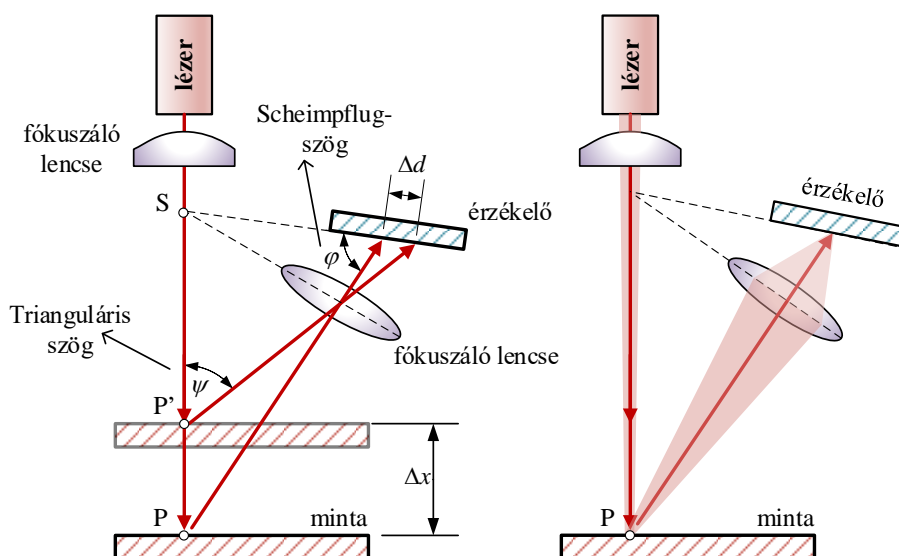
Az interferometrikus elven működő elmozdulásmérőkkel szemben nagyon egyszerű módszert használ az elmozdulásmérésre. Érzékelési jellegét tekintve kicsit hasonlít a lézeres interferometrikus enkóderekre, ahol azonban egy rács segítségével történik a mérés nehezen legyártható optikai konfigurációkat alkalmazva [30].

A háromszögelés szögszámítással történő távolságmérést jelent. A mérési felületre egy lézert foltot vetítünk (6. ábra). A fény egy része szétszóródik a felületről. A visszavert fényt CCD panelen fókuszálják. Ha a diffúz felületnek van olyan elmozdulásból származó összetevője, amely párhuzamos a rávetülő lézer irányával, akkor a felületen lévő fényfoltból visszaverődő fénynek a detektorlencse tengelyével párhuzamos és merőleges elmozdulás-összetevője van. A Scheimpflug-feltétel teljesülése esetén ez azonban egyirányú elmozdulásra transzformálható oly módon, hogy a detektor gyűjtőlencse csak a tengelyre merőleges komponensre lesz érzékeny. A Scheimpflug-feltétel szerint ugyanis ferde tárgysíkról az objektív akkor ad a képsíkon megfelelő élességet, ha a lencse tengelysíkjának és a detektornak (mint képsíknak) a metszsvonala a lézersugár haladási vonalán és a leképező síkra merőlegesen (élességi sík) metszi egymást (a 6. ábra bal oldalán S-el jelölt vetület). A detektor a leképezett fényfolt intenzitásmaximumának helyét számolja ki [31][32]. Ennek pozíciója (referenciaponttól mért távolsága) a tárgy lézerirányú elmozdulásával összefüggő trianguláris szögtől függ. A képpont detektoron történő elmozdulásával meghatározható a felület lézer irányú elmozdulása.

A mérési bizonytalanság különböző lehetséges forrásai a szenorgeometria, a lézersugár mérete és a lézerfény szóródás mértéke [33]. Utóbbi paraméter azonban valamennyi lézeres mérési módszernek is hibaforrása [34].

Kutatások során előfordult a fenti méréstípusnak a két érzékelős változata is. Két külön látószöggel rendelkeznek, melynek révén változó színű vagy visszaverő képességű felületeken, vagy árnyékoló felületelemekről visszavert jelek esetén is jó érzékelési pontosságot adnak. Ezáltal kisebb lézert folt méretet lehetett használni a vizsgálatokhoz.

Mikrométeres felbontású távérzékeléssel kapcsolatban további ismereteket lehet találni [27]–ben.

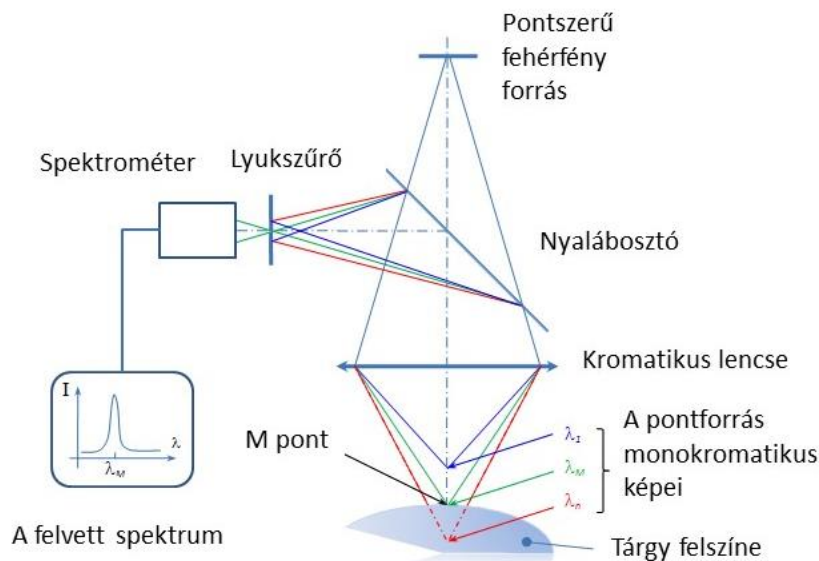


6. ábra: Háromszögeléses távolságmérés sematikus vázlatja, és a nyalábforma

2.2.2.2 A KONFOKÁLIS TÁVOLSÁGÉRZÉKELÉS

Ez a módszer szigorúan véve nem lézeres módszer (mert fehér fényű fényforrást használ), de rendelkezik a kontaktusmentes lézeres módszerek minden előnyével. A módszer a lencsék színi hibáját is eredményező diszperzió alapul, ami miatt a fehér fényforrás fényét egy lencserendszer a hullámhossz függvényében más-más fókuszponttal fókuszálja. Ebben az alkalmazásban kimondottan a nagy színi hibájú (nagy kromatikus aberráció) leképezés a cél, amit nagy diszperziójú üvegből készült lencsével érhetünk el. A konfokális távolságérzékelők elvi felépítését a 7. ábra mutatja.

A pontszerű fehérfény forrás fényét a nagy kromatikus aberrációjú lencserendszer a mérendő tárgy felszínére fókuszálja. Természetesen csak egyetlen színi komponens lesz, amelynek a fókusza pont a tárgy felületére esik (az ábrán ez a középső - színesben zöld - komponens). A céltárgy által visszavert fény visszafelé is áthalad a lencserendszeren, tehát a zöld komponens pontosan a pontszerű fényforrásra fókuszálná. Ezt megelőzően azonban a visszavert fényt egy nyalábosztóval eltérítjük, így a fókuszpont egy lyukszűrőre kerül. Ha a lyuk helyét és átmérőjét jól választjuk meg, akkor a fókuszált fény (az ábrán a zöld fény) teljes egészében átjut rajta, míg a többi szín csak töredékesen. Ha a távolság változik, akkor egy másik szín fókusza esik a tárgyra, és visszaverődés után ennek a színnek a fókusza esik a lyukszűrő lyukára és ez detektálódik.



7. ábra: A konfokális távolságérzékelők elvi felépítése

A vevőbe jutó fény hullámhosszát megállapítva következtethetünk az érzékelő és a céltárgy távolságára. A műszer tehát egy jó minőségű optikai spektrométert is tartalmaz. A lencserendszert és lyukszűrőt tartalmazó mérőfej száloptikával kapcsolódik a távolabb lévő alpműszerhez (amely a jó minőségű optikai spektrométert is tartalmazza).

## 2.3 A LÉZER, MINT MÉRŐESZKÖZ GÉPGYÁRTÁSTECHNOLÓGIAI ALKALMAZÁSA

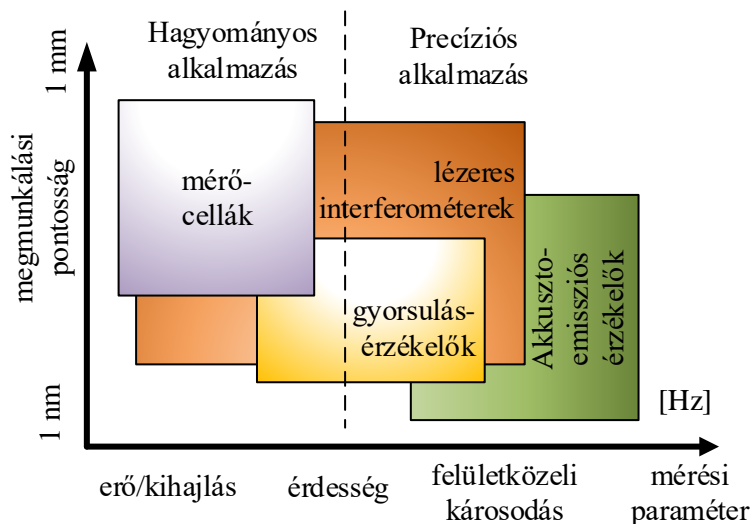
### 2.3.1 FORGÁCSOLÓ MEGMUNKÁLÁSOKNÁL HASZNÁLT LÉZERES ELJÁRÁSOK

A gyártási rendszerekben kiemelt szerep jut a hatékony termelékenység fenntartásának. A mutatók növekedésének mozgatórugója a gyártási idő csökkentése. Ennek egyik módja az egyes termelési lépések felgyorsítása, például a megmunkálási sebesség növelése. Ez azonban újabb problémákat vet fel. Gyártórendszerekben a folyamaton belüli metrológia ugyanakkor lehetővé teszi a pontosság javítását és a megmunkálási idő csökkentését az áthelyezési és beállítási műveletek kiküszöbölésével [35]. vagy állapotfelügyeleti rendszerek bevezetésével.

A 2. fejezetben leírt lézeres mérési eljárások érintkezés nélküli pontos információszerzést tesznek lehetővé. Így akár a gyártási folyamat közben is lehetővé válik egy újabb független jelforrás, mellyel akár potenciálisan helyettesíthető néhány korábbi mérési eljárás is.

Az említett lézeres eszközök közül a trianguláris mérőeszköz az iparban ma már elterjedt eszköznek számít, legyen szó akár hegesztőfej pozicionálásról, robotmozgatásról, útfelületellenőrzésről vagy akár rétegvastagság vizsgálatról, stb. [36]. De a gépgyártásban is egyre több példát találunk.

Az LDV-s mérések az elmúlt időszakban hatalmas fejlődésen mentek keresztül. A fordulatszám ellenőrzésen keresztül egészen a 3D-s mérésekig számtalan alkalmazása ismert [21][37][38], és egyre gyakrabban fordulnak elő gyártó eszközök, folyamatok vizsgálatában is. A 8. ábra ultraprecíziós megmunkálások esetén felhasznált érzékelőkről ad felvilágosítást. A vízszintes tengely nemcsak az érzékelők által megfigyelt paramétereket, hanem egyúttal az egyes érzékelőtípusok mérési frekvenciatartományát is mutatják. Meg kell jegyezni, hogy az ábra inkább tájékoztató jellegű. Egyes különleges esetek ettől az általános besorolástól eltérhetnek.



8. ábra: Ultraprecíziós megmunkálásnál monitoringhoz használt érzékelők ([39]alapján)

### 2.3.2 LÉZERES MÉRÉS ESZTERGÁLÁSNÁL

Az esztergálás mint az egyik legrégebbi megmunkáló eljárás gyakran képezi vizsgálat tárgyát. Sok bevált mérési módszer alakult ki tanulmányozására. Jellemzően a főorsó áramfelvétele alapján számolt teljesítményfelvételt használják az állapotfelügyelet alapját képező bemeneti paraméterként. A teljesítményalapú TCM (Tool Condition Monitoring) elsősorban azonban a szerszám élettartama végső állapotának azonosítására használható; és kevésbé felel meg a szerszámtörés és hasonló egyéb hirtelen események hatékony észleléséhez [40].

Esztergálásnál a lézerrel egyszerűbb méréseknél is találkozhatunk. Korai és ma is előforduló alkalmazása fordulatszám-mérőként történik. Mindenekelőtt az implementálása egyszerű, akár a tokmányról levett jelet is mérhetjük vele. Urbakain és társai is így használták a lézert, amikor az SSV (orsósebesség-variációs technika) gyakorlati megvalósítási lehetőségeit vizsgálva CNC eszterga központon méréseket végeztek [41]. A jobb stabilitási határok és az orsó elfogadható viselkedése közötti egyensúlyt itt is az energiafogyasztás mérése biztosította. A visszaszabályozáshoz pontos fordulatszámadatakra volt szükség. Ezen adatokat a lézer szolgáltatta – sikeresen.

Másik felhasználásaként mint felületi letapogatási módszert kell megemlítenünk. Nemcsak az esztergálásnál, hanem egyéb forgácsolási megmunkálásnál is alkalmazott eljárás. A szerszám és a megmunkált felület ellenőrzésére egyaránt alkalmazott eljárás. Kiss Ádám és kollégái nemrég megjelent cikkükben esztergálásnál fellépő öngerjesztett rezgések okaira kerestek választ [28]. A megmunkálási folyamat során keletkező rezgések dinamikus viselkedésének jellemzőit a megmunkált felület érdességének méréséből származó eredményeknek az elméleti összefüggésekkel történő összehasonlításából nyerték. Erre a célra ipari lézeres differenciál elmozdulás mérőt alkalmaztak, amellyel mérték a felület eltérését az ideális geometriától. A legtöbb felület esetében ugyanis a normál tükröződés és a diffúz visszaverődés aránya felület érdességének függvénye. Ennélfogva a visszavert fényminta a felület jellemzőire vonatkozó információkat hordoz. Méréseik során az érzékelő megfelelő pontosságot biztosított a detektáláshoz. Korlátként merült fel, hogy a lézerfolt nem ideális pont, hanem ellipszis alakú. Mivel az érzékelő a felület érdességének átlagát méri – ráadásul nem szimmetrikusan – ez a hatás valóban mint mozgó átlag jelentkezik a mérés vonala mentén. A folt aszimmetriájával gyakran akkor találkozunk, ha a műszer félvezető lézert használ. Ilyen esetben mérlegelni kell a mérési távolságot. A térbeli módusú félvezető szilárdtest lézereknél (SD) ugyanis a félvezető lézer sugár mind az aktív rétegre merőleges irányban, mind azzal párhuzamosan csak megfelelő távolságból tekinthető Gauss-eloszlásúnak [42], vagy Lorenz-eloszlásúnak [43]. Ezért ezeknél a méréseknél – a lézer típusa miatt – a mérési távolság mindig problematikus.

Hasonló lézeres alkalmazás szerepelt Wong és kutatócsoportjának egy korábbi kísérletsorozatában [44]. Cikkükben olyan optikai módszert mutattak be, amely a visszavert lézerfény szórás mintázatát használja fel a szerszám állapotának nyomon követésére, nagyolás esetén. A mérés során egy kis teljesítményű He-Ne gázlézer fénysugara verődött vissza a munkadarab felületéről, melynek szórt fényét digitális fényképezőgéppel rögzítették, majd a megfelelő képfeldolgozási technikákkal elemeztek. A kapott mintázat átlagát és az intenzitásképre vonatkozó szórását vizsgálták. Ezzel a módszerrel akár a lézer hullámhossza 1/8-ának megfelelő érdességet is detektálni lehet. Természetesen ahhoz, hogy a szerszám kopását elemezni lehessen, a felület minőségét, az optikai paramétereket és a szerszámdegradációt illeszteni kellett egymáshoz. Tapasztalataik szerint a felületi minőség, a szerszámkopás és az optikai jellemzők nem mindig vannak teljesen összhangban egymással, mert számos faktor függvénye. A szórt lézermintázat önmagában nem korrelál a szerszámkopással, a minta intenzitáseloszlása viszont igen – de csak a kopás korlátozott tartományában.

Öngerjesztett rezgéseket vizsgáltak Prasad és társai, de már egy LDV-vel végzett kísérletsorozat során. Tanulmányukban [45] a munkadarab rezgése, a szerszám kopása, és a megmunkált felület texturája között keresték a kapcsolatot. Homlokesztergálásnál lézerrel mérték az előtolás irányú rezgést. A kapott jelből FFT spektrumot képeztek, majd azt kiértékeltek. Különböző anyagokon, az éles, majd a kevésbé kopott, végül az életlen szerszámmal elvégezve a



méréseket azt tapasztalták, hogy a szerszám kopásának előrehaladtával a frekvenciatartományban is – az elvárásoknak megfelelően – emelkedtek a rezgési amplitúdók. A rezgés további növekedése a munkadarab és a vágószerszám között fellépő egyre nagyobb súrlódóerőnek tulajdonították, amely egyúttal a szerszám kopásának a következménye.

Prasad egy másik cikkében a forgácsolási körülmények közül egyszerre használták fel a forgácsolási hőmérsékletet és a rezgésjelek dinamikai jellemzőit [46]. Az előtolás irányú rezgések adatainak kinyerésére ortogonális forgácsolásnál LDV-t használtak, a hőmérsékletet pedig infravörös termográfiai módszerrel mérték. Céljuk egy kísérleti adatbázisnak a létrehozása volt a szerszám kopásának detektálására és nyomon követésére. Kísérleteik során kapcsolatot mutattak ki a rezgések, forgácsolási hőmérséklet és a szerszámkopás közt, a fordulatszám függvényében.

Az esztergáláshoz köthető, de már a következő fejezetet is érinti Venkata Rao és munkatársai cikke [47], amelyben a szerzők a forgácsolási sebesség, az előtolás és a forgácsolólapka csúcscsugarának hatásait elemezték furatesztergálásnál. A rezgések ennél az eljárásnál különösen abban az esetben jelentenek problémát, amikor a szerszám még a furatmegmunkálás kezdeténél tart, s nagy része a furaton kívül helyezkedik el. Az LDV-vel szintén a munkadarab rezgését figyelték, majd a jel FFT spektrumát felvéve összehasonlították az érdességi, kopási paramétereket a rezgési amplitúdókkal.

Furatesztergálás közben olyan esetben is végeztek lézeres méréseket, amikor a megmunkálási eljárást kívülről generált rezgések segítik [48]. Chern és Liang piezo-kristályos rezgetőt használva a szerszámot előtolás irányban rezgette. Céljuk a keresztvező furatok minőségi javítása, valamint a felületi érdesség csökkentése volt. A furatok keresztveződésnél ugyanis akár jelentős sorjázatok is kialakulhatnak, melyek például szelepeknél áramlástechnikai gondot okoznak. Vizsgálataikban a lézerek kiegészítő szerep jutott. Lézeres elmozdulásmérővel a rezgési amplitúdókat elemezték. A mintavételezési frekvenciája 50kHz volt, míg a szerszámot gerjesztő frekvenciát 14 kHz-ig tudták változtatni, így egész magas frekvenciákat is vizsgálni tudtak.

### 2.3.3 FÚRÁSI FORGÁCSOLÁSI FOLYAMAT VIZSGÁLATA LÉZER SEGÍTSÉGÉVEL

Az előző két anyagválasztási művelethez képest a fúrásnál még kevésbé jellemző, hogy lézert érzékelő jelforrásként használnák. Az utóbbi időben ugyan több cikk is megjelent az LDV fúrás közbeni alkalmazásával kapcsolatban [48][49][50], de korántsem mondható gyakran felhasznált módszernek. Előnyei pedig éppen ennél az eljárásnál válhatnak dominánssá.

Elektronikusan érintés nélküli mérési technikák, például induktív és kapacitív elmozdulás-érzékelők korlátozott lehetőséget nyújtanak érintés nélküli mérésre. Ezek csak a közeli mérésekre korlátozódnak, és érzékenyek a hőtágulásra, ezért két párba kell őket rendezni [51]. A fúrásnál nincs lehetőség a forgácsolás folyamatának közvetlen ellenőrzésére – mivel az közvetlenül nem figyelhető meg. Így csak közvetett mérési eljárások segítenek a munkavégzés közbeni jelenségek megértésében, akár egy TCM stratégia megalkotásában. Részben ez is oka, hogy a szerszám, és nem a munkadarab rezgéseit célszerű vizsgálni [52]. Ha magát a szerszámot mérjük, jobban megfigyelhetőek az egyes forgácsleválasztási lépések.

A 2.3.2 fejezetben is megemlített kísérleteiben Chern és Liang például kis átmérőjű furatok esetére is megismételte ugyanazokat a rezgésvizsgálatokat, amelyeket furatesztergálás során is már elvégzett. A felhasznált lézeres elmozdulásmérő méréstartománya (50kHz) tette lehetővé, hogy a nagyobb frekvenciatartományban használt gerjesztést megfelelően tudjuk mérni.

Fúrás közbeni méréseknél jól megfigyelhető volt, hogy addig, amíg (megkötött forgácsolási paraméterek mellett) a fűrészár teljes átmérővel el nem kezd forgácsolni, az egyes időbeli fázisok meghatározott időbeli és frekvenciabeli tartománnyal rendelkeznek [50].

Balaji és társai a forgácsolási sebesség, az előtolás és a horony hajlásszögnek a szerszám élettartamára (kopására) gyakorolt hatásával foglalkozik fúrásnál [53]. Tanulmányában egyetemes esztergán végrehajtott fúrás közben vizsgálta a szerszám rezgéseit Lézer Doppler regésmérővel. A mért adatok alapján állapította meg a rezgésamplitúdók, valamint a kopás, a horonyszög, a felületminőség valamint a rezgési paraméterek közötti kapcsolatot.

### 2.3.4 LÉZERES MÉRÉSEK MARÁSNÁL

A marás az a forgácsolási művelet, amelyet talán felhasználási sokoldalúsága miatt leginkább kutattak/kutatnak. Vizsgálatakor ezért is találkozunk gyakrabban lézeres eszközökkel.

Ryabov és munkatársai egy korai munkájukban [54] lézert alkalmaztak folyamat közbeni szerszámkopás mérésére, továbbá közepes és nagyobb szerszámhibák detektálására. Valós forgácsolási körülmények között kapott zajos jelek mérésének alapját lézeres elmozdulás érzékelők adták és két lézer-szenzort használtak egyszerre. A két lézerral a szerszám vágóélének alakjának ellenőrizték. Mindemellett a kapott jeleket az ellenőrző rendszerbe betáplálva, a fordulatszám-szabályozás szinkronizációs jeleként is felhasználták. Tapasztalataik szerint a felületről történő visszaverődés jellemzői függenek a felület fénydiszperziós tulajdonságaitól, és a beeső fénysugárhoz viszonyított irányától. A gyakorlati méréseknél kapott eredmények alapján a normál és a kopott felületek egyértelműen megkülönböztethetők a felület különbségéből fakadó fényintenzitási mintázatokon keresztül. Bár diszperziós tulajdonságaikban nem különböznek jelentősen.

Tatar és Grin által írt cikkben szintén a szerszám rezgéseinek elemzésével találkozhatunk, gyorsmarásnál [51]. Mivel nagysebességű forgácsolás esetén a főorsó rezgésmérésekor, az alacsony rezgésjel átvitel, a csapágyak zavarai és a motor mágneses zavarai megbízhatatlanná teszik a klasszikus méréseket, ezért új érzékelőt választottak. A szerszám közelében elhelyezett érintés nélküli lézeres érzékelővel oldották meg a feladatot. Kísérleteiknél az LDV nemcsak a szerszám adott pontjának a sebességét mérte, hanem a beépített rendszernek köszönhetően, az elmozdulását is. Ez a lehetőség az alsó frekvencia tartományban jelent igazán előnyt. Ugyanakkor a pszeudo-rezgések megjelenése, továbbá a szerszámszár alakjából származó keresztrezgések miatt, kiegészítő méréseket kellett végezniük.

Faassen és társai által készített munkának a témája is nagysebességű marásnál fellépő, öngerjesztett rezgések voltak [55]. Míg mások a gép dinamikájának és a forgácsolási folyamat viselkedésének leírására állandó paramétereket használnak a teljes főorsó fordulatszám tartományára, ők olyan modellt javasoltak, amely a stabilitási térképek megszerkesztéséhez figyelembe veszi a főorsó fordulatszámot is. Ebben a modellben a gép dinamikája is szerephez jut. A főorsó-szerszámtartó-szerszám rendszer dinamikus viselkedésének mérésére, valamint az orsó sebességének e viselkedésre gyakorolt hatásának megismerésére impulzus kalapáccsal FRF (Frequency Response Function) tesztekert hajtottak végre. Álló és forgó főorsó mellett végeztek méréseket, ahol a rezgéseket ikerszenzoros ipari lézeres (LTS - Laser Twin Sensor) felületvizsgáló érzékelővel vették fel. A lézeres mérés révén 750-1750 Hz tartományban tudtak felállítani frekvencia válasz karakterisztikát. A stabilitási határok finomításához az előző kísérletek náluk is kiegészültek, mégpedig mikrofonos mérésekkel.

Marógépen készültek Rantatalo mérései is [56]. Módszere elsősorban a főorsó rezgéseinek elemzésére irányult. Komplex munkájában a főorsónak, mint forgó elemnek a rendszer stabilitására gyakorolt hatására keresett választ. Megoldása általános, ezért egyéb tokmányba befogott eszköznél is használható.

A főorsó forgácsolásra gyakorolt dinamikai hatásával Österlind és kutatócsoportja is foglalkozott [57], de másoktól eltérően az folyamat közbeni modális elemzés módszerét (OMA – Operational Modal Analysis) használta fel. Statikus méréseknél impulzuskalapáccsal készültek az átviteli függvények, majd OMA-val a működés közbeni paramétereket rögzítették. Kísérleteiknél ők is több különböző érzékelőt használtak. A munkadarab, a szerszámbebefogó és az asztal rezgéseit gyorsulásmérőkkel, míg a szerszám rezgésekre adott válaszát lézer Doppler rezgésmérővel mérték. A mérési eredményeket a rendszer stabilitási térképének elemzéséhez használták fel, vizsgálva a forgácsolás közben az abban bekövetkezett változásokat.

Az öngerjesztett rezgések, mint téma régóta foglalkoztatja a kutatókat. Például Nakagawa és társai egy korábbi cikkükben edzett acélanyagok marásakor keletkezett rezgések felületminőségre gyakorolt hatásait tárgyalják [58]. Mivel a korábban szóba került örvényáramos érzékelőnek egyrészt elhelyezési, másrészt dinamikai jellegű hátrányai voltak (alsó frekvencia tartománybeli érzékelési küszöb) ezért egy LDV-vel mérték meg a marószerszámvég elmozdulását. Méréskor egyszerre két LDV figyelte a műveletet, illetve a szerszámvég egymásra merőleges elmozdulásait. A műszer relatív mérési hibáját azzal igyekeztek korrigálni, hogy a mérési ponttól viszonylag távolra helyezték el a műszert. Kísérleteik során, jó felbontású mérések segítségével sikerült beazonosítani két, különböző típusú öngerjesztett rezgést is, valamint jól meg lehetett figyelni a stabilitási térkép instabil tartományainak változásait.

A szerszám gép-szerszám-munkadarab rendszer dinamikai tulajdonságait vizsgálták Norman és társai is, amelynek során a rendszer dinamikai paramétereinek előzetes meghatározására LDV-t használtak [59]. Mivel a szerszám gép merevsége a változó megmunkálási körülmények miatt maga is változik (pl. a változó csapágy merevség fordulatszámfüggő volta miatt), ezért vizsgálataikhoz próbapadot készítettek. Ezen kerültek ellenőrzésre a rendszer dinamikáját befolyásoló különböző tényezők hatásai. Eltérő terhelési eseteket vizsgálva az LDV-vel mért válaszadatokat kísérték figyelemmel. Úgy határozták meg tehát a rendszer átviteli függvényét, hogy közben a főorsó tengelye mindvégig forgásban - azaz munka közben - volt. Kísérleteik eredményei alátámasztották az érintés nélküli módszerekkel történő vizsgálatok azon előnyét, hogy a mérésnél nem lépnek fel a hagyományos érzékelőknél megfigyelt hátrányok, például a gyorsulásmérők tömegterhelése vagy az impulzuskalapács fejének csillapítása okozta hiba. A méréseket tehát akár a szerszám forgása közben is el lehet végezni, úgy, hogy közben nyomon követhető a rendszer különböző forgási sebességeknél meghatározott átviteli függvényeinek változásait.

### 2.3.5 KÖZÖS TAPASZTALATOK A LÉZERES MÉRÉSEKKEL KAPCSOLATBAN

Mint minden érzékelőtípusnál, a lézeresnél mérési hibát okoznak a beépítésük körülményei, mivel a mért sebességjel relatív. Az LDV-s mérőműszerrel végzett kutatási célú megmunkálási kísérletek során gondot jelent, hogy a készüléket (méréteiből adódóan) gyakran állványra szerelten tudják csak használni [49][60]. Tehát az LDV kimenetén azoknak a rezgéseknek a hatása is megjelenik, amely a lézer „felfogatási” körülményeiből származnak [61][62]. A kézenfekvő megoldásként kínáló, környezettől való elszigetelés azonban gondos előkészítést igényel. Ráadásul alacsony frekvenciák kiküszöbölése esetén igen körülményes. Így nem oldja meg maradandóan ezt a

gondot. Bizonyos esetekben egyáltalán nem küszöbölhető ki. A szerző több társával együtt például egy optikai rezgésmentes asztal segítségével, több különböző mérési összeállításban végzett mérései során olyan rezgéseket is tapasztalt, amelyek még az állvány megválasztásától is függetlenek, magának a mérőeszköznek a jellemzőitől, kialakításából származnak [61].

A probléma azonban felfogható lézertechnikai feladatként is. Norgia és társai egy olyan új önkeverő (self-mixing) interferométert javasolnak, amely az abszolút távolság és az abszolút sebesség egyidejű mérését is el tudja végezni [63]. Lézeres mérési elrendezésük ipari környezetben is alkalmasnak tűnik a rendszeres használatra. További előnye, hogy a mérési sebességet a módszerrel meg tudták növelni. Ezáltal lehetőséget kínál akár egy szórásmintázati hiba okozta, megbízhatatlan mérési adatnak a valós időben történő elvetésére is.

A sebességjel relativitására, mint hibaforrásra kínál egyszerű megoldást Halkon és Rothberg elgondolása [64]. Kísérleteikben a műszert két, a rezgésirányt mérő hagyományos gyorsulásérzékelővel egészítették ki. Gyakorlatilag bebizonyosodott, hogy ha egy, a műszerre tetszőlegesen helyen felszerelt, a lézersugár irányába illesztett gyorsulásmérőt párosítanak egy vele azonos irányban mérő, és a lézersugárra tengelyszimmetrikusan elhelyezkedő második gyorsulásérzékelővel, akkor a műszer saját rezgéseinek amplitúdó- és fázisspektrumai jól korrigálhatók. Ezen kedvező tapasztalatok mellett azonban a korrekciót ronthatja a gyorsulásérzékelő keresztirányú érzékenysége.

Nemcsak a mérés relativitása okoz problémát azonban, hanem a lézerfény polarizált koherens volta is. Ezen tulajdonságú fénycsugár esetén ugyanis, ha a fény optikailag durva felületet világít meg – és ilyen a legtöbb felület –, akkor minden egyes apró felületem koherens fényű pontforrásként fog viselkedni. Az így keletkezett korrelálatlan fénycsugarak által, a szuperpozíció eredményeként sötét és világos foltok szemcsés mintázata alakul ki a detektoron. Az érzékelő több ilyen, ún. foltmintát gyűjt össze egy-egy mintavételezési alkalommal, s a fotodióda áramkimenete ezeknek a pillanatnyi intenzitáseloszlásoknak az összegével lesz arányos [20]. Ha a foltmintázat térbeli és időbeli változásokon megy keresztül (például a céltárgy mérési irányra merőlegesen gyors elmozdulása, vagy hirtelen elfordulása), a Doppler-jel – így a detektor kimenete is – modulálódik a mintázat változása révén [38][65]. A mintázati zaj kialakulása tehát azzal magyarázható, hogy a rezgés során a lézer által megvilágított pont a teljes mozgásidőszak alatt nem volt ugyanaz a pont [66]. Önmagában az interferencia-mintázat hasznos tulajdonság lenne például ha a felület minőségének vizsgálatáról lenne szó. De a rezgésvizsgálat esetén kifejezetten hátrányt jelent, mert a minta közel véletlenszerű módon ingadozik [49][51][67]. A szemcsészettség változásának mért jelre gyakorolt hatása ugyan a mérések átlagolásával csökkenthető [68][69], azonban a mintázat forgás révén bekövetkező „ismétlődéséből” megjelenő álrezgések továbbra is láthatóak a spektrumban. Nemzetközi szakirodalomban használt elnevezésük: pszeudo-rezgések [62][70]. Ha tehát a lézer nagy sebességgel forgó munkadarabot vagy szerszámot pásztáz, akkor a frekvenciaspektrumban az effektus miatt zavaró csúcsokat és magasabb rendű harmonikusokat fogunk [20][38][69][70].

Ezen probléma legegyszerűbb megoldására úgy tűnik, hogy a mérésekhez „optikailag sima” felület készítése lehet jó megoldás [51][59][67]. Azaz egyrészt megtisztított, másrészt simára csiszolt felületet kell kialakítani a jó visszaverődéshez. Ilyen előkészítésre, vagy ezen feltétel tartós biztosítására azonban nincs mindig lehetőség.

A kérdés érdekes hasonlóságot mutat a távméréssel (vagy lézer alapú távérzékelés – LIDAR – Light Detection and Ranging) jelentkező foltzaj jelenségnél tapasztaltakkal. Courville és Sava, bár nem a fémforgácsolás területén dolgozva, munkájában felhívja a figyelmet arra, hogy egyetlen

LDV, amely két, egyvonalban megfelelően elhelyezett detektorral rendelkezik, egyidejűleg két mérést rögzíthet, melyek független foltzajjal fognak rendelkezni [72]. Ezáltal rögzíthetik a fény ortogonális polarizációját is. A folt zajának csökkentésére a frekvenciatartományban való jelelválasztást, és az egyszerre több érzékelővel felvett mérési sorozat átlagolását javasolják.

Vass és kutatótársai olyan időtartományban működő algoritmust fejlesztettek ki, amelynek révén a visszavert fény jel/zaj aránya javítható [73]. Kísérleteik szerint ha a visszavert fény foltmintázata jelentősen eltér a jelben szereplő minták többségétől (időben vizsgálva), vagyis a minta amplitúdóeloszlása nem követi a jel szokásos szóródását, és rendkívüli eltérést mutat az átlagtól, akkor a csúcosság (kurtózis) felhasználható a zavar detektálására. Ha a kiugró értékek egy határt túllépnek, automatikusan eltávolíthatók. Hasonlóan korlátot fogalmaz meg a rezgési amplitúdókra Hosek is, aki többféle technikával hasonlította össze e módszer hatékonyságát [65]. A kurtózis módszer hátránya, hogy elsősorban a véletlen és az átlagból kiugró szóródási zaj felismerésére alkalmas.

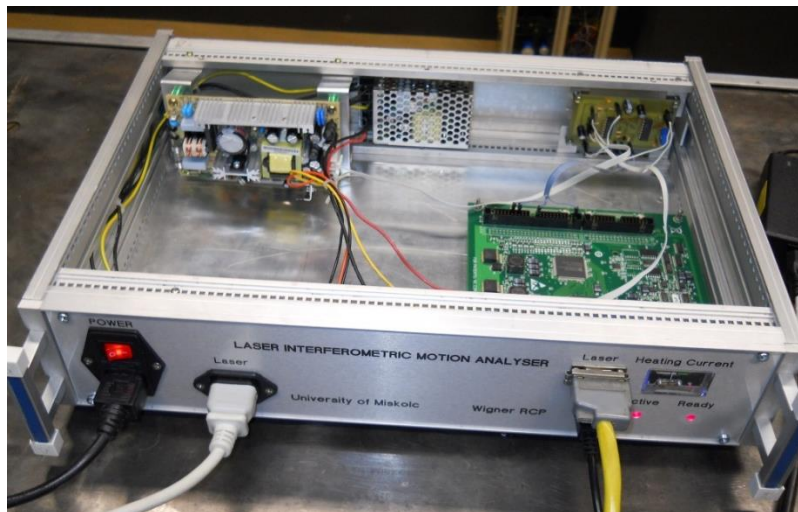
A forgás okozta zajfoltosodási hibák kiküszöbölésére egy további, egyszerű megoldás szinte magától kínálkozik. Ha a forgácsolási körülmények megengednek, akkor az álló szerszámon kell elvégezni a mérést [47-49][52]. Ez a korlát azonban nem lehet feltétele az állapotfelügyeleti stratégia kialakításának.

### 3 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

#### 3.1 A FIZIKAI TANSZÉK MICHELSON TÍPUSÚ LÉZERINTERFEROMÉTERÉNEK ÁTÉPÍTÉSE

Ahogy a 2.2.1.1 fejezet végén is utaltunk rá, a Michelson típusú lézerinterferométerünk elektronikája az elmúlt két-három évtizedben nagyon elavult, csak részben működött, és egyáltalán nem volt illeszthető a mai korszerű számítógépekhez. Az analizátorok lelke, a lézer, az optika és a detektorok – talán egy kicsit meglepő módon - túléltek a 30 évet. Ezen okok miatt határoztuk el, hogy először az analizátor vezérlő- és adatgyűjtő rendszerét újítjuk fel a mai kor követelményeinek megfelelően. Ez praktikusán egy korszerű mérőkártya mérőrendszerbe integrálását (hardveres fejlesztés) és egy igényeinkhez igazított LabView mérőprogram megírását (szoftveres fejlesztés) jelentette. Célunk két olyan korszerűsített eszköz létrehozása, amelyek jó alapot adhatnak a módszer, ill. a módszer mérnöki alkalmazásainak további fejlesztéséhez. Ezekről a fejlesztéseket a Fizikai Intézetben valósítottuk meg, a Wigner Fizikai Kutatóközpont támogatásával [17].

A fejlesztés egyik legfontosabb eleme a megfelelő mérőkártya volt, mely tudja kezelni a három detektor jeleit (melyek elvileg 15 cm/s mérőági mozgást tudnak lekövetni, ami másodpercenként 3 millió impulzust jelent) és emellett meg tudja határozni a detektorok jelsorrendjét is. A National Instruments NI USB-6341 OEM típusú mérőkártya a számítógéphez (laptop) USB porton keresztül csatlakozik. A kártyán a NI-STC3 időzítő és szinkronizáló technológia koordinálja az analóg, digitális és számláló alrendszerek működését, független időzítőket biztosítva az azonos kártyán lévő analóg és digitális I/O alrendszerek részére. Számunkra rendkívül fontos a négy továbbfejlesztett, 32 bites számláló, amelyeket használhatunk frekvenciamérésre, impulzusszélesség mérésre és encoder műveletekhez is. Ez utóbbi szükséges a detektorok jelsorrendje, azaz a mozgásirány meghatározásához.

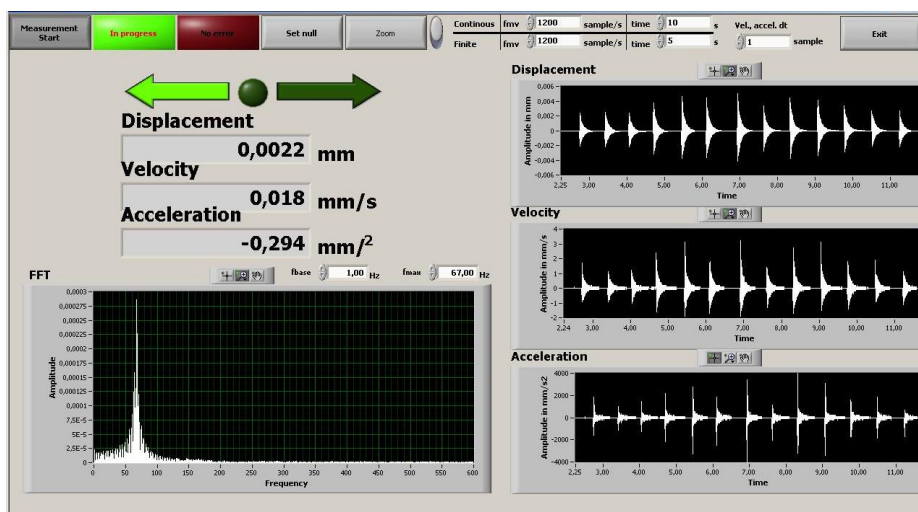


9. ábra: A lézerinterferométer új központi egysége

A számlálók elvben 100 MHz sebességgel tudnak számlálni, amelyet a számítógép akár 1 MHz gyakorisággal is ki tud olvasni, tehát a kártya adatkezelési és adattovábbítási sebessége a fotodetektorainkhoz bőven elegendő. Az új központi egység (9. ábra) a mérőkártya mellett tartalmaz egy analóg komparátort, amely a detektor egységből érkező (kb. 1V-os) jelekből a mérőkártya számára logikai jeleket (TTL) állít elő. Az új központi egységben helyeztük el a mérőkártya és a komparátor (5V,  $\pm 15V$ ) valamint a lézer hőmérsékletét stabilizáló fűtőegység tápegységét (20V, 1A) is. Az egységet magába foglaló dobozt tágasra terveztük, hogy a mérőkártya és a tápegységek között kellő távolság maradjon, minimalizálva ezzel a részegységek közötti termikus és elektromágneses zavarást.

A NI 6341 OEM mérőkártya jeleinek kezelését, azok tárolását, a megfelelő mozgásadatok kiszámítását, numerikus és grafikus megjelenítését egy erre a célra írt LabView mérőprogram végzi. A grafikus kezelőfelületen választhatunk a két üzemmód közül. A folytonos (Continuous) üzemmódban a mérési adatok az adatok tárolása nélkül folyamatosan jelennek meg a képernyőn numerikusan (bal oldal) és grafikus (jobb oldal) formában is (10. ábra). A grafikonokon folyamatosan frissülő módon az utolsó x másodperc adatait láthatjuk, a frissítés frekvenciája (sample/s) és az x beállítható. Ebben az üzemmódban tesztelhetjük a rendszerünk működését, bemutathatjuk azt hallgatóknak, ill. egyéb látogatóknak. Csavarmikrométerrel, ill. a „rezgésmentes” acélasztal finom nyomkodásával és ütögetésével különböző mozgásokat, rezgéseket állíthatunk elő és tanulmányozhatunk. Ez utóbbit segíti a beépített gyors Fourier-analizátor (FFT), amely azonnal mutatja a kialakult rezgések frekvencia spektrumát (10. ábra). Minden grafikon tetszőlegesen nagyítható, az elmozdulás akár teljes képernyős módban (Zoom) is megjeleníthető.

Az elmozdulás mérése természetesen megszűnik, ha a lézersugár útjába idegen akadály kerül, ezt a program az Error indikátoron jelzi. Az akadály megszűnte után a mérés folytatódik, de az Error jelzés megmarad, mutatva az elmozdulás mérése közben bekövetkezett hibát. Az Error jelzést a nullázással (Set null) törölhetjük, amellyel az adott pozíciótól újra indítjuk az elmozdulás mérését.



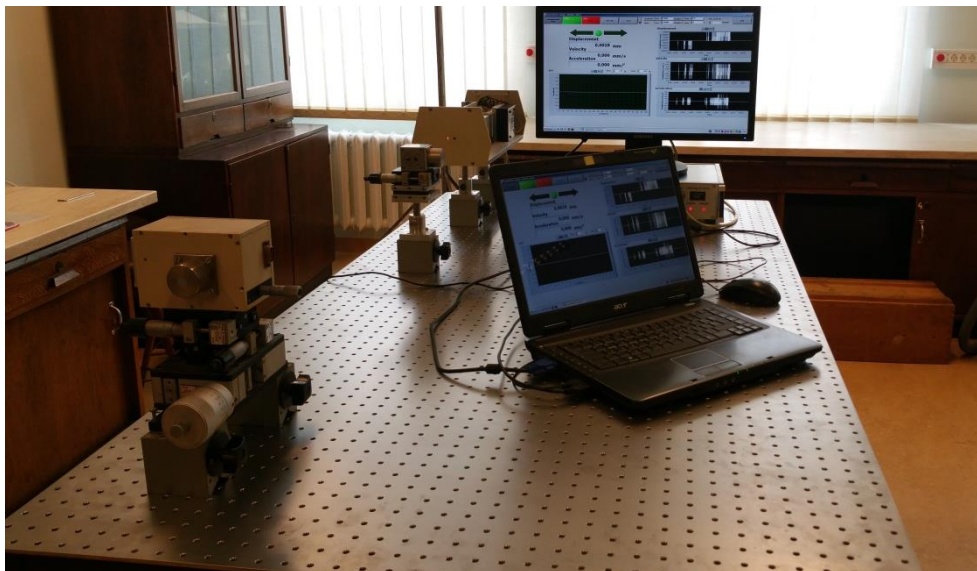
10. ábra: A LabView mérőprogram folytonos mérési üzemmódjának grafikus felülete

A további mozgásjellemzők (sebesség, gyorsulás) numerikusan és grafikusán is megjelennek a képernyőn a megfelelő elmozdulás adatok alatt, azokhoz hasonló módon. Ezeket az elmozdulás-idő adatokból matematikai úton (az időtartammal való osztással) kapjuk. Például 1000 sample/s

állásban az időtartam hossza  $10^{-3}$  s, tehát egy egységnyi ( $0,1 \mu\text{m}$ ) elmozduláshoz a program  $0,1 \text{ mm/s}$  sebességet rendel, ekkora sebességváltozáshoz pedig  $0,1 \text{ m/s}^2$  gyorsulást. Ez az eljárás csak addig korrekt, amíg mintánként sok impulzus van. Lassú mozgások követése esetén (pl.  $50 \mu\text{m/s}$  sebességű) előfordulhat, hogy két egymást követő kiolvasási pillanatban a számláló értéke nem (vagy esetleg csak egy értékkel) változik. Ekkor a sebesség két érték ( $0$  és  $0,1 \text{ mm/s}$ ) között ugrál, a gyorsulás pedig három érték ( $0$ ,  $+0,1 \text{ m/s}^2$ ,  $-0,1 \text{ m/s}^2$ ) között, akkor is, ha a mozgás egyenletes. Ezen vagy a mintavételi gyakoriság csökkentésével segíthetünk, vagy úgy, hogy a sebesség- és gyorsulás számításakor  $x$  mintát (*Vel. Accel. dt*) összevonunk (az  $x$  beállítható). Végés (*Finite*) üzemmódban a megadott időtartamra vonatkozó mérési adatok kijelzése a folyamatos üzemmódhoz hasonlóan történik. Itt lehetőségünk van a mért adatok lementésére, illetve korábban mért eredmények betöltésére és analizálására is.

Ezeket a fejlesztéseket team munkában végeztük, én a team egyik tagja voltam. A központi egység kialakítása főleg Rónai László diákkörös hallgató, a LabView program megírása elsősorban Bodolai Tamás tanszéki mérnök munkája volt, de a koncepciók kialakítása és ezek tesztelése közös munka volt. A munka során tehát nem csupán a régi eszközöket és funkciókat ültettük át korszerű számítástechnikai eszközökre, hanem a korábbiakat nagyságrendileg meghaladó időfelbontású valódi lézinterferometrikus mozgásanalizátorokat hoztunk létre [60][74].

A fejlesztő munka során egyértelművé vált, hogy a régi rezgésmentes asztal már nem megfelelő egy korszerű eszköz számára. Szerencsére az Exmet kiválósági programban [17] sikerült egy Nexus Breadboard,  $900 \times 1800 \times 110 \text{ mm}$  asztallapot vásárolnunk, amelyet egy saját gyártmányú asztalkereten ill. légrúgókon helyeztünk el. Az így kialakított rezgésmentes asztal a környezet rezgéseinek amplitúdóját könnyedén a lézinterferometrikus mozgásanalizátorunk mérési határa, azaz  $0,1 \mu\text{m}$  alá csökkenti (11. ábra).



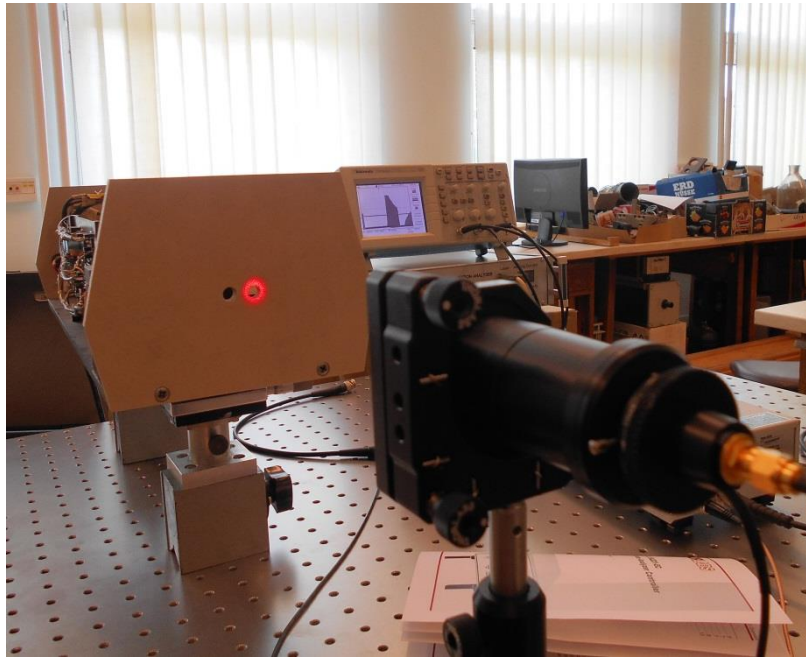
11. ábra: A felújított lézinterferometrikus mozgásanalizátor az új rezgésmentes asztalon működés közben

Ahogy a 2.1.1 fejezetben is utaltunk rá, a lézinterferometrikus mozgásanalizátorok csak egymódusú lézerekkel működnek megbízhatóan. Mivel a bennük lévő He-Ne lézereink erősítési görbéje szélesebb a módustávolságnál, ezért megbízható, tartós egymódusú működés csak megfelelő hőmérsékleten stabilizált lézerekkel lehetséges. A tapasztalatunk szerint a felújítás

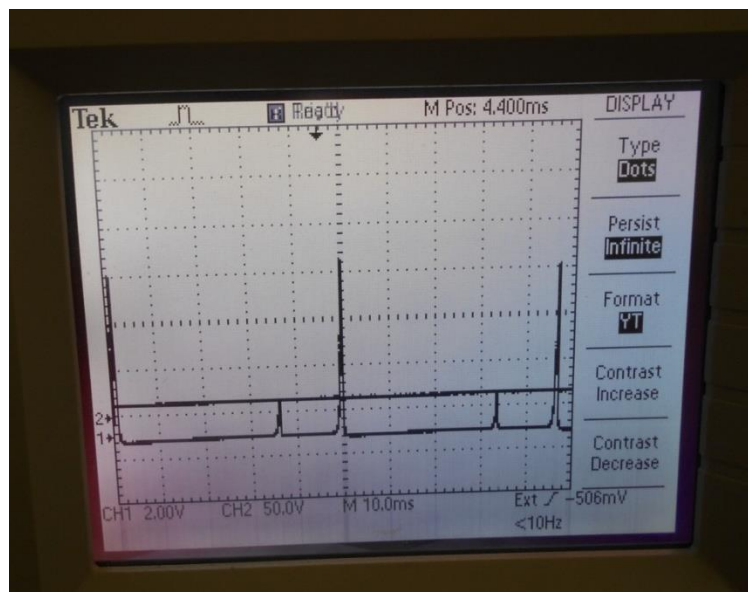


előtt ezzel az egymódusú működéssel is gondok voltak, tehát a felújításnak magába kellett foglalnia a hőmérsékleti munkapont újbóli beállítását is. Erre a célra szerencsére sikerült beszereznünk (szintén a fenti forrásból) egy Scanning Fabry-Pérot interferométert (535-820nm, 1,5 GHz FSR) vezérlőegységgel és a beállításhoz szükséges precíziós eszközökkel [25].

A Fabry-Pérot interferométeres méréseket az új rezgésmentes asztalon végeztük, a mérések idejére a lézerinterferometrikus mozgásanalizátorok nyalábtágítóit kiszereztük. A mérésekhez a saját régi Tektronix TDS 1012 kécsatornás digitális tárolós oszcilloszkópunkra is szükség volt (12. ábra).

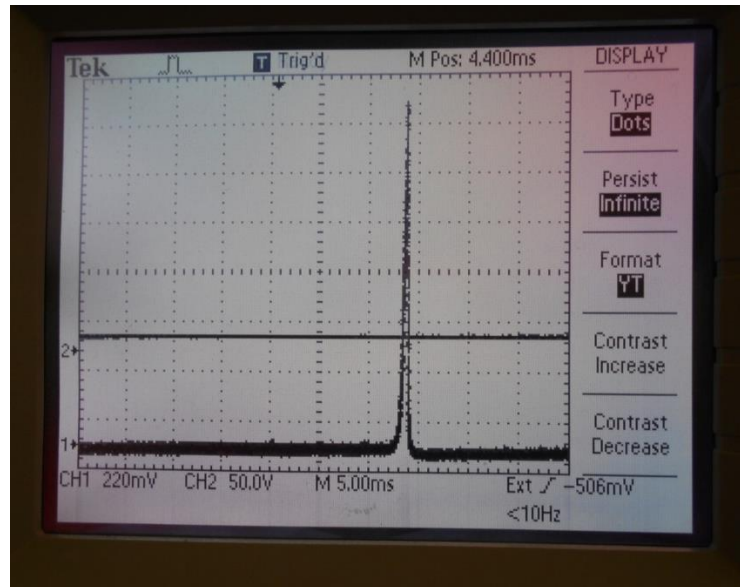


12. ábra: A lézerinterferometrikus mozgásanalizátor lézernyalábjának mérése Fabry-Pérot interferométerrel



13. ábra: Az egyik mozgásanalizátor lézernyalábjának Fabry-Pérot spektruma

Már az első mérések is megmutatták, hogy a lézerek hőmérséklet stabilizálása működik ugyan, de a stabilizált hőmérsékleteken egyik lézer sem egymódusú (13. ábra), bár a két módus amplitúdója jelentősen eltér (mindkét lézer esetében). A 13. ábra alapján az  $FSR=1500$  MHz ismeretében leolvasható a módustávolság, ami kb.  $1125$  MHz ( $0,75$  FSR). A lézerek egymódusú működését a hőmérséklet szabályozó áramkör potenciométerének finom állításával tudtuk elérni (14. ábra).

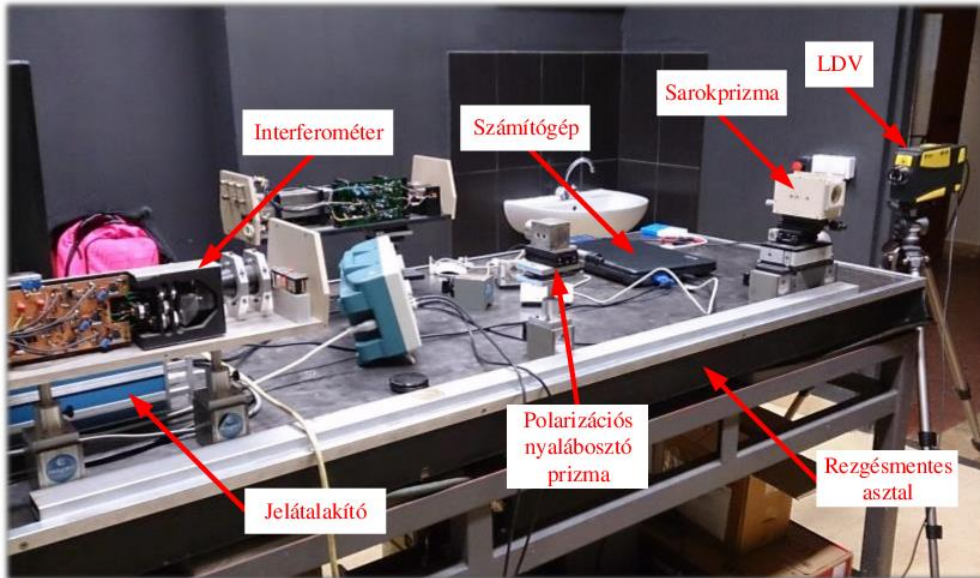


14. ábra: A lézernyaláb egymódusú üzemben

### 3.2 A LIMA ÉS LDV KÉSZÜLÉKEK ÖSSZEMÉRÉSE

Az előző fejezetekben bemutattuk, hogy a LIMA a mérőági sarokprizma mozgását (annak lézernyaláb irányú komponensét) képes analizálni. Az LDV viszont nem igényel (a mérendő ponthoz rögzített) sarokprizmát, bár egy oda ragasztott fényvisszaverő fólia pötty nagyban segíti a mérést. A LIMA finoman, impulzusszerűen gerjesztett mérőági sarokprizmájának rezgéseit tehát mindkét eszköz képes analizálni. Legegyszerűbben úgy, hogy a két eszköz két lézere a sarokprizma két ellentétes oldalát „világítja” meg. Így a műszerek a mozgásnak ugyanazon egyenes irányába eső vetületét mérik, de ellentétes irányból.

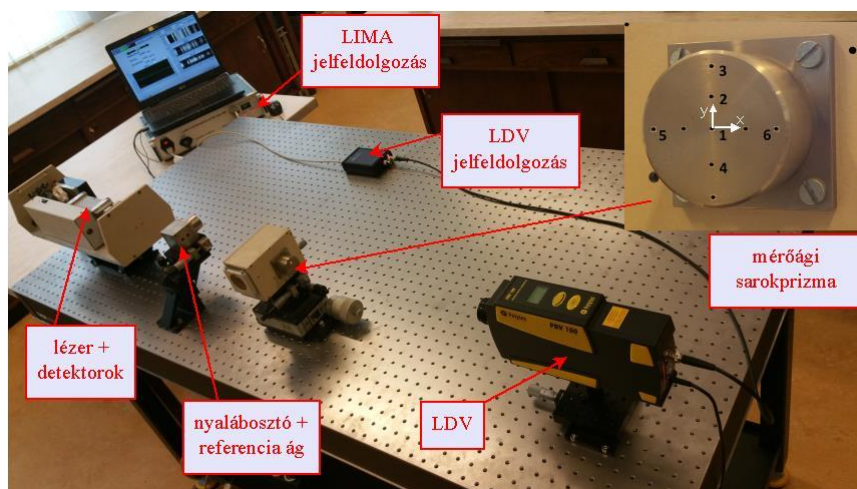
Vagyis ha a sarokprizma a LIMA lézertől távolodik, az LDV lézéréhez éppen közeledik. Megjegyzendő, hogy a két műszer esetében a sebességek mégis egyező előjelűeknek adódnak, mert a LIMA a távolodást tekinti pozitív elmozdulásnak, míg az LDV-nél a közeledés a pozitív sebességű. Az első összehasonlító méréseinket [18] a Fizikai Intézet lézerinterferometriai laboratóriumának régi „rezgésmentes” asztalán végeztük, azon a saját gyártmányú asztalon, amelyen a lézerinterferometrikus mozgásanalizátor 2016-ig össze volt állítva (15. ábra).



15. ábra: A műszerek elhelyezése a régi „rezgésmentes” asztalon

Az idézőjel azért indokolt, mert az asztal főleg a padló rezgéseitől védte az analizátort, az asztal különböző pontjain rögzített analizátor egységek (lézer, osztóprizma, mérőprizma) rezgéseit viszont kölcsönösen továbbította. A helyzetet az is rontotta, hogy az LDV berendezést egy, az asztaltól független állványon (tripodon) tudtuk csak elhelyezni. Mindezek együttesen összetett, nehezen analizálható, a két eszközön kissé eltérő rezgéseképeket eredményeztek, megbízhatatlanná téve a hitelesítést is.

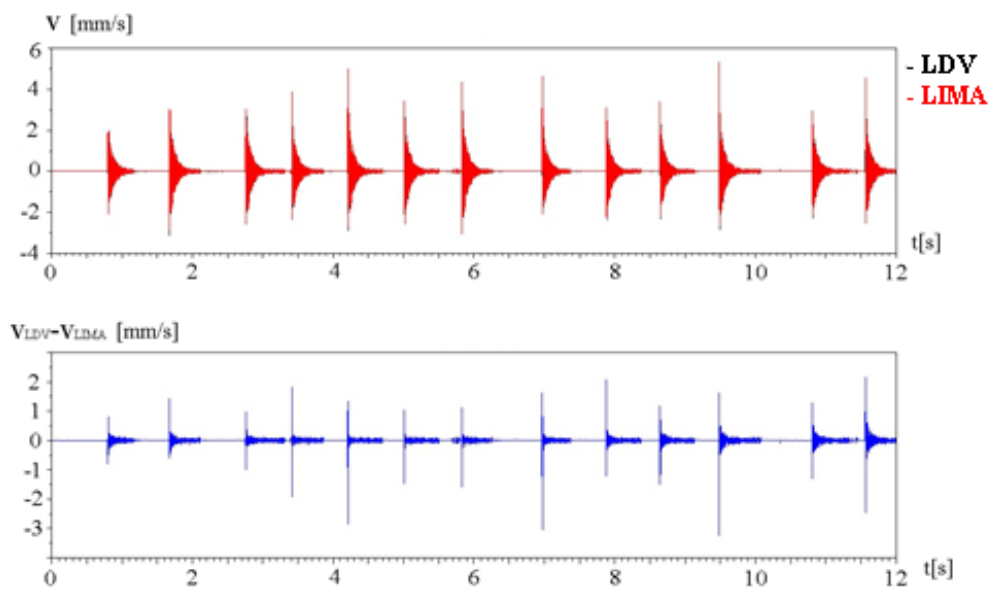
A 2016 folyamán beszerzett rezgésmentes Nexus Breadboard asztal új lehetőségeket teremtett, mert amellett, hogy a környezet rezgéseinek amplitúdóját könnyedén a lézerinterferometrikus mozgás analizátorunk mérési határa ( $0,1 \mu\text{m}$ ) alá csökkenti, hatékonyan szeparálja az asztal különböző pontjain rögzített egységeket is. Tehát pl. a kis impulzusokkal gerjesztett mérőági sarokprizma rezgései ezen az asztalon nem terjednek át pl. a nyalábosztó prizmára. Az újonnan beszerzett egységekkel sikerült megoldani az LDV asztalra rögzítését is. Az alábbiakban bemutatott méréseket már ezen az asztalon végeztük (16. ábra) [74].



16. ábra: A műszerek elhelyezése az új rezgésmentes Nexus Breadboard asztalon

Ahogy a korábbi fejezetekben is utaltunk rá, a LIMA elsődlegesen elmozdulást, az LDV sebességet mér. A kapott grafikonok, tehát közvetlenül nem hasonlíthatók össze, pl. az elmozdulás adatokból a sebességet származtatnunk kell. Ezt a LabView a program grafikus felületen beállítható gyakorisággal megteszi (az előző időintervallumban mért elmozdulást osztja az intervallum hosszával). A jelen mérésekben általában az 1200 Hz ( $T=833,33 \mu\text{s}$ ) gyakoriságot állítottuk be, mert az 1200 sample/s (és ennek többszöröse) az LDV-n is választható(k).

Ahhoz, hogy a két sebesség grafikont összehasonlítsuk, a két grafikon időskáláját is össze kell hangolni. Mivel mindkét mérőprogram ugyanazon a gépen fut, a két időskála faktora elvben megegyezik, tehát az időkülönbségeknek is pontosan egyeznie kellene. Ez azonban még sincs így, egy 10 s-os mérési intervallumban az LDV sebesség grafikon a LIMA-éhoz képest kb. 1 ms-ot (egy-két csatornát) eltolódik. Ennek az okára nem jöttünk rá, eleinte kiküszöbölendő hibának tekintettük, később azonban még segítette is a munkánkat. Segítette ugyanis a skálák kezdőértékeinek az összeillesztését. Erre azért volt szükség, mert a kétfajta mérés  $\mu\text{s}$  pontosságú egyszerre indítását nem tudtuk megoldani. A két sebesség grafikon durva (értsd: kb. 0,5 ms pontosságú) kezdőpont illesztése „kézműves” módon megtehető, mert a mérőórái sarokprizma „megkoppantása” határozott módon indítja a rezgéseket. A legjobb egyezés (esetleg a legjobb két egyezés) vizuálisan megkereshető, ekkor a pontatlanságunk tehát legfeljebb  $T/2$  ( $\approx 0,5 \text{ ms}$ ).

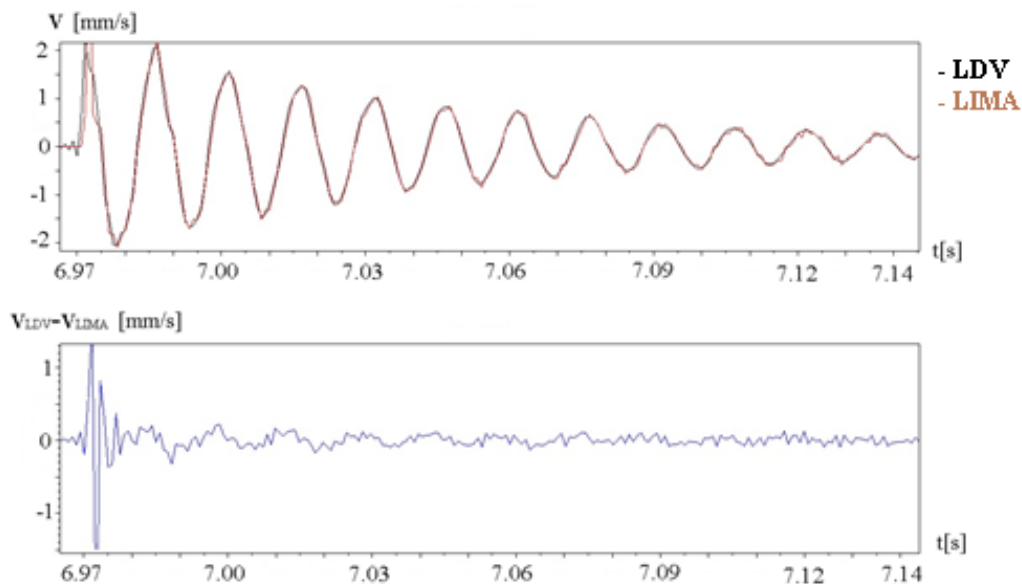


17. ábra: Egy „koppantás” sorozatot követő csillapodó rezgések sebesség adatai: felül: LDV (fekete) és LIMA (piros) sebességadatok együtt, alul: ezek különbsége

A pontosság további növelését az időskálák  $10^{-4}$  relatív eltérése segíti, mert emiatt biztosan lesz olyan „koppantás” is, ahol az illeszkedés már egy nagyságrenddel pontosabb. Ez a „koppantás” lesz az összehasonlító vizsgálataink tárgya. A legjobb egyezés megtalálását a két módon mért sebességértékek eltéréseinek időgrafikonja is segítette.

Az 17. ábra egy 12 másodperces „koppantás” sorozat eredményét, az egyes koppantásokat követő csillapodó rezgéseket mutatja az összeillesztett időskálán. Az ábra felső részén az LDV (fekete) és LIMA (piros) sebességadatok együtt vannak ábrázolva. (Az LDV adatok korrigáltak, lásd később.) A két adatsor teljesen elfedi egymást, a különbségeket ebben a nagyításban nem igazán lehet érzékelni.

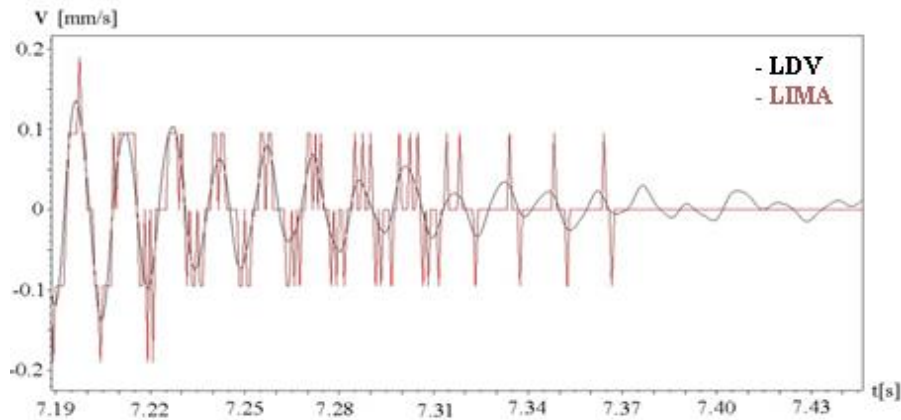
Éppen ezért kiszámoltuk a különbségeket is, ezeket az ábra alsó részén mutatjuk. Azokból jól látható az, hogy a legnagyobb eltérések mindig a koppantást követő első rezgésnél vannak. Továbbá az is, hogy ezt követően a különbségek már kisebbek, de kb. állandó amplitúdójúak, egészen addig, amíg a rezgések teljesen el nem halnak. Különösen igaz ez a 4. ill. 7. másodperc környéki koppantások után, ahol nyilvánvalóan a legjobb az időskálák egyezése. Ezekben a tartományokban az eltérések (függetlenül tehát a rezgés amplitúdójától és kivéve az első rezgést) stabilan a  $-0,1$  és  $+0,1$  mm/s közötti sávba esnek. Ennek a határozott maximumnak az okát könnyen megérthetjük. Ugyanis a LIMA mérési pontossága (ahogy korábban már utaltunk rá)  $\lambda/8 \approx 0,08$   $\mu\text{m}$ , egy-egy időablak hossza pedig  $1/1200$  s. A kettő hányadosaként  $96 \mu\text{m/s} \approx 0,1$  mm/s adódik, ez tehát a LIMA sebességmérési pontossága (a véletlen hiba az alkalmazott mérőprogram és mintavételi gyakoriság mellett). Ez a sebességmérési pontosság a mintavételi gyakoriság csökkentésével javítható lenne, de akkor a berendezés egyre kevésbé érzékelné a gyorsabb rezgéskomponenseket.



18. ábra: A 8. koppantás utáni első néhány rezgés kinagyítva. (Adatok, mint az előző ábrán.)

A 6,97 s-nál történt (egyébként nyolcadik) koppantás utáni néhány rezgést a 18. ábra kinagyítva is megfigyelhetjük. A második periódustól kezdve egy 67,8 Hz-es csillapított rezgést mér mind a két eszköz, szinte tökéletes egyezésben. A lényeges különbség az első félperiódusban van. Ott az LDV határozottabban mér egy kb. 260 Hz-es gyorsan lecsengő komponenset, mint a LIMA. Minden bizonnyal azért, mert a lassú rezgés a sarokprizma egészének a rezgése, a gyors rezgés viszont a prizma elemeinek egymáshoz viszonyított rezgése. Az LDV lézérének fénye hátul és egy ponton verődik vissza, míg a LIMA-é elöl és három ponton (a prizma három oldalán egymás után). Tehát a LIMA a gyors rezgéseket valamelyest kiátlagolja.

Tanulságos a rezgések lecsengésének a megfigyelése is. A 19. ábra lényegében a 18. ábra folytatása (néhány periódus kihagyásával, finomabb sebességskálán). Látható, hogy az LDV végig szépen követi a rezgéseket, amelyek a vége felé már nem tisztán szinuszosak, több rezgés összegeként állnak elő. A LIMA esetében azonban a sebesség már nagyon „szőrössé” válik, lényegében csak három sebességérték fordul elő: a nulla és a  $\pm 96 \mu\text{m/s}$ , attól függően, hogy az előző időablakban érkezett-e jel és az milyen előjelű elmozduláshoz tartozott (lásd fentebb).



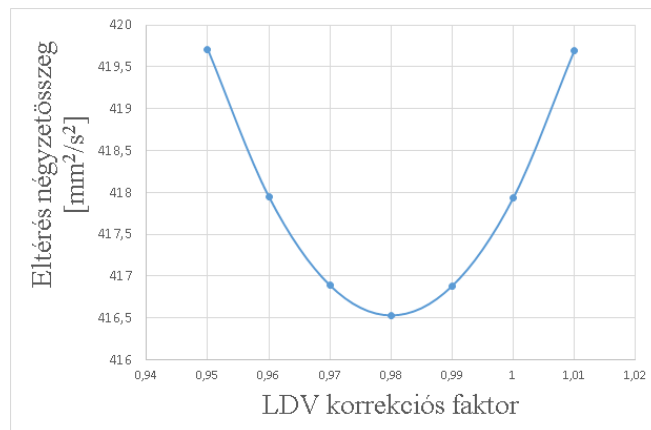
19. ábra: A 8. koppantás utáni rezgések megszűnése. (Adatok, mint a 17. ábra felső részén.)

Az amplitúdó csökkenésével a nullától különböző értékek egyre ritkábbak lesznek, végül teljesen eltűnnek. A korábban leírtak szerint a LIMA az 50 nm-nél kisebb amplitúdójú rezgéseket már nem látja. Ehhez a mérési határhoz 67,8 Hz esetén ( $v=A\omega$ ) 20  $\mu\text{m/s}$  sebesség mérési határ tartozik, ezt az ábra is megerősíti.

A fentiek alapján egyértelműen állítható, hogy a LIMA a jelenlegi mérőprogrammal a 0,1 mm/s alatti sebességű mozgások tanulmányozására kevésbé alkalmas, mint az LDV. Ez azért van, mert a LIMA ugyan igen pontosan méri az elmozdulást ( $\lambda/4$  egységben), de a pillanatnyi sebességet (és gyorsulást) ebből pontatlanul származtatja, mert az időablakok nincsenek a jelek beérkezéséhez szinkronizálva. Ezért ez a származtatási módszer mindenképpen fejlesztendő. Hangsúlyozzuk, hogy a LIMA „pontatlansága” csak a pillanatnyi sebesség értékeire vonatkozik, a hosszabb időtartamokra vonatkozó átlagsebességekre nem. Azok nagyon pontosak, mert nagy pontosságú adatokból számítjuk.

Az összemérések kiemelt célja volt annak eldöntése, hogy a két módszer ugyanazokat a mérési eredményeket szolgáltatja-e, van-e lehetőség a pontatlanabb skálájúnak gondolt LDV hitelesítésének pontosítására. A 17. ábra azt sugallja, hogy az illeszkedés és ezáltal a hitelesítés is kifogástalan. Ez nagyjából így is van, de a 17. ábra azért tartalmaz egy korrekciós faktort. Az LDV sebesség adatokat 0,98-cal kellett beszorozni, hogy az egyezés a legjobb legyen (azaz az eltérések négyzetösszege minimális legyen). Ezt a 18. ábrán mutatjuk be. Jelenti-e ez azt, hogy az LDV módszer (a LIMA-hoz képest) 2%-ot téved, és az LDV *Scaling factor*-t a gyári 5  $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}/V$ -ról 4,9  $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}/V$ -ra kell átállítani?

A válasz egyértelműen **nem**. Nézzük meg ugyanis, hogy függ-e a korrekció eredménye attól, hogy az LDV lézersugara a sarokprizma hátlapját melyik ponton éri el! A mérési pontokat a 16. ábra jobb felső részén kinagyított prizma hátlapján már bejelöltük, az 17-19. ábrákon bemutatott grafikonokat az 1. mérési pontról (a hátlap közepéről) visszaverődő lézersugárral mértük. A többi mérési pont esetén kapott, hasonló módon megkapott szorzófaktorokat az 1. táblázat foglalja össze. A táblázat adatai szerint a prizma középvonalán függőlegesen felfelé haladva mm-ként kb. 1%-kal változik a korrekciós faktor. (A sarokprizma teteje jobban kileng, ezért fent jobban kell csökkenteni az LDV adatokat, hogy a LIMA-val egyezést kapjunk.) Vízszintesen (szintén a középvonalon) haladva sokkal kisebb korrekciók szükségesek, a prizma két széle kb. 2%-kal nagyobb amplitúdóval rezeg, mint a közepe. Ez arra utal, hogy az alkalmazott impulzusgerjesztés olyan rezgést hoz létre, aminek van egy kis torziós komponense is.



20. ábra: Az optimális LDV korrekciós faktor meghatározása

1. táblázat: A sarokprizmán lévő mérőpontokhoz tartozó LDV korrekciós faktorok

Mérőhely sorszama	Koordinátái [mm]	Korrekciós faktor	LDV többlet [%]
1	(0;0)	0,98	2,0
2	(0;7)	0,91	9,9
3	(0;14)	0,86	16,3
4	(0;-7)	1,05	-4,8
5	(-14;0)	1,00	0
6	(14;0)	1,00	0

A LIMA lézersugara a prizma másik oldalán, annak vízszintes középsíkjában lép be- és ki, egymástól 15 mm távolságban. A prizma reflektáló pontjainak a mozgása tehát a középső (1.), ill. a két szélső (5-6.) átlaga körüli lehet, amelyhez 0,99-es korrekciós faktor tartozhat. Azaz a két berendezés által mért sebesség adatok kb. 1%-kal térnek el, ha a prizma középvonala (7;0) és (-7;0) koordinátájú pontjait tekintjük. Ugyanakkor kb. 1mm-nek gondoljuk a lézersugár foltjának beállítási pontosságát a prizma hátlapján, ami – a fentebb leírtak szerint – kb. 1% korrekciós faktor hibára vezet. Azaz végeredményben az adatok eltérése nem nagyobb, mint a becsült mérési hibánk. **Tehát az LDV skálafaktora 1-2% hibahatáron belül pontos.** Ezt a (meglehetősen kicsi) mérési hibát főleg az okozhatja, hogy a LIMA az egész sarokprizma átlagolt rezgéseit méri, az LDV pedig csupán egy pontjátét.

### 3.2.1 KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett mérések alapján elmondhatjuk, hogy mind a LIMA, mind az LDV megfelelő körülmények és beállítások mellett kiválóan működik. A modernizált adatgyűjtő rendszer jól illeszkedik a régi opto-mechanikai egységhez.

Az új légrúgós rezgésmentes asztal használata lényegesen növelte a mérések pontosságát. Ismételten bebizonyosodott, hogy lézerinterferenciás méréseket csak megfelelő minőségű rezgésmentes asztalon szabad végezni, máskülönben a precíziós részelemeknek a környezettől, ill. egymástól átvett rezgései meghamisítják a méréseket.

Azt találtuk, hogy az LDV alkalmasabb a pillanatnyi sebességek meghatározására, mint az elsődlegesen elmozdulást mérő LIMA. Különösen igaz ez azokra a rezgésekre, ahol a sebesség 0,1mm/s alatt marad. A LIMA mérőprogramjának fejlesztése, jobb pillanatnyi sebesség- és gyorsulás számítási módszer kidolgozása mindenképpen indokolt.

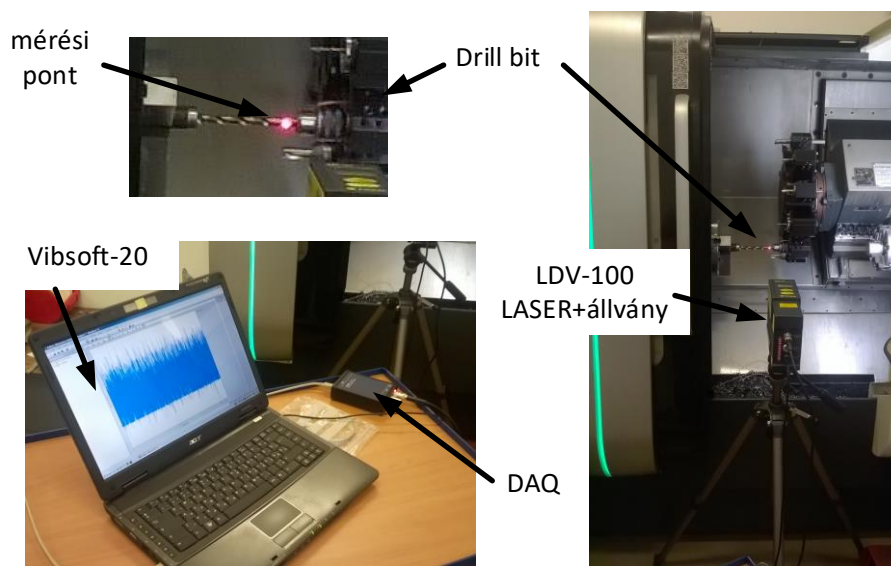
A mérések igazolták, hogy az impulzusgerjesztések hatására a mérőági sarokprizma különböző pontjai eltérően rezegnek. Ezek az eltérések nagyobbak, mint a LIMA és az LDV által (középállásban) szolgáltatott adatok különbségei. Méréseink alapján állíthatjuk, hogy a LIMA és az LDV hibahatáron belül egyformán méri a sebességet (fentebb említett korlátokkal). Ezt a hibahatárt 1-2%-ra becsüljük. Ennek a (kis) hibának oka sem a műszereken belül keresendő, hanem abban, hogy a teljesen eltérő elveken működő műszerek nem pontosan ugyanazt a rezgést "látják".

### 3.3 FÚRÓSZÁR SZABAD REZGÉSEINEK MÉRÉSE LDV MÓDSZERREL

Fúrás közbeni rezgések tanulmányozásához elengedhetetlen a mechanikai rendszer dinamikai jellemzőinek ismerete. A későbbi fejezetekben bemutatásra kerülő forgácsolási kísérletek rezgési képei és spektrumai is ezt támasztják alá. A kapott eredmények igen összetettek, elemzésük nehéz feladat. Ehhez segítség lehet a már tokmányba fogott, de még fúrást nem végző fúrószárak rezgéseinek pontos ismerete.

#### 3.3.1 Mérési körülmények

Méréseinket egy DMG CPX Alpha500 CNC esztergán végeztük a Miskolci Egyetem Szerszámgépezési és Mechatronikai Intézet Szerszámgépek Tanszéke (SZGT) műhelyében. Mivel a később (3.2 fejezet) tárgyalásra kerülő fúrás közbeni rezgésmérés során a fúró állt, miközben a munkadarab forgott, így ezeket méréseket is álló fúrón végezhetjük. Az első lézeres mérések LDV-vel történtek. A lézerrel a fúrószár megadott pontjának transzlációs rezgéseit mértük, a szerszámgépen kívülről (21. ábra). A mérések során a tokmányba befogott fúrószárakat a lézersugár a befogott végüknél, a horony végétől kb. 1cm-re érte el, hasonlóan a fúrás közbeni mérésekhez.



21. ábra: A mérés elrendezése



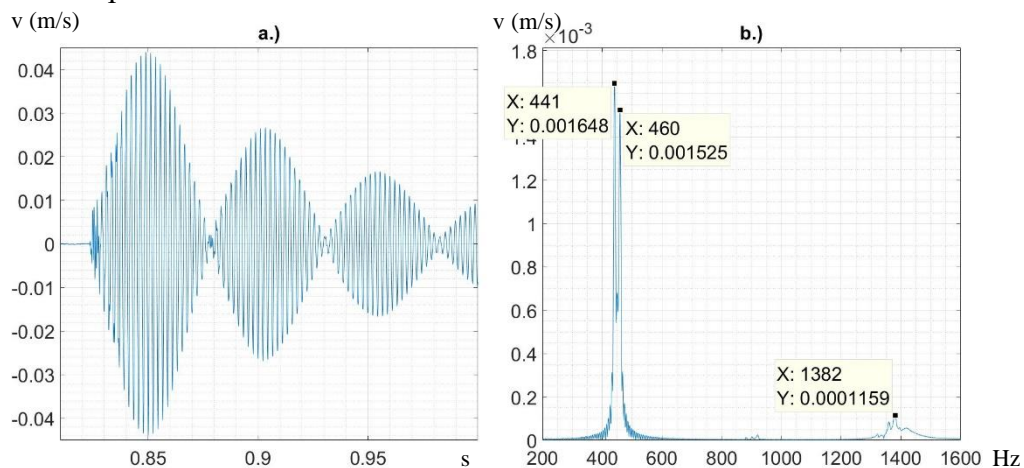
### 3.3.2 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Az impulzusgerjesztésre adott válaszok vizsgálatakor a fúrót először (tokmányba) mereven befogva koppintottuk meg. Ezután a fúró csúcsát nekitoltuk a munkadarabnak, s így gerjesztettük a szerszámot. A tompa ütés gumivégű fém ütővel, míg az éles ütés egy hengeres fémszár segítségével történt.

#### 3.3.2.1 A FÚRÓ HEGYE SZABAD, A KOPPINTÁS TOMPA

A szabad rezgések méréséhez a fúrószárat egy kis keresztirányú ütéssel, „koppintással” hoztuk rezgésbe, amely a másik végükhöz közel, attól kb. 1cm-re történt. Igyekeztünk mindig azonos erősséggel koppintani, de ennek erősségét nem tudtuk mérni. Mivel a lézersugár irányába eső mozgást mérjük, elsősorban az ilyen irányú (tehát párhuzamos) koppintás után várunk nagyobb amplitúdójú rezgést. Az első mérési sorozatban a fúrók másik vége (a hegye) teljesen szabad volt, és a koppintás gumikalapáccsal történt. A mérések többségében tisztán látszott, hogy a rezgéseket nem egy, hanem két közeli frekvencia jellemzi, amelyek szuperpozíciója lebegést eredményez (22. ábra).

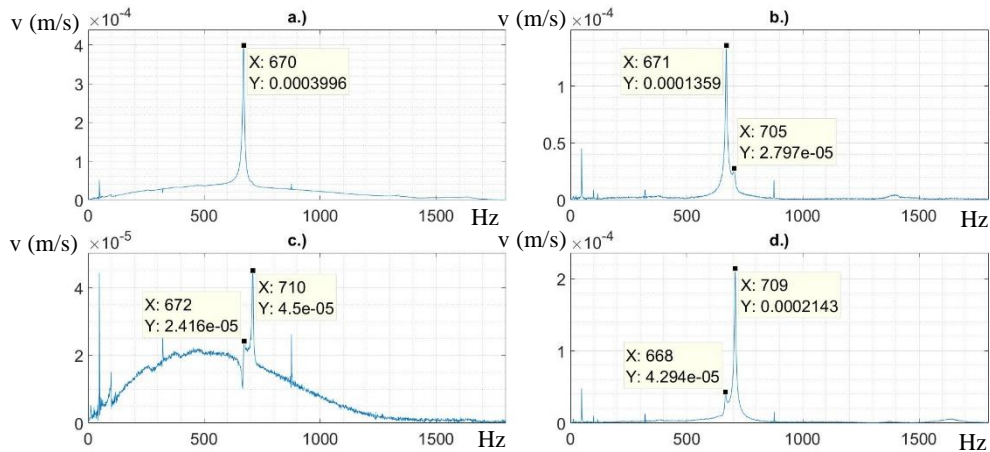
A két rezgési módus amplitúdójának nagysága a koppantás iránya mellett a fúrószár pozíciójától is függött. Ez utóbbi azt jelenti, hogy nem volt mindegy, hogy a horony vége és a lézervolt a fúrószár ugyanazon oldalán volt-e ( $0^\circ$ -os pozíció), vagy ehhez képest valamelyest elfordítva. Mi a  $90^\circ$ -os elfordítást preferáltuk.



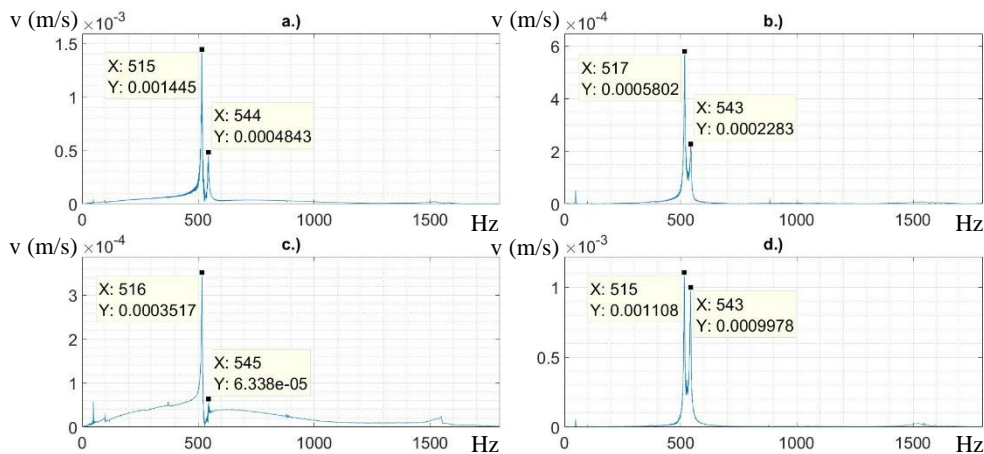
22. ábra: A tokmányba fogott 12mm átmérőjű fúrószár lézersugárra merőleges koppintás utáni rezgése: a.) időspektrum (sebesség [m/s] az idő függvényében); b.) FFT spektrum (amplitúdó a frekvencia függvényében)

A három fúró (a 9mm, a 10mm és a 12mm átmérőjű fúró is) nagyon hasonló rezgési spektrumokat adott. Különbség volt viszont a módusok frekvenciáiban. A legvékonyabb fúrót 668 ( $\pm 1$ ) és 709 ( $\pm 1$ )Hz, a közepeset 517 ( $\pm 1$ ) és 545 ( $\pm 1$ )Hz, a legvastagabb fúrót 442 ( $\pm 1$ ) és 462 ( $\pm 1$ )Hz-es módusok jellemzik (23. ábra - 24. ábra és 25. ábra). Az FFT spektrumok hasonlóságait az alábbiakban foglalhatjuk össze:

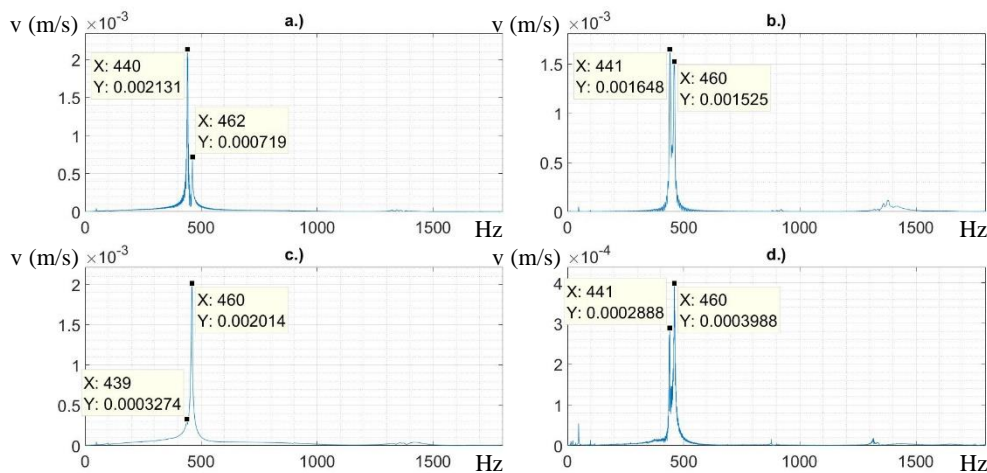
- a lézersugárra merőleges koppintás esetén az FFT spektrumban mindkét frekvencia jól látszott, a lézersugár irányú koppintás esetén néha ( $90^\circ$ -os pozícióban) csak az egyik,
- a fúrószárok két különböző pozíciójában (a  $0^\circ$ -os és a  $90^\circ$ -os) különböző frekvenciák domináltak (kivéve a 10-es fúrót, ahol minden spektrumban a kisebb frekvencia dominált)



23. ábra: A tokmányba fogott 9mm átmérőjű fúrószerű rezgési spektrumai (FFT) különböző fúrószerű pozíciókban és koppintási irányok esetén: a.) eredeti (0°-os) pozíció, lézersugár irányú koppintás; b.) eredeti pozíció, lézersugárra merőleges koppintás; c.) 90°-os pozíció, lézersugár irányú koppintás; d.) 90°-os pozíció, lézersugárra merőleges koppintás



24. ábra: mint az előző ábrán, de itt a fúrószerű átmérője 10mm



25. ábra: mint az előző ábrán, de itt a fúrószerű átmérője 12mm

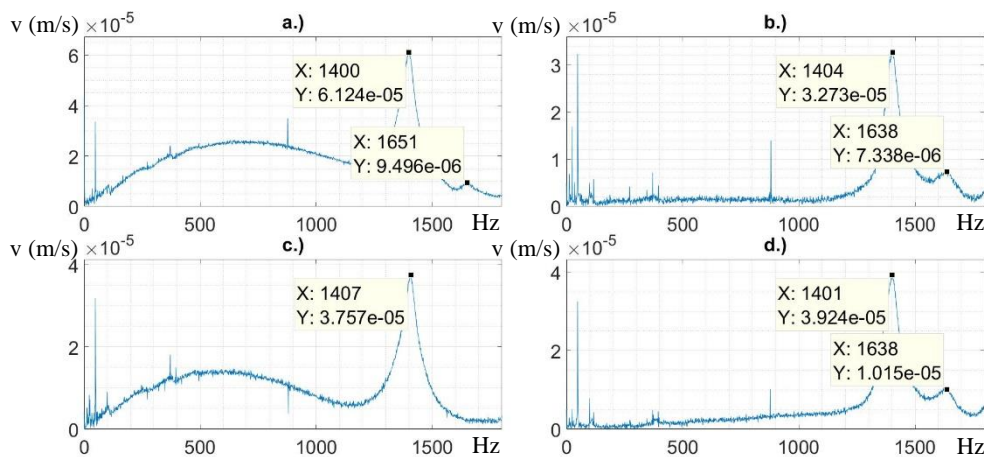
c) a lézersugár irányú koppintás esetén jelentősen megnövekedett a folytonos háttér is az FFT spektrumban. Később kiderült, hogy ennek az az oka, hogy a lézersugár irányú koppintás

utáni első rezgések nagyon anharmonikusak, közelítőleg sem írhatók le harmonikus függvényekkel;

- d) a vastagabb fúrók esetében az alapfrekvencia háromszorosa környékén megjelent egy kisebb csúcs, ami nem a háttérzajtól származik (a háttérspektrum a 10. ábrán látható).

### 3.3.2.2 A FÚRÓ HEGYE A MUNKADARABHOZ SZORUL

Egy másik mérési sorozatban úgy vizsgáltuk meg a 9mm-es fúró rezgéseit, hogy a fúró csúcsa sem volt szabad (a fúró a 90°-os pozícióban állt), azaz „pontoszerű” módon meg volt fogva. Ezt úgy értük el, hogy nekitoltuk a fúrót egy álló munkadarabnak. Először éppen csak hozzáértettük, később nagyobb erővel toltuk neki (a fúrón még +0,04mm-t toltunk). Tapasztalataink szerint (26. ábra) a feszítő erő megváltoztatása alig volt hatással a rezgési spektrumra. Minden spektrumban domináns volt viszont egy kb. 100Hz szélességű (FWHM), kb. 1405Hz középfrekvenciájú rezgési módus. Jelentősen befolyásolta azonban a rezgési spektrumot a pendítés iránya. A lézersugár irányú pendítés igen magas, közepén kipúposodó folytonos háttér eredményezett az 1kHz alatti tartományban. Ez a háttér a merőleges pendítés esetén szinte teljesen hiányzott.

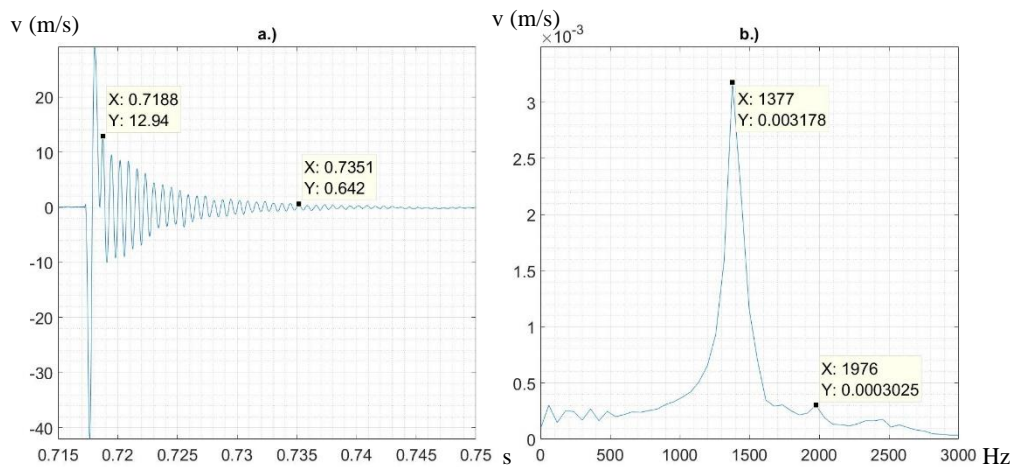


26. ábra: A tokmányba fogott 10mm átmérőjű fúrószár rezgési spektrumai (FFT) úgy, hogy a fúró csúcsát „pontoszerű” módon megfogtuk: a.) megfogás „normál” erővel, lézersugár irányú koppintás; b.) megfogás „normál” erővel, lézersugárra merőleges koppintás; c.) megfogás megnövelt erővel, lézersugár irányú koppintás; d.) megfogás megnövelt erővel, lézersugárra merőleges koppintás

Megvizsgáltuk, hogy a 26/a és c ábrákon (lézersugár irányú pendítés) miért olyan magas a folytonos háttér az 1kHz alatti tartományban. A 27. ábra/a kép a 26. ábra/c-n bemutatott FFT spektrumhoz tartozó időspektrumot láthatjuk. Ez a pendítés pillanatában hirtelen indul egy erősen anharmonikus szakasszal. Ha ezt kivesszük az FFT kiértékelésből, akkor eltűnik a folytonos háttér nagy része is (26. ábra/b).

Tehát az FFT spektrumok folytonos háttére egyértelműen az első egy-két erősen anharmonikus periódus következménye. Nemcsak a 26/a és c ábrákon igaz ez, hanem a többi a) és c) ábrán is, ahol a koppintás lézersugár irányú. A szabad hegyű fúrószár rezgéseit azonban lassabban csengenek le, így az első egy-két erősen anharmonikus periódus hatása a teljes lecsengési szakaszra számított FFT spektrumra kisebb lesz. A lézersugárra merőleges koppintás esetén a lézerrel mért (tehát lézersugár irányú) rezgések lassan alakulnak ki (22. ábra/a), így az elején

erősen anharmonikus periódusokat nem tartalmaznak, és így hiányzik az FFT spektrumok folytonos háttére is.

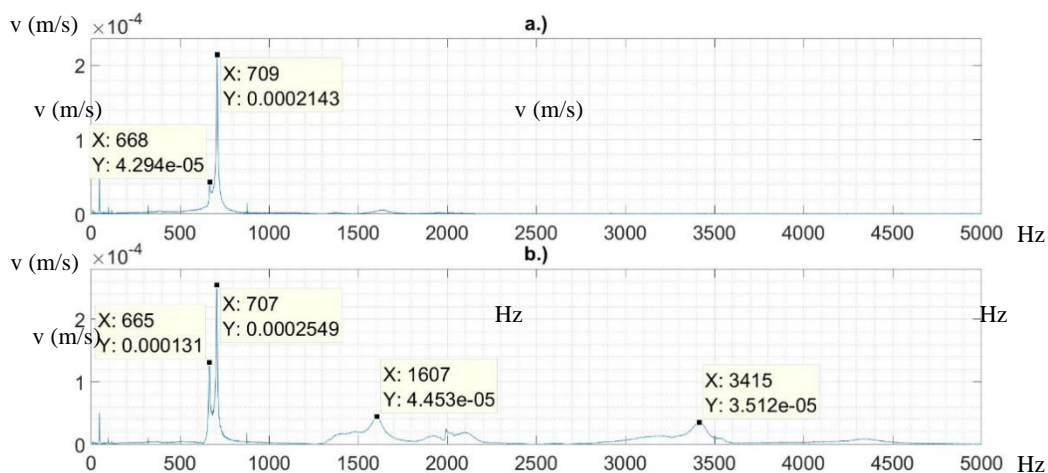


27. ábra: A 26/c ábrán bemutatott FFT spektrumhoz tartozó időspektrum (és a megjelölt két pont közötti rész FFT spektruma)

### 3.3.2.3 SZABAD HEGYŰ FÚRÓ ÉLES KOPPINTÁSA

Az előző fejezetekben a fúrószárat tompa koppintással hoztuk rezgésbe. A gyakorlatban ez egy gumikalapáccsal történő ütést jelentett, ami a fúrószár alaprezgéseit generálta. A fúrás közben azonban a fúrót más fémekkel történő érintkezés hozza rezgésbe, indokolt tehát az ilyen típusú rezgések vizsgálata is.

A 28. ábra azt mutatja be, hogy egy másik fúrószárral történő (éles) koppintás (b) milyen komplex frekvencia spektrumot eredményez a gumikalapáccsal történő (tomp) koppintás után mért (a) egyszerű spektrumhoz képest.



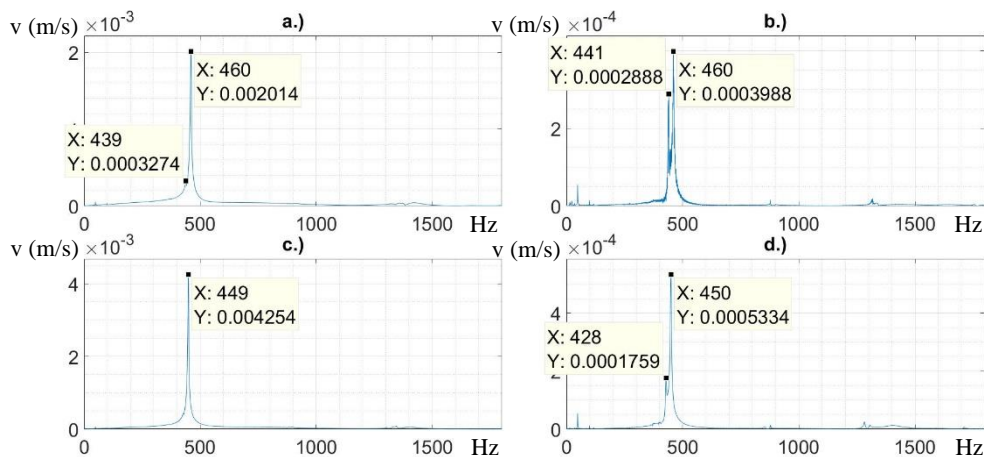
28. ábra: A 9mm átmérőjű tokmányba fogott 90°-os pozíciójú fúrószár (lézersugárra merőleges koppintás) rezgési spektrumai (FFT) a.) gumikalapáccsal; b.) másik fúrószárral történő koppintást követően

### 3.3.2.4 KIEGÉSZÍTŐ MÉRÉSEK

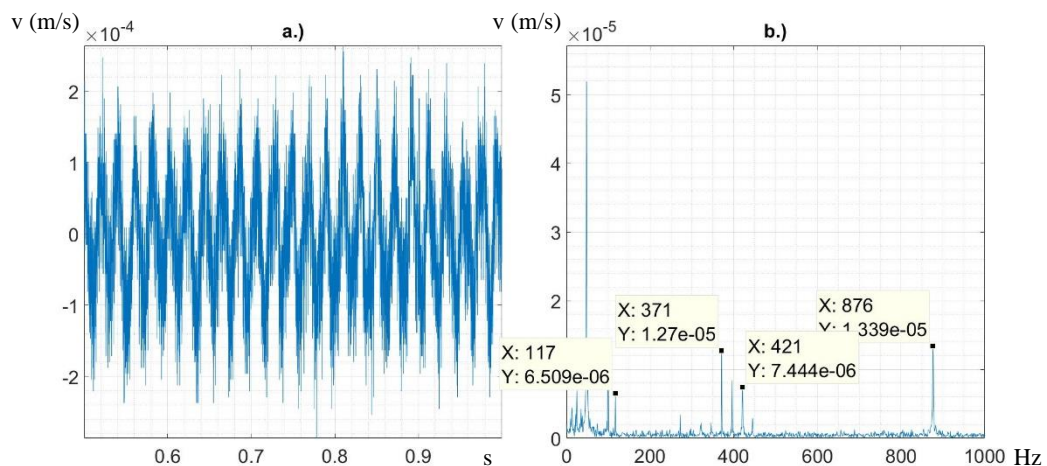
A vastagabb fúró esetén megmértük, hogy milyen hatása van a rezgési spektrumra annak, hogy ha a fúrót a tokmányból 3mm-rel kintebb húzzuk. Ez a fúró tokmányon kívüli hosszát kb. 2,5%-kal

növeli meg ( $l' = 1,025l$ ). A 29. ábra alapján látható, hogy a kihúzás a rezgési frekvenciákat 10-11Hz-cel csökkenti, ami kb. 2,5% csökkenést jelent. Ennek az értelmezését az 3.3.3. fejezet tárgyalja.

Az eddigi időspektrumok és FFT spektrumok a fúrószár minden rezgését mutatták, nemcsak azokat, amelyeket a koppintás okozott. Tapasztalataink szerint a fúrószárnak a szabad rezgések lecsengése után is maradnak rezgései (30. ábra). Ezeket az állandósult rezgéseket különböző környezeti hatások, elsősorban a műhelyben folyamatosan bekapcsolva tartott elektromos berendezések gerjesztik. Ezek közül a viszonylag zajos kompresszort emeljük ki (48Hz, 876Hz). Amikor minden fogyasztót kikapcsoltunk, a háttér teljesen fehérré vált, az FFT spektrum azonosítható frekvenciákat nem tartalmazott. A háttér spektrum több vonala azonosítható a korábban bemutatott FFT spektrumokban. Különösen igaz ez a 26. ábra grafikonjaira, ahol a megtámasztott csúcsú fúró kis amplitúdójú rezgései nem tudták a háttérrel teljesen elnyomni.



29. ábra: A 9mm átmérőjű tokmányba fogott 90°-os pozíciójú fúrószár rezgési spektrumai (FFT) az eredeti (a tokmányba teljesen betölt), ill. 3mm-rel kihúzott állapotában: a.) eredeti állapot, lézersugár irányú koppintás; b.) eredeti állapot, lézersugárra merőleges koppintás; c.) kihúzott állapot, lézersugár irányú koppintás; d.) kihúzott állapot, lézersugárra merőleges koppintás



30. ábra: A háttér rezgések időspektruma (sebesség [m/s] az idő függvényében) és FFT spektruma.

### 3.3.3 A BEFOGOTT FÚRÓSZÁRAK REZGÉSEINEK LEÍRÁSA

#### 3.3.3.1 AZ EGY OLDALON BEFOGOTT HENGERES RUDAK REZGÉSÉNEK EGYSZERŰ MODELLJE

A fúrószárok rezgési frekvenciáinak pontos levezetése – a fúrószárok bonyolult geometriája miatt – reménytelen feladatnak tűnik. Ehelyett tekintsünk egy tokmányba fogott kör keresztmetszetű hengeres rudat, amelynek a méretei egyeznek a fúró befoglaló méretével. A vékonyabb fúrót tehát egy  $d=9\text{mm}$  átmérőjű  $l=94\text{mm}$  hosszú (a fúró tokmányból kiálló hossza) egyik végén befogott húrnak tekintettük. Tudjuk, hogy ha a tömeg nélküli húr végére egy  $m$  tömeget rögzítünk, akkor a kialakuló rezgés körfrekvenciája:

$$\omega = \sqrt{D/m}, \quad (8)$$

ahol  $D$  a húr „rugóállandója”<sup>1</sup>. A mi esetünkben a tömeg nem koncentrált, hanem a húr mentén van elosztva, hisz az magának a húrnak a tömege. Közelítésként vegyük úgy, hogy az a húr középre koncentrált, azaz lényegében egy  $l/2$  hosszú húrt tekintünk!

A [75] irodalomból ismert, hogy az egyik végén befogott húr lehajlása:

$$s = \frac{1}{3E} \times \frac{l^3}{I} F, \quad \text{ahol} \quad I_{\text{kör}} = \frac{\pi}{4} R^4 \quad (9)$$

és  $F$  az alkalmazott erő. Kifejezve az erőt

$$F = \frac{3E\pi R^4}{4l^3} s \quad \text{amiből a "rugóállandó"} \quad D = \frac{3E\pi R^4}{4l^3}. \quad (10)$$

Az acél rugalmassági modulusát  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{Pa}$  értéknek véve a megadott adatokkal  $D = 1,86 \cdot 10^6 \text{ N/m}$  adódik. Az acél sűrűségét  $7800 \text{ kg/m}^3$ -nek véve a húr tömegére pedig  $m = 0,0466 \text{ kg}$  adódik. (A fúró tokmányból kilógó része a horony miatt ennél kisebb tömegű, de mi most a modellünket tekintjük.) Mindezekkel a körfrekvenciára  $\omega = 6315 \text{ 1/s}$ , a frekvenciára pedig  $f = 1005 \text{ Hz}$  adódik. Ez kb. 50%-kal meghaladja a kísérletileg talált 668 Hz és 709 Hz értékeket. Ezen a ponton még nem volt világos, hogy az eltérés a hengeres rúd rossz modellezése, vagy a hengeres rúd és a fúró („hornyozás” miatti) különbözőségének tulajdonítható-e inkább. A „hornyozás” hatása nyilvánvalóan ilyen irányú, mert a fúróban a horony jobban csökkenti a  $D$  értékét (az  $R^4$  függés miatt – lásd (10)), mint a tömeget (ami  $R^2$ -tel arányos). Tehát a modellre számított frekvenciának biztosan nagyobbak kellett adódnia, mint a fúró rezgésének tényleges frekvenciái.

A legvastagabb fúró adatai:  $l = 121 \text{ mm}$ ,  $d = 12 \text{ mm}$ . Ezekkel az adatokkal (változatlan rugalmassági modulus és sűrűséget feltételezve) a  $D$  értéke 1,482-szeresére, a tömeg 2,288-szeresére adódik, tehát csupán a modell pálcák geometriai adatai miatt is csökkennie kell a frekvenciának bő 19,5%-kal. Ha a közepes fúró adatait ( $l = 104 \text{ mm}$ ,  $d = 10 \text{ mm}$ ) tekintjük, akkor pedig 9,3%-kal kisebb frekvenciát várunk, mint a legvékonyabb fúró esetében.

<sup>1</sup>A „rugóállandó” kifejezésre a fizika tudományterületen érvényes szóhasználatban hivatkozok (angolul - spring constant). Mérnöki tudományoknál a „rugómerevség” kifejezés használatos ugyanezen fogalomra.

## 3.3.3.2 A HANGVILLA MODELLJE

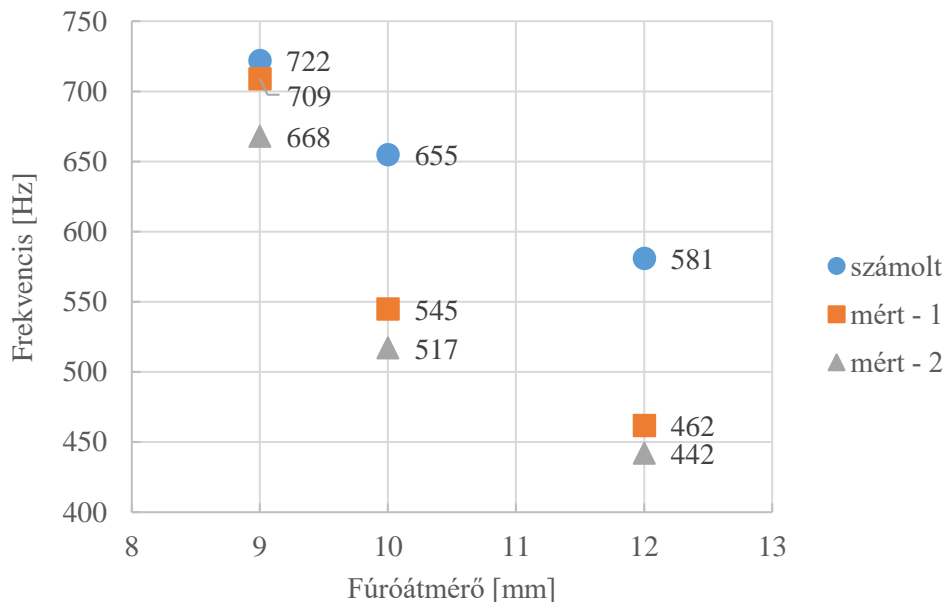
Az irodalomban találtunk valóságos tömegeloszlású hangvilla modell elméleti leírását is. Ez az elmélet henger alakú villaágak esetére [77][78]:

$$\omega = \frac{1,875^2 R}{2l^2} \sqrt{E/\rho} \quad (11)$$

Az előző pontban leírt egyszerűsített modell alapján is kifejezhetjük hasonló alakban a körfrekvenciát. Ehhez a (8) egyenletbe be kell írni a (10) egyenletből a D-t (figyelembe véve, hogy itt  $l$  helyébe  $l/2$  írandó) és be kell írni a tömeget ( $m=R2\pi \cdot l \cdot \rho$ ) is a teljes  $l$ -lel:

$$\omega = \sqrt{D/m} = \sqrt{24ER^2/4l^4 \rho} = \frac{\sqrt{6}R}{l^2} \sqrt{E/\rho} \quad (12)$$

A (11) eredmény a (12)-nél 28,2%-kal kisebb, azaz  $\omega(11)=0,718 \omega(12)$ . Vagyis az egyszerű modellünkben használt koncentrált tömeg kb. 40%-kal nagyobb ( $\omega(8)=1,393 \omega(11)$ ) frekvenciákra vezet, mint a homogén tömegeloszlásból levezetett érték. A hangvilla modellel a (11) egyenlet alapján a legvékonyabb fűrónak megfelelő hengeres hangvilla ágakra számított frekvencia 722Hz lesz, ami még közelebb van a kísérletileg talált 668Hz és 709Hz értékekhez. Azt gondoljuk, hogy ez a pár százalékos eltérés már tényleg csak a „hornyozás” következménye lehet. Ahogy fentebb is írtuk, a hornyozásnak mindenképpen csökkentenie kell a hengeres rúd rezgési frekvenciáját. A másik két fűrora a hangvilla modell 655Hz ( $d=10\text{mm}$ ), illetve 581Hz ( $d=12\text{mm}$ ) sajátfrekvencia értékeket ad.



31. ábra: A fűrósárak mért rezgési frekvenciáinak összevetése az egyező méretű hengeres rudak számított frekvenciáival (növekvő frekvencia szerint a 12mm, a 10mm és a 9mm átmérőjű fűrósárak)

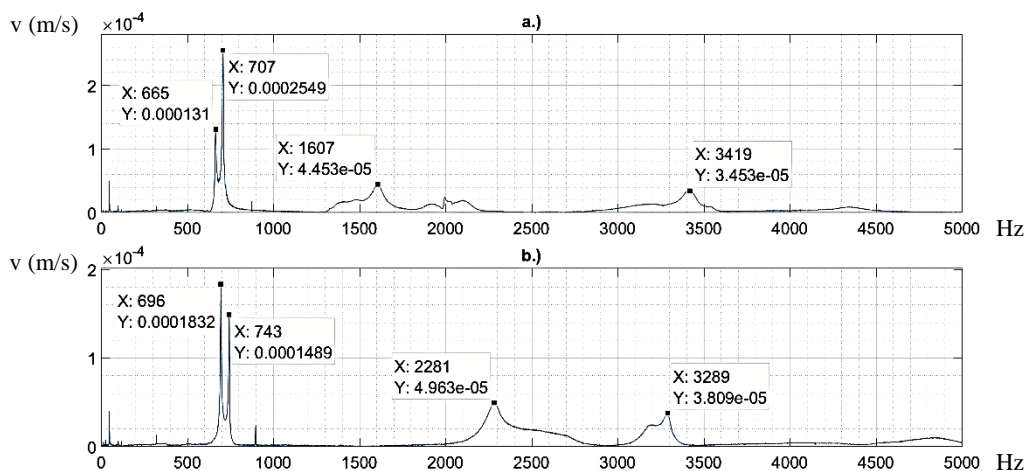
Ha ezeket a számított frekvencia értékeket összevetjük a fűrósár rezgések mért frekvenciáival (31. ábra), akkor láthatjuk, hogy az eltérés erős függvénye a fűrósár átmérőjének. A nagyobb mért frekvencia érték a 9mm-es fűró esetén csak kb. 2%-kal van a hengeres rúdra számított alatt. Viszont a 10mm-es fűró esetén az eltérés már 16,8%-os, a 12mm-es fűró esetén pedig 20,5%-os.

Ezt a tendenciát minden bizonnyal az okozza, hogy a horony méretei (mélysége és szélessége is) relatíve gyorsabban nőnek, mint a fúrószár átmérője. Tehát a vastagabb fúróból relatíve is több anyag van kimarva, mint a vékonyabból.

Megjegyezzük, hogy a befogott hengeres rúd egyszerű modelljére levezetett (12) képlet akkor egyezne a hangvillára érvényes (11) képlettel, ha az előbbiben  $l$  helyére  $l'=1,180l$ -t íránk. Ez azt jelenti – mivel a modellünkben a koncentrált tömeget középre, azaz a  $0,5l$  pozícióba tettük – hogy a  $0,59l$  pozícióba tett koncentrált tömeggel adódik ki hangvillára levezetett képlet.

A 29. ábra mutatta, hogy milyen hatása van a rezgési spektrumra annak, hogy ha a fúrót a tokmányból 3mm-rel kintebb húzzuk, azaz a fúró tokmányon kívüli hosszát kb. 2,5%-kal megnöveljük ( $l' = 1,025l$ ). Láttuk, hogy a kihúzás a rezgési frekvenciákat 10-11Hz-cel csökkenti, ami kb. 2,5% csökkenést jelent. A (11) és (12) egyenletek szerint az  $1/l^2$ -es függés miatt a modell alapján azonban kb. 5%-os frekvencia csökkenést várnánk. A különbség minden bizonnyal abból adódik, hogy a kihúzással nem csupán a fúrószár hosszát, hanem ezen belül a fúrószárnak a horony nélküli hosszát is megnöveltük. Vagyis egy picit közelítettük a fúrószárat a hengeres rúd modellhez, aminek viszont kb. 10%-kal nagyobb a rezgési frekvenciája. Tehát az 5%-os csökkenés felét a modellhez való közeledés kompenzálhatta.

Az egy oldalon befogott hengeres rudak rezgésének első felharmonikusát úgy kapjuk, hogy a (11) képletben az  $1,875^2$  helyett  $4,69^2$ -et írunk [76][78]. Ez azt jelenti, hogy a felharmonikus frekvencia az alaphfrekvencia 6,26-szorosa. Ez a 9mm-es fúró estében 4,18kHz és 4,44kHz felharmonikus (mért) frekvenciákat jelent. A 28. ábra /b grafikonján ezen a környéken látunk is egy kisebb csúcsot. Mindazonáltal az ábrán látható többi, az alaphmódus fölötti frekvencia hengeres rúd rezgésként való értelmezése nem lehetséges. Ezek nem csupán a hornyozástól, hanem a fúrószár befogás módjától is függenek. A 32. ábra azt mutatja be, hogy a különböző tokmányok – ugyanazt a fúrót ugyanolyan körülmények között mérve – hogyan befolyásolják a rezgési spektrumot. Látható, hogy a tokmány típusa pár százalék erejéig hatással van az alaphfrekvenciákra is. A hajtott tokmány – ugyanolyan fúrókilógás mellett – rövidebb szabad fúrószárat jelent, azaz vélhetően hosszabban vagy „kintebb” fogja meg a fúrószárat. A magasabb frekvenciájú komponensek azonban teljesen különböznek, bár a fenti modellekben szereplő adatokban nem történt változás.



32. ábra: A 9mm átmérőjű, rögzített és „hajtott” típusú tokmányba fogott fúrószár (lézersugárra merőleges fémes koppintás) rezgési spektrumai (FFT): a.) 3-pofás tokmányba fogott, rögzített fúró, b.) hajtott, befogóperselyes tokmányba fogott fúró



### 3.3.3.3 A BEFOGOTT ÉS A FÚRÓSZÁR CSÚCSÁNÁL MEGTÁMASZTOTT FÚRÓSZÁR MODELLEZÉSE

Amikor a befogott fúró csúcsát nekitoltuk az álló munkadarabnak, akkor azt a véget pontszerű módon fogtuk meg. Ez a helyzet leginkább az egyik végén befogott, a másik végén csuklósan megfogott rúddal modellezhető. Nyilvánvaló, hogy a megtámasztás és a csuklós megfogás nem pontosan ugyanazt jelenti, de talán nincs közte nagy különbség. Különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a támasztáskor alkalmazott erőnek nem volt hatása a rezgési spektrumra.

A különbözőképpen befogott egyenletes tömegeloszlású rudak rezgései analitikusan is tárgyalhatók [79]. Az egyik végén befogott, a másik szabad szabályos hengeres rudak rezgéseire a [80] irodalomban megadott képlet a (11) képlettel azonos alakra hozható. (Valójában a 1,8752 helyett 1,872 áll, de ez minden bizonnyal csak kerekítési eltérés.) Az egyik végén befogott, a másik végén csuklósan megfogott hengeres rúd rezgéseit leíró képletben fellépő együttható értéke a [68] irodalom szerint 3,922, ami a szabad végű rúdhoz képest 4,37-szer nagyobb frekvenciát eredményezne. A mérések viszont csak 2,73-szor (=1405/515) adtak nagyobb frekvenciát. Egészen pontosan a 10mm-es fúrószár befoglaló adatainak megfelelő egyenletes tömegeloszlású egyik végén befogott, a másik végén csuklósan megfogott hengeres rúd számított sajátfrekvenciája 2570Hz, míg a fúrószár mért sajátfrekvenciája csak 1405Hz. Ez a nagy eltérés is minden bizonnyal a hornyozás következménye.

### 3.3.4 KÖVETKEZTETÉSEK

Megállapítottuk, hogy a tokmányba fogott és megpendített fúrószárak keresztirányú szabad rezgéseit általában két, egymáshoz közeli (néhány %-on belüli) frekvenciájú komponens szuperpozíciójából származó lebegés dominálja, amelyek a fúrószárak horonyvég irányú és az arra merőleges keresztirányú rezgéséhez tartoznak. Ez főleg a fúrószár lézersugárra merőleges koppintás utáni rezgése esetén igaz, ekkor a rezgések harmonikusak. Lézersugár irányú koppintás esetén az első rezgések erősen anharmonikusak.

A fúrószárakat egyik végén befogott kör keresztmetszetű hengeres rudaknak tekintve modelleztük a rezgéseket. A hangvilla modell a 9mm átmérőjű fúrószár szabad rezgéseinek frekvenciáit pár százalékon belüli pontossággal megadja, a vastagabb (10 és 12mm-es) fúrószárak esetében viszont 15-20%-kal felülbecsli. Ennek az oka minden bizonnyal a vastagabb fúrók (relatív értelemben is) nagyobb horony mérete.

A fúróvég megtámasztása (amit úgy értük el, hogy nekitoltuk a fúrót egy álló munkadarabnak) a rezgési frekvenciát kb. 2,7-szeresére növelte, szemben a hengeres rudakra elméletileg levezetett 4,37-szeres értékkel. A fúrószár tokmányból kintebb húzása csökkentette a rezgési frekvenciákat kb. olyan arányban, ahogy a fúró tokmányon kívüli hossza növekedett.

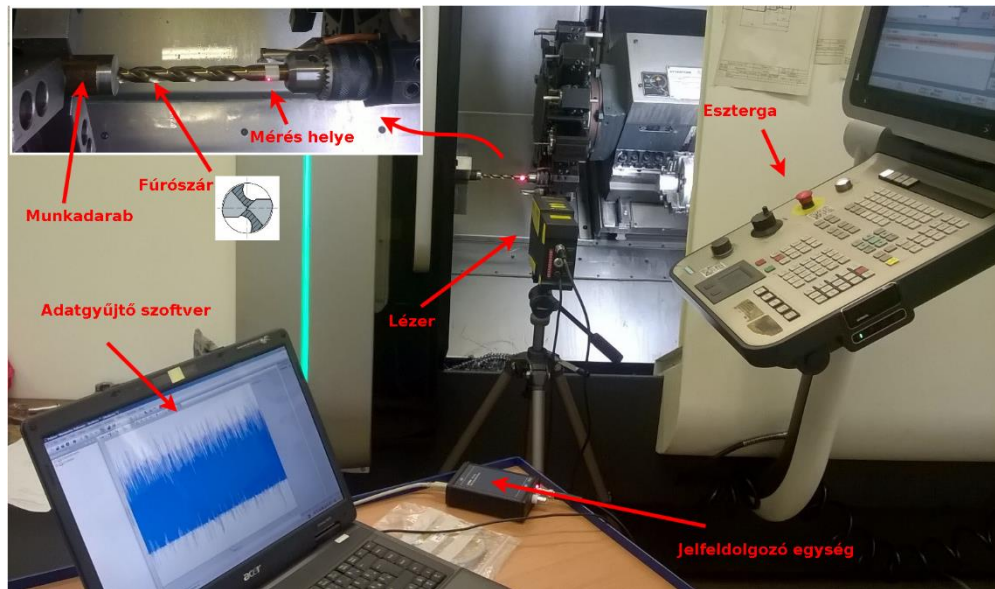
A koppintás típusa is jelentős hatással volt a rezgési spektrumra. A tompa koppintás (gumikalapács) eredményezte a fentebb tárgyalt alapprofrendenciákat. Az éles koppintás (másik fúrószárral) számos további magasabb frekvenciájú rezgést is eredményezett, amelyeket a hengeres rúd modellel nem tudunk értelmezni.

## 3.4 FÚRÓSZÁR FÚRÁS KÖZBENI REZGÉSEINEK MÉRÉSE LDV MÓDSZERREL

### 3.4.1 MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A méréseket a Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet Szerszámgépek Intézeti Tanszéke (SGT) műhelyében végeztük a DMG CPX Alpha500 általános esztergán. A fúrás során a fúró állt,

miközben a munkadarab forgott. A saját állványára (tripod) szerelt LDV-vel a fúrószár oldalirányú rezgéseit mértük a szerszámgépen kívülről (33. ábra). A mérések többségében hűtő-kenő folyadékot kellett használni, ennek az LDV-re fröccsenését mindenképpen el kellett kerülni. Ezért ezek a forgácsolás közbeni mérések zárt burkolatajtó mellett történtek. Így a burkolat plexi ablakán kellett a szerszámra irányítani a lézer sugarát, amely további zajt okozhatott a mérési jelben.

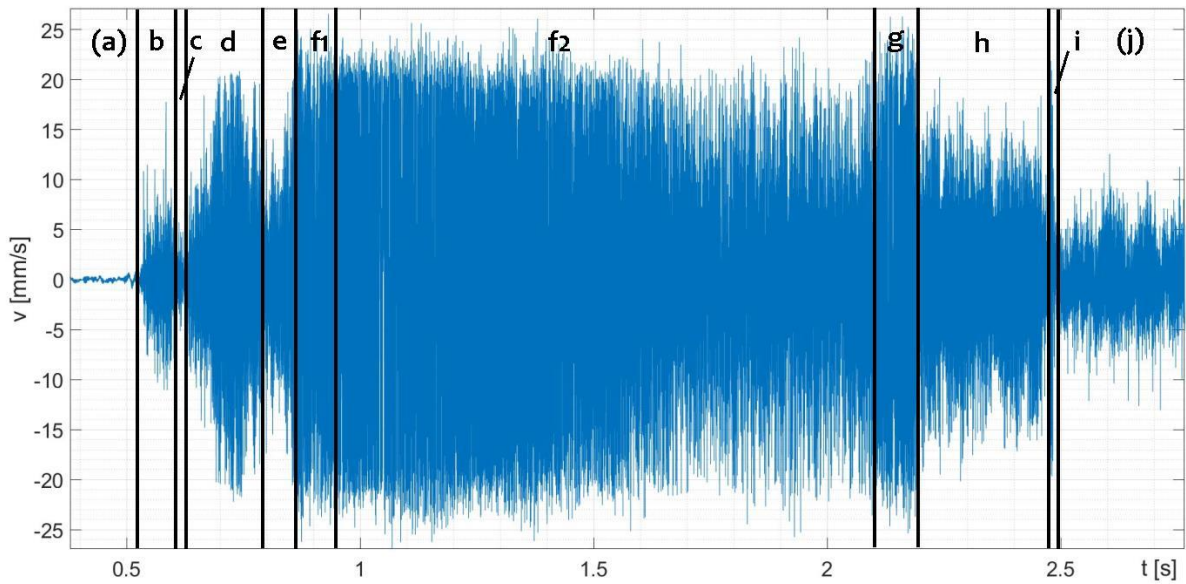


33. ábra: Az LDV mérési elrendezés

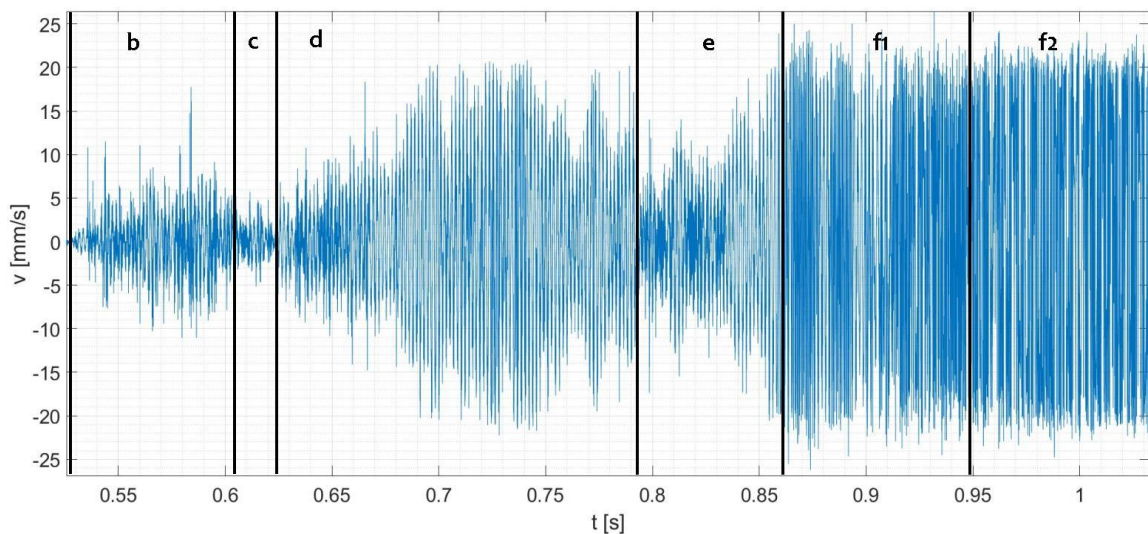
A következő fejezetben bemutatott fúrás során felhasznált fúró HSS Co5 (DIN338) típusú, ebben a fúrásban egy 9.0 mm átmérőjű fúrót használtunk kiköszörült keresztlél, 118° csúcszöggel, 101 mm dolgozó hosszal (teljes hossz 151 mm) folyamatos folyadékűtéssel (ezt nem lehetett kiküszöbölni a szerszám-munkadarab anyagpárosítása miatt). Még akkor sem, ha a megmunkálás sebességét (illetve a főorsó fordulatszámát) alacsonyan tartottuk. Jelen mérés során a munkadarab  $n=900$  fordulat/perc fordulatszámmal forgott (a fúró pedig állt, ahogy ezt fentebb is leírtuk). Az Fe490-2 anyagminőségű munkadarabban a furatképzést megelőzően 2.5mm átmérőjű előfuratot készítettünk max. 2 mm mélységig. Erre azért volt szükség, hogy elkerüljük a szerszám korábbi kísérleteknél tapasztalt „kóválygását”. A tényleges fúrásnál, a forgácsolási folyamat kezdetén rögtön megindul az előtolás, melynek során a fúrószár előrehalad  $f_z=0.25$ mm/fordulat fogásmélységgel. A fúró előre megy egy megadott mélységet (6mm), majd ezután rögtön visszatér a kiinduló pozíciójára. Itt csak egy pillanatig tartózkodik (1-2ms), majd egyenes interpolációval visszamegy a referenciapontra.

### 3.4.2 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben az elvégzett kb. száz fúrás során végzett lézeres rezgésmérés közül egyet mutatunk be (ennek a kódszáma a 68-as) [50]. A rezgési sebesség fúrás közbeni időfüggését a 34. ábra szemlélteti. De csak elvben, mert a sok ezer rezgés egyetlen ábrán nyilvánvalóan nem ábrázolható. Az ábrán lényegében csak a rezgési sebességamplitúdó (amplitúdók) változása követhető. Ezek alapján megpróbáltuk a különböző fúrási szakaszokat elkülöníteni (a-h szakaszok) és az elkülönített szakaszokat külön megvizsgálni. A szakaszok elkülönítése tehát az ábrán is jól látható rezgési amplitúdó változások alapján történt, de a szakaszok jól egyeznek a fúrás paramétereire alapján kalkulált szakaszokkal is.



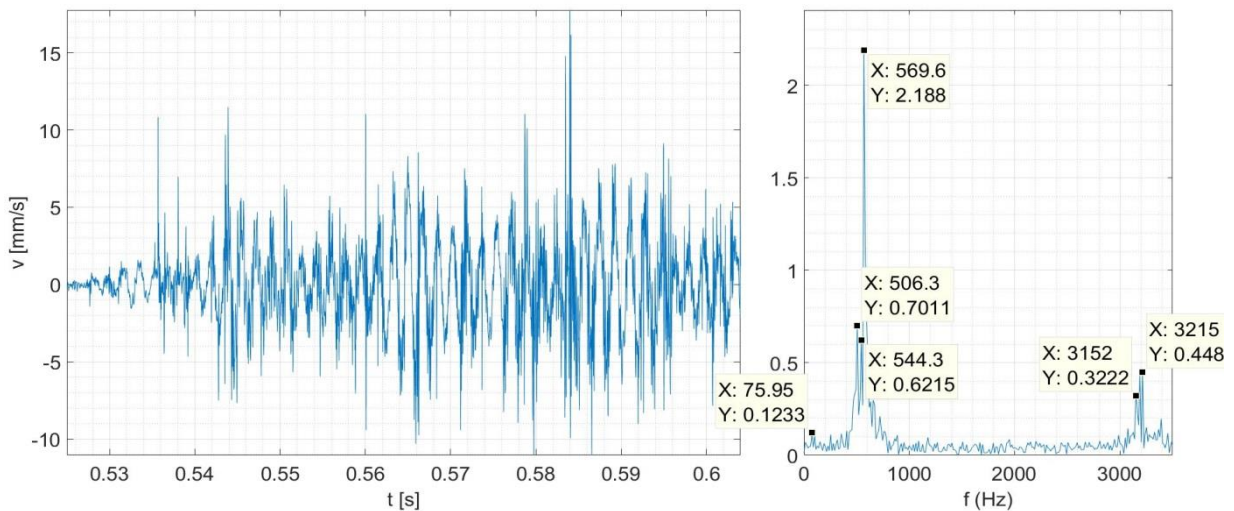
34. ábra: A fúrószár keresztirányú rezgési sebességének időfüggése a kiválasztott mérésben. Az ábrán a fúrési szakaszokat is bejelöltük



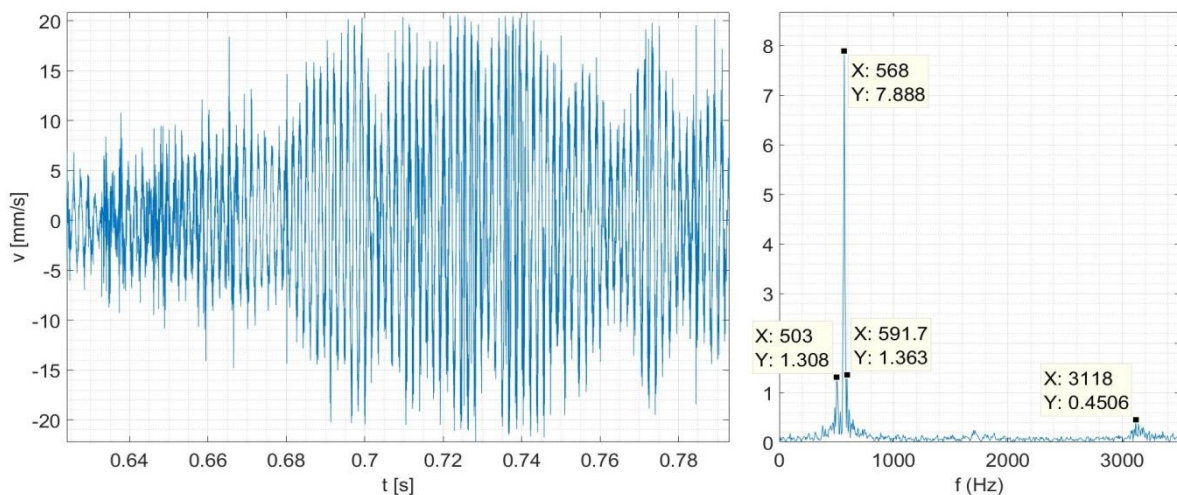
35. ábra: A fúrás 34. ábra által bemutatott első szakaszának (0,5-1,05s) kinagyított része

A fúrás a (b) szakasszal kezdődik kb. 0,53s-os időkoordinátánál (34-35. ábra). Bár a (b), (c), (d) és (e) szakaszokban a rezgési amplitúdók jelentősen változnak, a rezgés frekvenciaspektruma azonban igen hasonló képet mutat. Ebben erősen dominál egy 566-568 Hz-es rezgés, néhány közeli frekvenciás szatellittel. Általában jól kivehető, de sokkal kisebb amplitúdójú egy 3100-3150 Hz körüli rezgés is (különösen a (b) szakaszban (36. ábra)). Az 566-568 Hz-es rezgés annyira domináns, hogy ez a frekvencia még Fourier-analízis nélkül közvetlenül is leolvasható az 35. ábra sebesség-idő függvényéből (kb. 11 rezgés 0,02s alatt). Ez a domináns frekvencia a 9mm-es fúró 668 és 709Hz-es és a 10mm-es fúró 517 és 545Hz-es szabad rezgési frekvenciái közé esik, de

egyikkel sem egyezik pontosan. Az eltérés okát nem tudtuk kideríteni főleg azért, mert a szabad és fúrás közbeni rezgés mérések között hosszabb idő (kb. egy év) telt el.



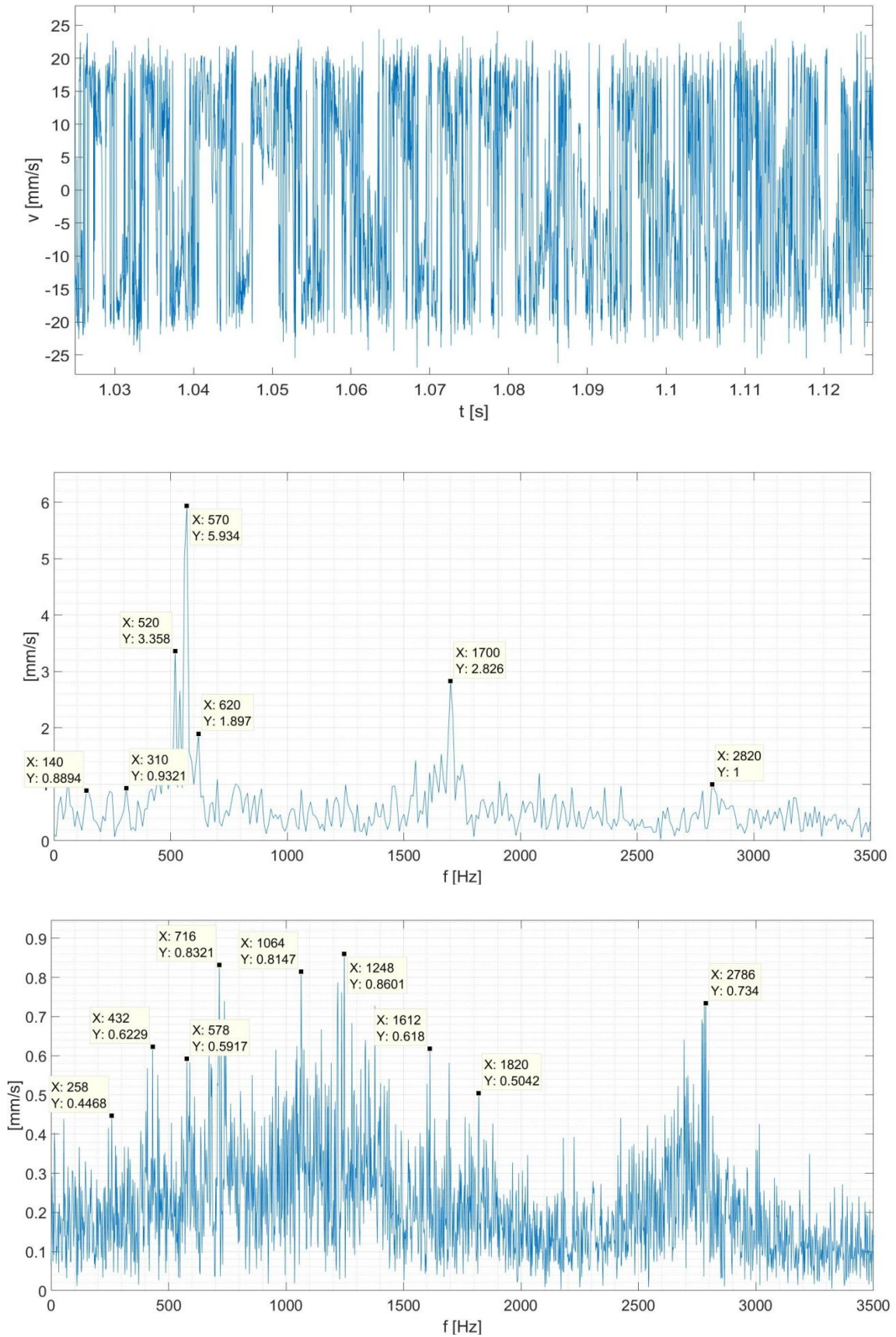
36. ábra: A (b) fúrási szakasz sebesség-idő függvénye és ennek Fourier-spektruma



37. ábra: A (d) fúrási szakasz sebesség-idő függvénye és ennek Fourier-spektruma

A (c) és (e) szakaszok rezgésképe igen hasonló a 35-37. ábrákon bemutatotthoz (kivéve az amplitúdót), azokat itt külön nem mutatjuk be. Az (e) szakasz kb. 0,86s-nál ér véget, tehát a fúrásnak ez a négy szakaszból álló periódusa 0,33s-ig tart. A  $f_z=0.25\text{mm/fordulat}$  fogásmélység és a  $n=900$  fordulat/perc ( $=15$  1/s) fordulatszámából  $3,75$  mm/s előtolási sebesség adódik, amely  $0,33\text{s}$  alatt  $1,25$  mm elmozdulásra vezet. A fúró geometriájából ( $9.0$  mm átmérőjű,  $118^\circ$  csúcs-szög) az adódik, hogy a fúró hegye egy  $2,7$  mm magasságú kúpot képez. A fúrás megkezdésekor a fúró hegye már az előfuratban van, a munkadarab felszíne alatt  $0,75$  mm-rel ( $=2,5 \times 2,7/9$ ), azaz a fúrónak  $1,25$  mm-t kell megtennie addig, amíg leér a  $2$  mm mély előfurat aljára. Tehát a fúró pontosan az (e) szakasz végén éri el az előfurat alját.

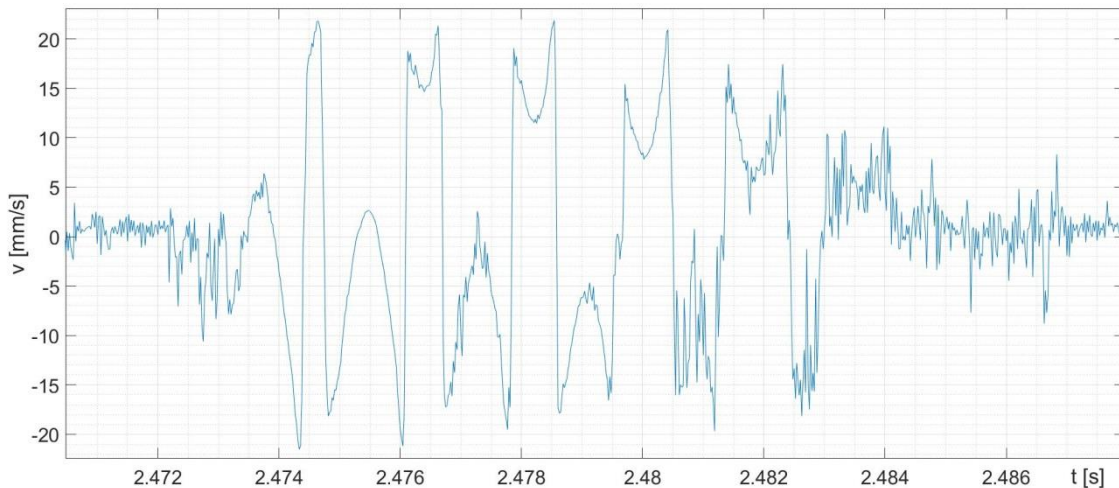
Ezt követően a rezgési amplitúdók megnövekednek, állandósulnak. A 33. ill. 34. ábrára rápillantva egy homogén szakasz következik, amit eredetileg (f) szakasznak nevezünk. Később, a frekvencia spektrumok tanulmányozása során kiderült, hogy a szakasz eleje (f1) egy átmenetet képez a



38. ábra: A ( $f$ ) fúrási szakasz sebesség-idő függvényének egy részlete (fent), az  $f_1$  szakasz (középen) és az  $f_2$  szakasz végének Fourier-spektruma

szakasz „törzse” (f2) és az előző (e) szakasz között. Azaz az amplitúdó már nagy, de a rezgés még szabályos, az 566-568 Hz-es rezgés még domináns, de erősödik egy 1700 Hz-es rezgés is. Megjegyezzük, hogy ez a frekvencia (és a korábbi szakaszokban feltűnő 3,1-3,2kHz is) a fémesen megütött fúró szad rezgési frekvencia spektrumában is jelen van. Az (f2) szakaszban a fúrás rezgéseke viszont gyökeresen megváltozik (38. ábra).

Megszűnik az 566-568 Hz-es rezgés dominanciája, 700Hz, ill. 1-1,3kHz között olyan rezgések támadnak, amelyek a korábbi szakaszokban még nem voltak jelen. Gyengül az 1,7kHz körüli és erősödik a 2,8kHz körüli rezgés. A rezgés teljesen szabálytalanná válik, a Fourier-spektruma szinte folytonos lesz, bár azért néhány bizonytalan csúcs is látszódik benne. Szinte teljesen eltűnik az előző szakaszokat domináló 566-568 Hz-es rezgés is. Az együttes (f1)-(f2) szakasznak a hossza 1,26s (=2,12-0,86), ez alatt a fúró elvben 4,725mm-t halad, ami a (b), (c), (d) és (e) szakaszokban megtett 1,25 mm-rel együtt szinte pontosan kiadja az előre beállított 6 mm értéket. Megjegyezzük, hogy az (e) szakasz után elvben 0,19s elteltével (tehát további 0,7 mm megtétele után) jutunk el oda, hogy a fúró oldala is elérje a munkadarabot, ami után a fúró már teljes keresztmetszetében fúr. Ez a pillanat egyik grafikon esetén sem okoz drámai változást.



39. ábra: A fúró „csigavonalának” az áthaladása a lézernyalábon

A 2. táblázat összefoglalja a különböző fúrási szakaszok jellemzőit, beleértve a Fourier-analízissel meghatározott jellemző rezgési frekvenciákat (a legjellemzőbbet vastagon kiemelve). A táblázat a fúró kihúzási szakaszainak ((g), (h), (i), (j) szakaszok), adatait is tartalmazza. Ezeknek a kihúzási szakaszoknak a további tanulmányozására a jelen dolgozatban már nincs lehetőség. Egy érdekességet azonban még bemutatunk a 39. ábra. Itt azt a pillanatot láthatjuk, amint a fúró „csavarvonala” elhalad a lézer előtt. A legmeredekebb részeken a gyorsulás látszólag meghaladja a  $300 \text{ m/s}^2$  értéket is. Ez azonban nem egy valóságos gyorsulás, mert a lézernyaláb különböző pontokról verődik vissza, amint végigsöpri a kihúzott fúró éleit.

2. táblázat: A különböző a fúrási szakaszok főbb jellemzői

Szakasz jele	Mérési időtartomány [s]	Jellemző frekvenciák [Hz] ~	Megjegyzés
a	0 – 0,524	15,2 30,5 47,6 120 320 430,5 483,8 503 <b>514,3</b> 550,5 571,4 609,5	
b	0,524 – 0,604	75,95 506,3 <b>569,6</b> 3152 3215	
c	0,604 – 0,624	400 500 <b>600</b> 3150	
d	0,624 – 0,793	503 <b>568</b> 591 3118	
e	0,793 – 0,861	200 500 <b>575</b> 650 825 3100	
f1	0,861 – 0,948	511,1 <b>566,7</b> 622,2 1700 2822	
f2	0,948 – 2,120	<b>129,4</b> 565,1 758,7 1695 2467 2786 3334	fúrás teljes átmérővel
g	2,120 – 2,191	28,2 84,5 112,7 211,3 323,9 <b>521,1</b> 563,4 774,6 1042 1268 1493 2648 3113 3817 5296 5521	furatból vissza
h	2,191 – 2,473	24,8 202,1 358,2 482,3 <b>556,7</b> 592,2 627,7 673,8 1603	ismét a kiindulási helyzet
i	2,473 – 2,483	-	fúrószár a lézer előtt
j	2,783 – 5,461	13,8 27,9 30,9 <b>48,35</b> 56.1 96.36	gyorsmenet hátra

### 3.4.3 KÖVETKEZTETÉSEK

A mérések során a saját állványára szerelt LDV a fúrószár oldalirányú rezgéseit mérte a szerszámgépen kívülről. A fentebbi mérések során a munkadarab forgott, a fúró állt, a mérések zárt burkolatajtó mellett történtek (így a burkolat plexi ablakán kellett a szerszámra irányítani a lézer sugarát). Később álló munkadarabbal, forgó (és vastagabb) fúróval, nyitott burkolatajtó mellett is kellett mérnünk, hogy az egyidejű LTV mérések is lehetővé váljanak.

A különböző fúrási szakaszokat a rezgési sebességamplitúdó változása alapján különítettük el, ezek a szakaszok jól egyeznek a fúrás paramétereinek alapján kalkulált szakaszokkal is.

A fúrás kezdetén és a végén (a kihúzási szakaszban) talált 570Hz körüli éles frekvencia csúcsok minden bizonnyal a 9mm-es fúró szabad rezgéseiként azonosíthatóak, bár az eltérés jelentős (legalább 100Hz). A megmunkálási szakaszban talált 1,7kHz körüli és 2,8kHz körüli széles spektrumú rezgések közül az előbbieket a megtámasztott hegyű fúró elmosódott rezgései lehetnek.

A megkoppintott szabad fúrószár és a megmunkálást végző fúrószár rezgései igen sok ok miatt különbözhetnek. Az okok egy része nem is modellezhető. Eltérést okozhat az is, hogy a két mérés között hosszú idő telt el (kb. egy év), az eszközök közben koptak, elhasználódtak, maga a fúrószár sem az eredeti volt már. De meghibásodások miatt változtatni kellett a mérőállványon és a mérőprogramon is. A fenti méréseket még zárt burkolatajtó mellett végeztük, a többi mérést már kénytelenek voltunk nyitott plexi ajtóval végezni (vagy a plexi lett homályosabb, vagy az LDV gyengült). Ma úgy gondoljuk, hogy a burkolatajtó zárt/nyitottság miatti eltérések jelentősek lehetnek. Zárt burkolatajtó mellett nem tanácsos lézeres méréseket végezni, mert a plexi ajtón visszaverődő lézerefény bizonytalanra teheti a méréseket.

### 3.5 FÚRÓSZÁR FÚRÁS KÖZBENI REZGÉSEINEK MÉRÉSE LDV ÉS LTV MÓDSZEREKKEL

#### 3.5.1 MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A méréseket – hasonlóan az előző fejezetben ismertetett mérésekhez - a Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet Szerszámgépek Intézeti Tanszéke műhelyében végeztük a DMG CTX Alpha500 általános esztergán. Több mérést végeztünk különböző körülmények mellett. Egyrészt gazdaságossági okokból, másrészt a folyadék LDV-re (LTV-re) való fröccsenésének elkerülése miatt igyekeztünk szárazon forgácsolni, többségében azonban hűtő-kenő folyadékot használtunk. A megmunkálás nyitott burkolat mellett történt kellő távolságot tartva a mérőműszer és a fúrószerszám között. A gépjátó eltávolítására az LTV méréstávolságának betartása és a visszaverődött lézersugár megfelelő jelerőssége miatt is szükség volt. Bár az ajtó üvegén keresztül problémamentesen lehet mérni (korábban ezt megtettük), a nélkülük végzett mérések részletgazdagabbnak tűnnek. A fúrószár DVI revolverfejbe volt befogva.

Az LDV méréseket az előző fejezetben bemutatott geometriában végeztük (33. ábra). Fúrás során a fúró állt, miközben a munkadarab forgott. Ilyen megmunkálási körülmény mellett ugyan a munkadarab és a szerszám között egytengelyűségi hiba léphet fel, azonban azt a nyilvánvaló előnyt adja, hogy mérés során elkerülhettük a fúrószár forgásából adódó mérési hibákat.

Az LTV-vel számos mérési sorozat készült. Ezeknél a méréseknél (40. ábra) a fúrószár fordulatszámváltozását figyeltük. Az elvégzett kísérletnél azonban - bár a műszer elvben alkalmas volt az álló helyzetben lévő test szögsebességváltozásainak a mérésére is [49]- csak akkor kaptunk értékelhető eredményeket, ha a fúrót forgattuk és a munkadarab állt. Ennek a felállásnak ugyanakkor az az előnye is megvolt, hogy a munkadarab-szerszám közötti egytengelyűségi problémát ki tudtuk kerülni.



40. ábra: Az LTV mérési elrendezés

Korábban már utaltunk rá, hogy az általunk kölcsönvett és használt LTV készülékben a lézernyaláb távolsága 7,5mm. Ezen adat miatt a korábbi LDV-s mérések során használt 9mm átmérőjű fúró torziós rezgéseit már nem lehetett mérni. Ilyen vékony fúró esetén ui. a két lézersugár túl laposan (a beesési merőlegeshez képest kb. 60° alatt) éri el a fúrószárat és emiatt igen kevés lézerefény jut vissza a vevő készülékhez. Vastagabb fúrószárok esetén egyre javul a helyzet, a 12mm-es fúrószár esetében az LTV már jól működött. (Ekkor egyébként a lézersugár



beesési szöge már  $40^\circ$  alatti.) Emiatt a fúrások során egy 12.0mm átmérőjű fúrót használtunk (Tivoly Co5, 5% Co-tartalom, DIN338).

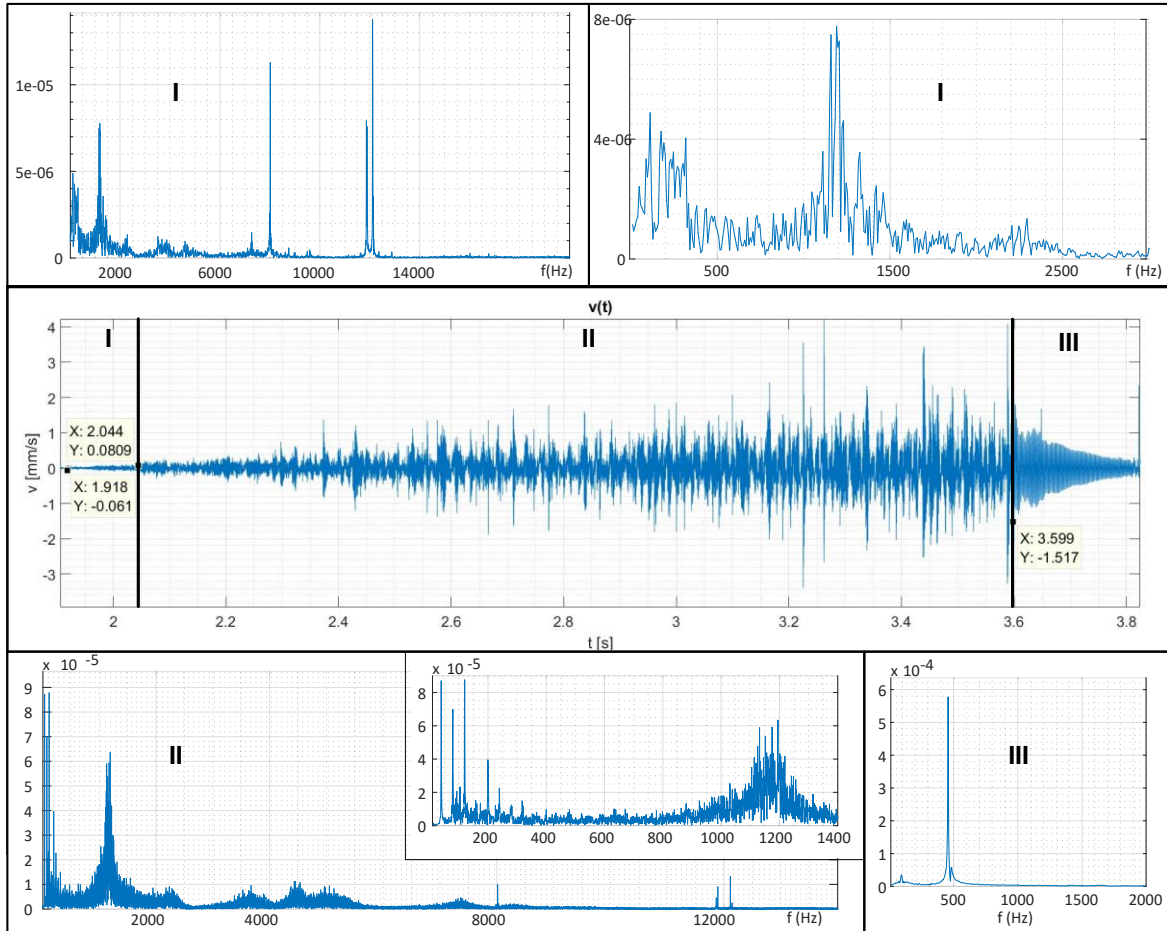
A szerszám horonyszöge  $38^\circ$ , csúcshéja  $130^\circ$ , élézése pedig 1/3-2/3 (a keresztél 1/3 része megmaradt). A dolgozó hossz 101 mm (teljes hossz 151 mm). A megmunkálás sebességét (illetve a főorsó fordulatszámát) alacsonyan tartottuk. Jelen mérések során a szerszám  $n=825$  fordulat/perc fordulatszámmal forgott a munkadarab pedig állt, ahogy ezt fentebb is leírtuk. Tudatosan választottunk kobaltos fúrót, hiszen a jó hővezetőképessége révén forgácsoláskor a hűtő-kenő folyadék mennyiségét csökkenthetjük. Azoknál a kísérleteknél, ahol hűtést használtunk, még a forgácsolás megkezdése előtt hűtőfolyadékot permeteztünk a fúróra, ill. a munkadarabra, tehát munkavégzés közben már nem volt további folyadékadagolás. Mivel nem fúrtunk az anyagban mélyre, ezt a kenést elegendőnek tartottuk. Ugyan ez egy minimálhűtés, de a forgácsolási eredményeken egyértelműen látható az eredménye.

Az Fe490-2 anyagminőségű munkadarabban a furatképzést megelőzően nem készítettünk előfuratot. Erre nem volt szükség a fúró csúcskialakítása miatt. A fúrási forgácsolási folyamat kezdetén rögtön megindul az előtolás, melynek során a fúrószár előrehalad  $f_z=0.1\text{mm/fordulat}$  előtoló sebességgel. A fúró előre megy egy megadott mélységet (3 mm), majd ezután rögtön visszatér a kiinduló pozíciójára. Itt csak egy pillanatig tartózkodik (1-2ms), majd egyenes interpolációval visszamegy a referenciapontra. A fúrószerszámból 141mm volt szabadon és a mérési pont 18mm-re volt a befogás szélétől.

A CNC-gép és a mérőeszköz nem volt elektronikusan összehangolva, indításuk kézzel történt. Nem volt teljesen pontos a munkadarabok befogása sem. Ezért a cikk későbbi időgrafikonjain eltérő kezdeti és végidőpontok szerepelnek, s a fúrási szakasz hosszúságai is különbözőek.

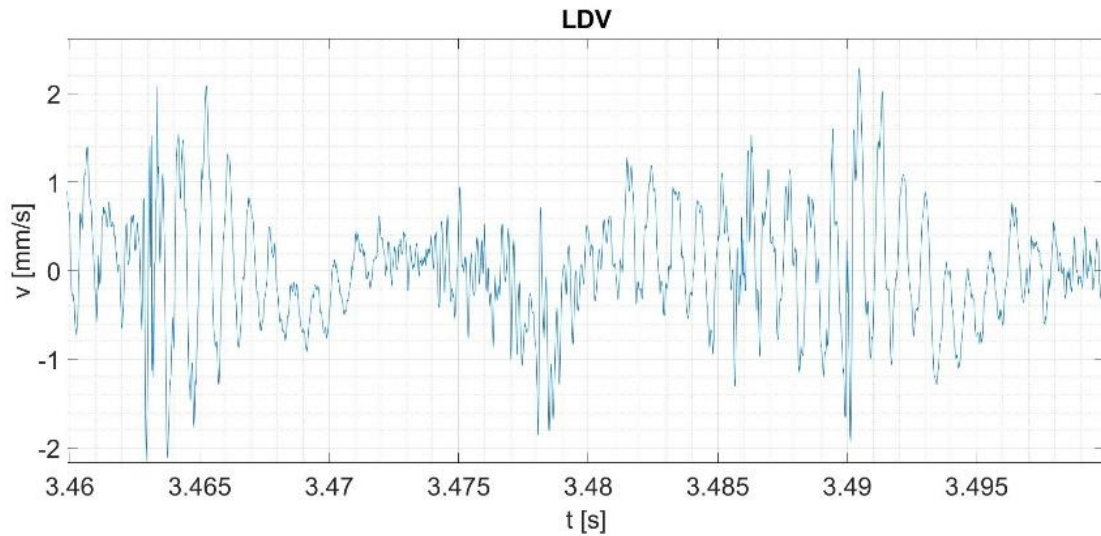
### 3.5.2 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A következő ábrákon egy jellegzetes fúrás közbeni LDV (41. ábra és 42. ábra) ill. egy LTV (43. ábra) mérés összehasonlítását mutatjuk be [52], melyeket hasonló körülmények között végeztünk. A két mérés körülményeit, azok eltéréseit az előző fejezetben már részleteztük. A 41. ábra középső sávjában a fúrószár translációs rezgése lézernyaláb irányú sebességkomponensének időfüggését láthatjuk. A rezgések nagyfrekvenciájú komponensei miatt az ábra ezen része inkább csak a sebesség amplitúdójának időfüggéséről tájékoztat. Már ezen is jól látható a fúrás két szakasza: az indulási szakasz (I) és a forgácsolási szakasz (II). A III szakasz a fúró kihúzási periódusa. Az 42. ábra a II szakasz egy kinagyított részletét mutatja, amelyen már a konkrét időfüggés is jól követhető. Határozottan felismerhető egy 0.01s-nál kisebb és egy 0.001s-nál nagyobb periódus idejű rezgés szuperpozíciója. Az ezeknek megfelelő frekvenciákat a 41. ábra alsó sávjában lévő FFT (Fast Fourier Transformation) diagramon is felismerhetjük.

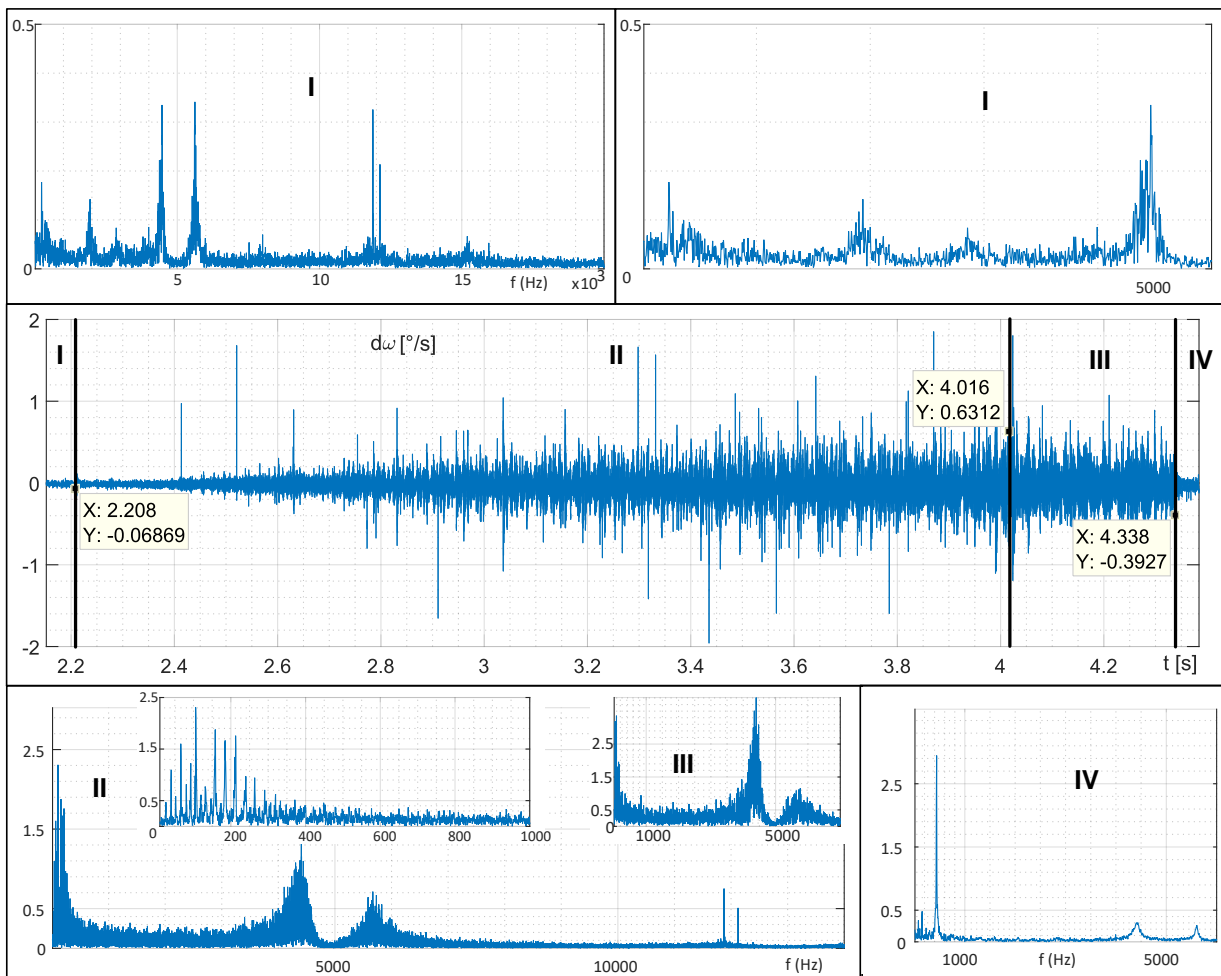


41. ábra: A fúrás közbeni LDV mérés szakaszokra bontása (középen a sebesség-idő függvényen) és a különböző szakaszokat jellemző Fourier-spektrumok (alul és fölül), esetenként a kis frekvenciájú tartomány kinagyítva

Az ábra felső sávjában a I szakaszhoz tartozó FFT-diagramokat láthatjuk. Megállapítható, hogy a I és II szakasz hasonló frekvenciákat tartalmaz. Ezek egyik jellemző csoportja a 100Hz-es tartományba, másik pedig az 1000Hz fölötti tartományba esik. Míg az indulási szakaszban a magasabb frekvenciájú, a forgácsolási szakaszban az alacsonyabb frekvenciájú csoport dominál. Vannak azonban ennél nagyobb frekvenciájú komponensek is. A legnagyobb, határozott komponens 11880Hz ill. 12110Hz-nél van. Ma már úgy gondoljuk, hogy a 4kHz, 8kHz és 12kHz körüli éles frekvencia csúcsok magából az LDV eszközből származnak, minden bizonnyal az akusztó-optikai modulátorból. A mintavételi gyakoriságtól is függ, hogy közülük melyik frekvencia dominál. A jelen mérésben alkalmazott magas mintavételi gyakoriság miatt itt a 12kHz körüli csúcsok dominálnak, de jól látható a 8kHz körüli éles csúcs is. A kihúzási szakaszt lényegében egy frekvencia dominálja a 480Hz. Ez közel esik a 12mm-es fúró 517 és 545Hz-es szabad rezgési frekvenciájához.



42. ábra: Az előbbi ábrán szereplő sebesség-idő függvény egy részlete



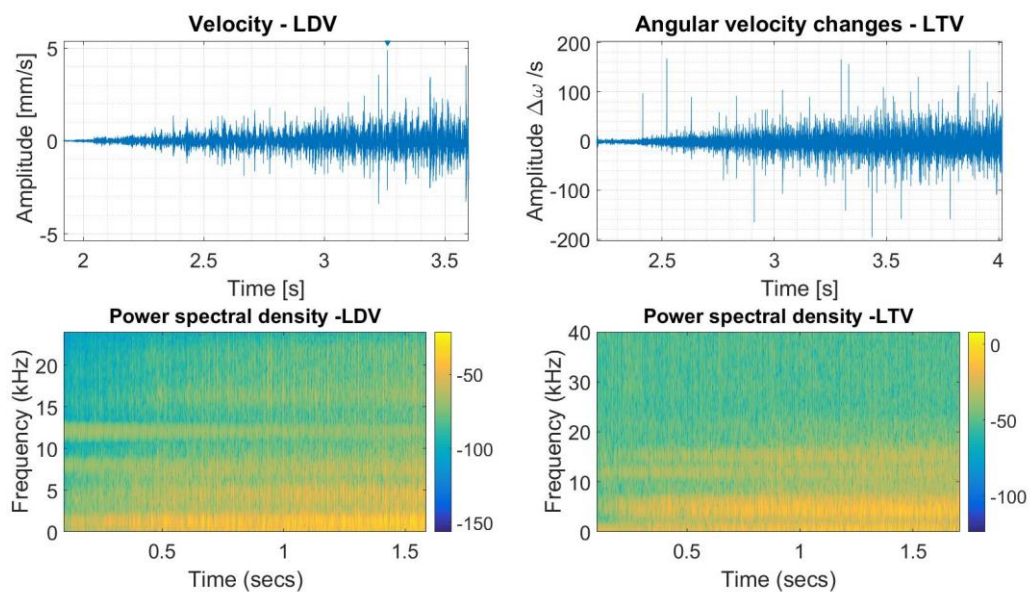
43. ábra: A fűrés közbeni LTV mérés szakaszokra bontása (középen a  $d\omega$  -idő függvényen) és a különböző szakaszokat jellemző Fourier-spektrumok (alul és fölül), esetenként a kis frekvenciájú tartomány kinagyítva

A 43. ábra középső sávjában a fűrészár torziós rezgéseit ( $d\omega$  szögsebesség változásait) láthatjuk az idő függvényében. Az alsó és felső sávban itt is a megfelelő tartományok FFT-spektrumait mutatjuk. Ebben a mérésben eggyel több időszakasz van: a III szakaszban a fűró már teljes keresztmetszetben forgácsol, így a IV szakasz a kihúzási szakasz.

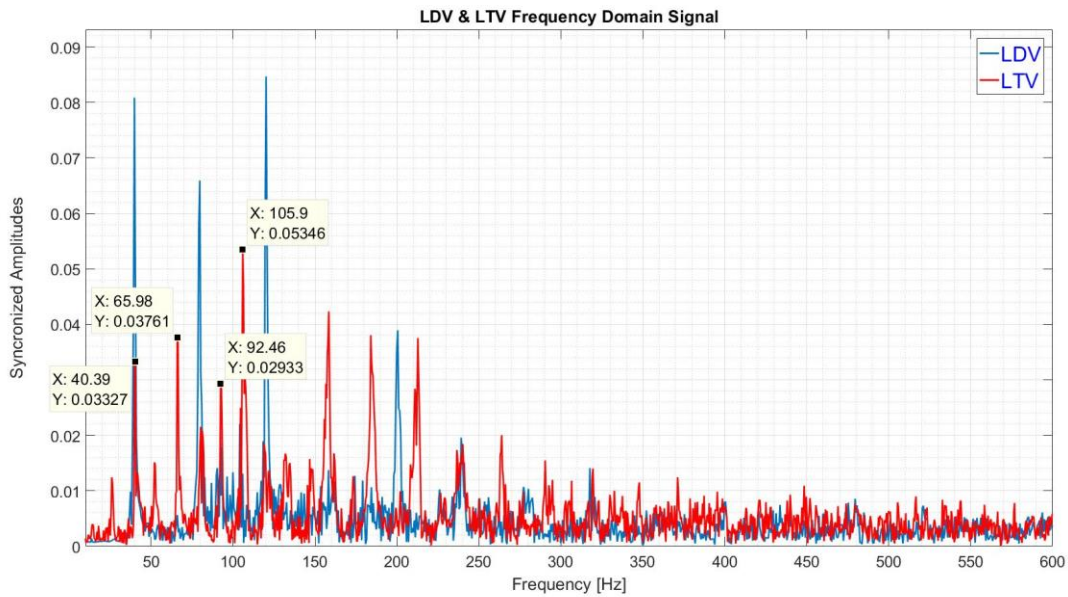
A négy szakasz közös jellemzője a 4400Hz, ill. 5600Hz környékén jelentkező torziós rezgés. A fűrés érdeki szakaszaiban (II, III) ezek a csúcsok elmosódottabbak és jellegzetes alakot mutatnak. Mindezek mellett egy kisfrekvenciájú torziós rezgéscsoport itt is jelen van. Csak a II szakasz elég hosszú ahhoz, hogy ez a csoport határozott csúcsokra essen szét. Ezen a szakaszon mért frekvenciák jelentős része egy, kb.  $13.3 \text{ 1/s-os}$  (ez inkább  $13,75=825/60$ ) fordulatszámú forgás felharmonikusaira utalnak (40.3 Hz, 52.41 Hz, 80.2 Hz, stb.). Ezek azonban nem valódi torziós rezgéseket, hanem ún. pszeudo-rezgéseket jelentenek. A szakirodalom szerint a forgó fűró azon felületének egyenetlenségeitől származnak, amelyet a lézersugár a tárgy mozgása során végigsöpör. Megjegyezzük, hogy az LDV mérések során tapasztalt 12kHz körüli rezgések az I-III szakaszokban itt is megjelennek. A kihúzási szakaszban viszont itt sem láthatók, tehát valószínűleg a munkadarab felőli oldalról származhatnak.

A következőkben megkíséreljük még látványosabbá tenni a szimultán kapott adathalmazokat: a mért LDV és LTV időspektrumok alatt a belőlük MATLAB alkalmazással számított teljesítmény spektrális sűrűségeket ábrázoltuk (44. ábra). A színek ezeket az erősségeket jelzik, a kék az alacsony, a sárga a magas teljesítmény szintet mutatja, önkényes lépésekben és egységekben.

Az LDV spektrumában az alacsonyabb (max. 1500Hz) frekvenciájú összetevők nemcsak számukban, hanem nagyságuk tekintetében is jelentősebbek a felső frekvenciáknál. Az LTV jel FFT-spektrumában viszont határozottan jelen van két nagyobb frekvenciájú jel: 4500Hz és 5700 Hz körül. A spektrális analízisből azonban láthatjuk, hogy mindkettő tartósan jelen van az anyagleválasztás idején. Ugyanakkor felismerhető két, még nagyobb frekvenciájú rezgés (12kHz körül), amely közül viszont az egyik erősödik, a másik gyengül a többihez képest az idő előrehaladtával.



44. ábra. Időtartománybeli jel és a hozzá tartozó teljesítmény-sűrűség függvény



45. ábra. Az LDV és az LTV által mért jel spektruma alsó tartománya

Mindkét FFT-spektrum azonban megegyezik abban, hogy a legalsó frekvenciatartományban határozott csúcsokkal rendelkezik. A két FFT alacsony frekvenciájú részét a 45. ábra egyszerre mutatja be. Jól megfigyelhető, hogy néhány komponens a két rezgésben azonos. Figyelembe kell viszont vennünk, hogy az LTV jelei tartalmazzák azokat a zavarokat is, amelyeket a visszaverő felület mintázata okoz. Ennek következményei a korábban is említett, ún. pszeudorezgések.

### 3.5.3 KÖVETKEZTETÉSEK

A 41. ábra által bemutatott FFT spektrumok jelentősen különböznek a szintén fúrás közben végzett LDV méréseket bemutató korábbi 35-37 ábráktól. Különösen igaz ez a 37. ábrára, amely a fúrásnak azt a szakaszát mutatja, amikor a fúró már teljes keresztmetszetében fúr. Az az ábra egy szinte teljesen „fehér” spektrumot mutatott 3kHz-ig, miközben a jelen mérés II. szakaszát egy 1200Hz körüli rezgés dominálja. Ennek az eltérésnek számos oka lehet. Mint ismeretes az LTV mérés követelményei miatt az utóbbi méréseket vastag (12mm-es) fúróval kellett végezni, nyitott burkolatajtó mellett (így a kenés sem volt lehetséges). Miközben a régi LDV méréseket vékony (9mm-es) fúróval végeztük, zárt burkolatajtó mellett, kenéssel. Ráadásul a két mérés között (meghibásodások miatt) változtatni kellett a mérőállványon és a mérőprogramon is. Ma úgy gondoljuk, hogy az eltérés legfőbb oka a burkolatajtó zártsága/nyitottsága lehet. Zárt burkolatajtó mellett nem tanácsos lézeres méréseket végezni, mert a plexi ajtón visszaverődő lézerefény bizonytalanná teszi a méréseket. Következésképpen a későbbi LDV-s méréseket (41. ábra és 42. ábra) megbízhatóbbnak gondoljuk, mint a korábbiakat (36-38. ábra). Ezt a későbbi kontrol méréseink is megerősítették.

A legfontosabb megállapításainkat azonban mindkét LDV mérési sorozat mutatja:

1, A fúrás kezdetén és a végén (a kihúzási szakaszban) éles frekvencia csúcsok látszanak (9mm: kb. 570Hz, 12mm. kb. 450Hz), amelyek a szabad hegyű fúró szabad rezgéseiként azonosíthatóak.

2, A fúrás érdemi szakaszában a megtámasztott hegyű fúró elmosódott rezgései dominálnak (9mm: kb. 1,7kHz, 12mm. kb. 1,3kHz).

Az egyetlen alkalomra kölcsönkapott LTV készülékkel végzett mérés eredményeiből kiemelhető a 4400Hz, ill. 5600Hz környékén jelentkező torziós rezgés. Ezek behatóbb vizsgálatára később már nem volt lehetőségünk. A spektrumban jelen van még egy kisebb frekvenciájú torziós rezgéscsoport. Ezek jól egybeesnek a fűró fordulatszámának (13.3 1/s) felharmonikusával, amelyek ún. pszeudo-rezgések lehetnek. Ezek a forgó fűró azon felületének egyenetlenségeitől származnak, amelyet a lézersugár a tárgy mozgása során végigsöpör.

### 3.6 LAKÓÉPÜLET REZGÉSEK MÉRÉSE LDV MÓDSZERREL

#### 3.6.1 MÉRÉSI KÖRÜLMÉNYEK

A Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program keretében a Természeti Erőforrások Optimalizálása Korszerű technológiákra alapozva tématerület keretein belül Környezetszemponitú, szimulációra alapozott technológia- és terméktervezés kutatási irány, Környezetterhelés csökkentése rezgés és zaj kutatással téma vonatkozásában igény mutatkozott épület rezgések mérésére is. Az épület rezgések mérése természetesen már régóta megoldott [81]. A jelenleg használt mechanikai módszereket alkalmazó eszközöknél azonban pontosabbak a mi optikai elven működő eszközeink, mindenképpen érdemes tehát megvizsgálni az ilyen irányú felhasználhatóságukat is. Természetesen nem a szabványban megengedett maximálisan megengedett közeli rezgések hiteles mérésére gondolunk, hanem annál sok nagyságrenddel kisebb, inkább tudományos érdeklődésre számot tartó rezgések vizsgálatára. Az eszközeink közül a LIMA megfelelő pontossággal és üzembiztonsággal csak laboratóriumi körülmények között, rezgésmentes asztalra telepítve működik, így elsősorban csak a laboratórium falainak rezgéseit mérheti. A kitelepített mérésekben viszont inkább az LDV módszerre számítunk.

Mint ismeretes, a Miskolcot átszelő villamos pályát nemrégiben felújították, és a felújítás során a fokozott zaj- és rezgésvédelem érdekében a vasbeton lemez alá rezgés és hangelnyelő rugalmas gumipaplan lett beépítve. Ennek ellenére a villamosok elhaladása az épületeket nem csekély rezgésre kényszeríti. A belvárosban ráadásul jelentős számban vannak műemléki illetve műemlék jellegű épületek. Az elhaladó villamosok hatására mind a falak, a padlózat illetve az ablaküvegek rezgésbe jönnek. Ezeket a rezgéseket mértük meg két alkalommal egy a Zenepalota közelében található műemlék jellegű épületben (Luther ház).

Az első mérést 2018. október 10-én végeztük. A rezgéseket az utcai front főfalán kívántuk mérni. Először néhány előzetes méréssel beállítottuk a mérési periódus hosszát. Ezt úgy kellett beállítani, hogy a villamos által okozott rezgések a mérési ciklus közepére kerüljenek. Ki kellett tapasztalnunk azt is, hogy hol járjon az érkező villamos, amikor a mérési ciklust indítjuk. Ezek után elvégeztünk néhány előzetes mérést mindkét irányban haladó villamos esetén. Majd ugyanezeket elvégeztük úgy, hogy az utcafronti ablakokra irányítottuk a lézer doppler jelét. A nyert előzetes méréseket az intézetünkben kiértékeltek, és a tapasztalatok alapján megterveztük az „éles” mérések végrehajtását. Lényeges tapasztalat volt, hogy az ablak nyitottsága vagy zártsága igen lényegesen befolyásolta a mérési eredményeket. A nyitott ablak mellett az elhaladó villamos zaja sokkal erősebben hallatszik. Ez a hang magát az LDV eszközt is rezgésbe hozza, ami minden bizonnyal meghamisítja a méréseket. Ezért az éles méréseket zárt ablak mellett hajtottuk végre, a mérések időpontja 2018. november 6. volt. Három felületen végeztük a méréseket, az utcafronti főfalon, az utcafronti ablakon, illetve egy az utcai fronttól 6 méterre lévő főfalon. Minden esetben négy mérést végeztünk, kettőt-kettőt a különböző irányokba haladó villamosokra. A nyert

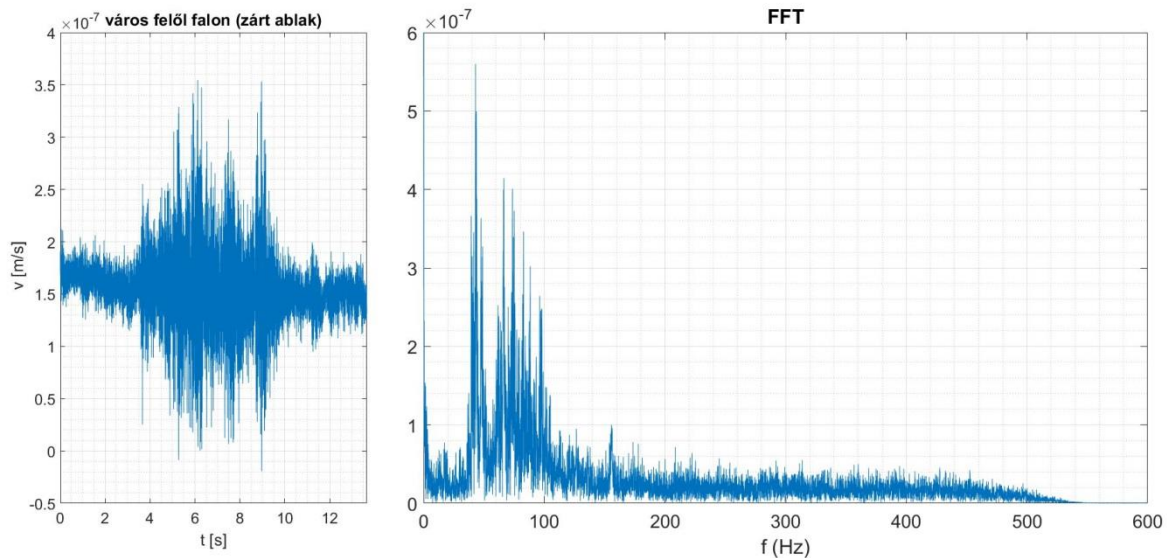
spektrumokat az intézetben kiértékeltek. Megállapítottuk a létrejövő rezgések amplitúdóját és az összetevő frekvenciákat. Elkészítettük a Fourier-spektrumokat.

### 3.6.2 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

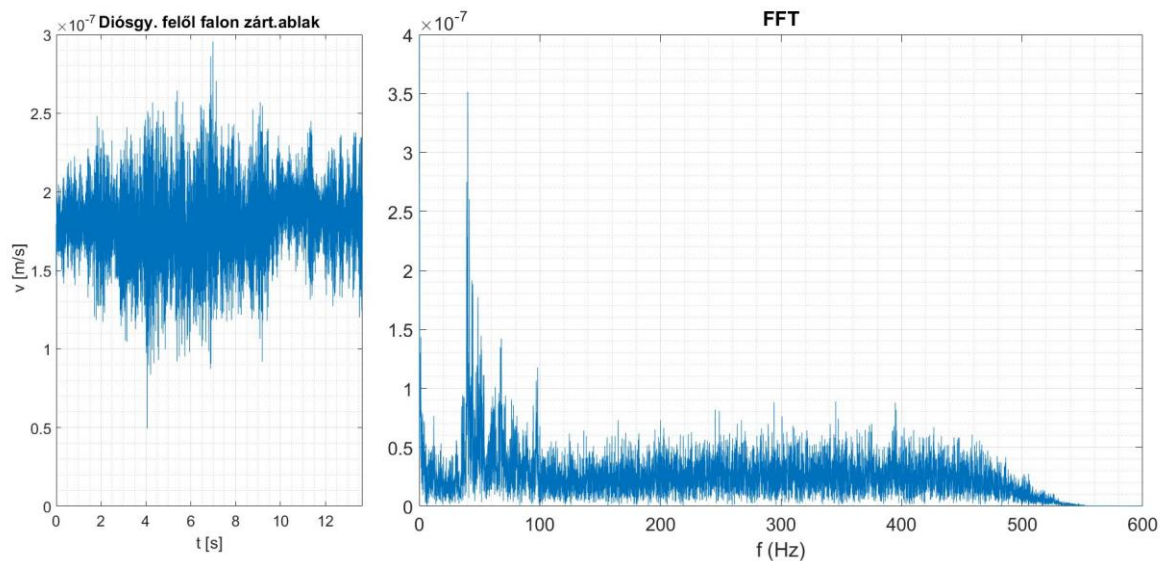
#### 3.6.2.1 MÉRÉSEK AZ UTCAFRONTI FŐFALON

A következő ábrákon bal oldalt mindig az időspektrum (a vizsgált pont lézernyaláb irányú sebesség komponense az idő függvényében), jobb oldalt az FFT spektrum (a rezgési amplitúdó a frekvencia függvényében) látható. A villamos elhaladása 5-10 másodpercig okoz többlet rezgést a falakban és az ablaküvegen. A rezgések erősebbek a város felől érkező (azaz Diósgyőr irányába távozó) villamosok esetén. Minden bizonnyal azért, mert ez a sín pár van közelebb az épülethez. A rezgéseknek elvben a  $v=0$  körül kellene történnie. Az ábrákon ez nem így van, a rezgések egy folyamatos kb.  $2 \times 10^{-7}$  m/s sebességű mozgásra vannak szuperponálódva. Ez a sebesség lehet, hogy valamelyik elem hőtágulásából származik. De az is lehet, hogy szisztematikus mérési hibáról van szó, ami a következtetéseinket alig befolyásolja.

Az időspektrum azonban nem árul el túl sokat a rezgés részleteiről, erről az FFT spektrum többet mond. A főfal rezgéseinek FFT spektrumában a domináns frekvencia 40-42 Hz, de vannak komponensek az 60-100 Hz tartományban is (különösen a város felől érkező villamosok esetén). A spektrumokban megjelenik a kb. 1 Hz-es „zakatolás” is. Érdekes azt is észrevenni, hogy a fal rezgései nem nagyon szabályosak, mindenféle frekvencia előfordul benne, a spektrumnak jelentős folytonos összetevője is van. A rezgések amplitúdója a szabványban [81] megengedett értékek ezredrészét sem éri el.



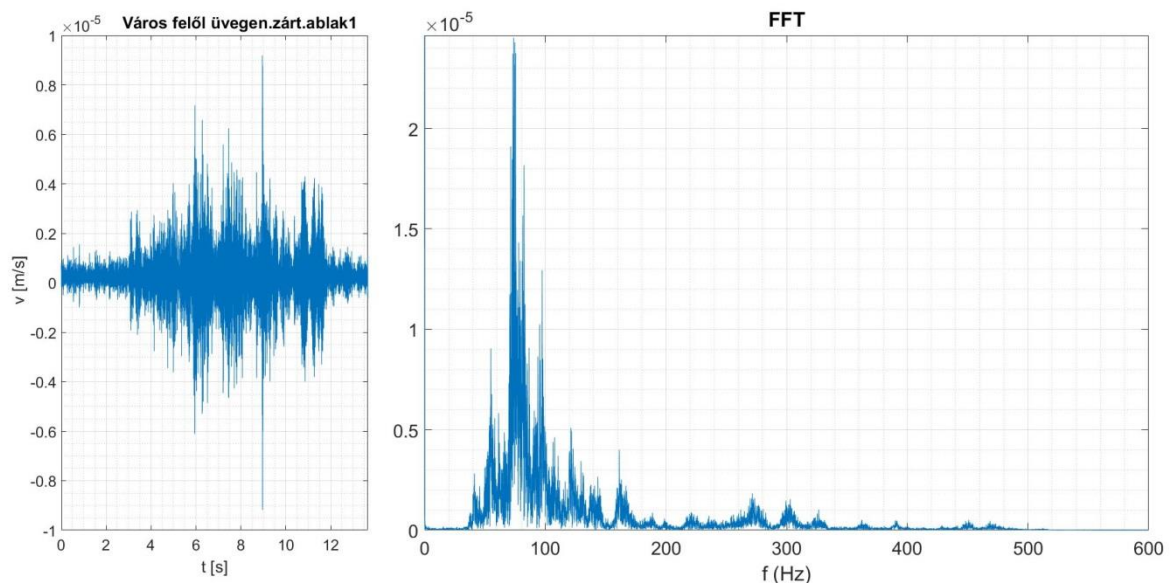
46. ábra: Az utcafronti főfal rezgései a város felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)



47. ábra: Az utcafronti főfal rezgései Diósgyőr felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)

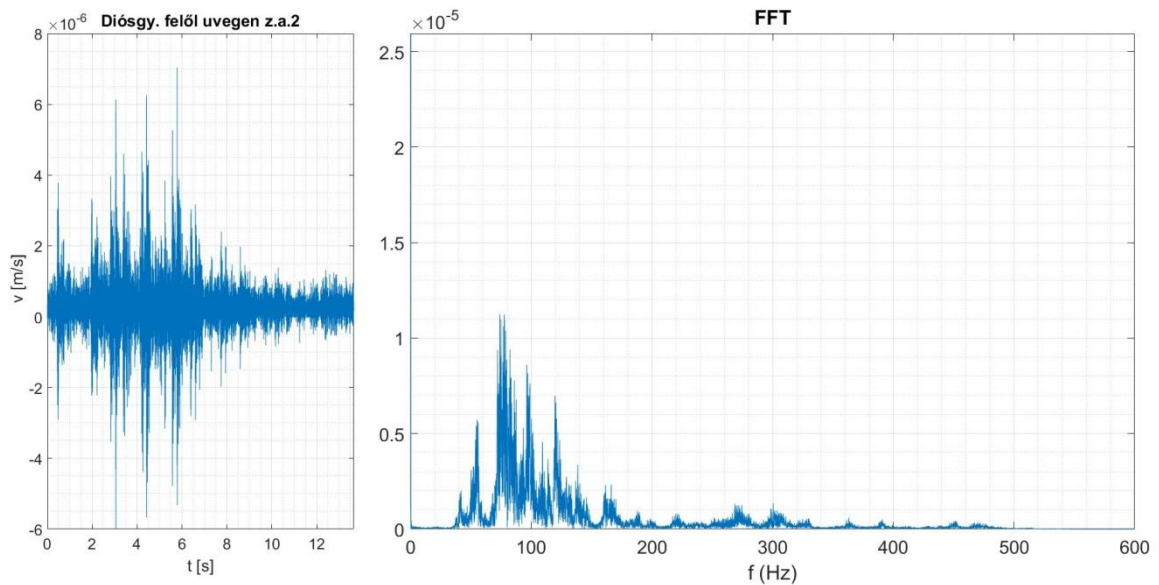
### 3.6.2.2 MÉRÉSEK AZ ABLAKÜVEGEN

Az ablaküveg rezgéseinek amplitúdója közel 2 nagyságrenddel meghaladja a fal rezgéseinek amplitúdóját. Az üveglap szinte „beremeg” a villamos elhaladásakor. A méréseket a belső üveglap belső oldalán végeztük, a külső üveglap minden bizonnyal még nagyobb amplitúdóval rezgett. Az FFT spektrumot egy kb. 75 Hz-es rezgés dominálja. Nem látszik a kb. 1 Hz-es komponens, és alig látszik a fal kb. 40 Hz-es rezgése. Vannak komponensek 55 Hz, 120 Hz és 160 Hz környékén is, de van egy még nagyobb frekvenciás dublett 270 és 300 Hz-en is. Megjegyzendő, hogy az ablaküveg rezgései is erősebbek a közelebbi sín páron haladó villamos esetében. Másrészt az ablaküveg rezgéseinek spektruma nem tartalmaz „fehér” komponenst.



48. ábra: Az ablaküveg rezgései a város felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)

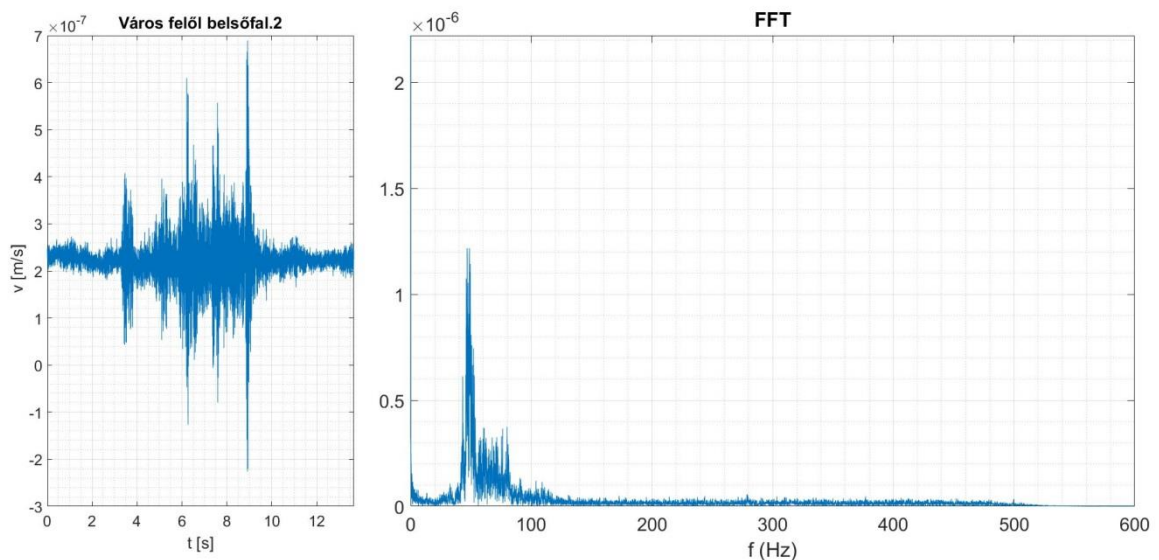




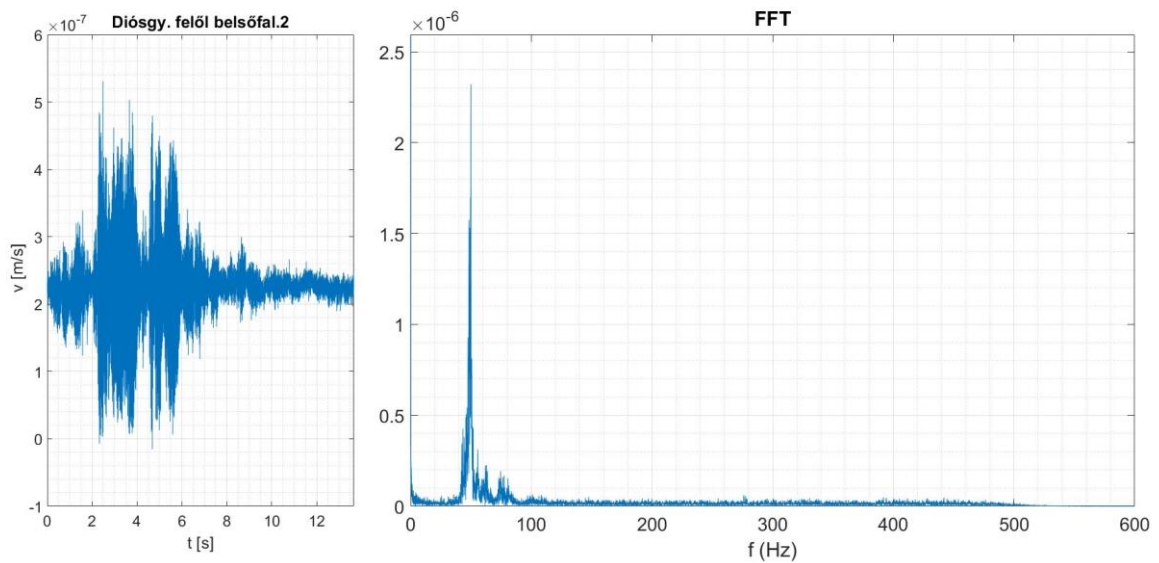
49. ábra: Az ablaküveg rezgései Diósgyőr felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)

### 3.6.2.3 MÉRÉSEK EGY BELSŐ FALON

A belső szobában (bezárt ajtó mellett) az elhaladó villamos zaja már alig hallható, viszont a belső fal rezgései egyáltalán nem kisebbek. Sőt a rezgési amplitúdók még magasabbak. Ez a fal már messze van a villamos sínektől, a rezgési kép szempontjából kisebb jelentőségű, hogy a villamos melyik sínpáron halad. Az FFT spektrumot uralja egy 48-50 Hz-es rezgés. Ez határozottan magasabb, mint a főfal rezgéseiben domináló 40-42 Hz. Ezekben a spektrumokban is megjelenik a kb. 1 Hz-es „zakatolás”, viszont hiányzik a főfal rezgéseinek folytonos összetevője.

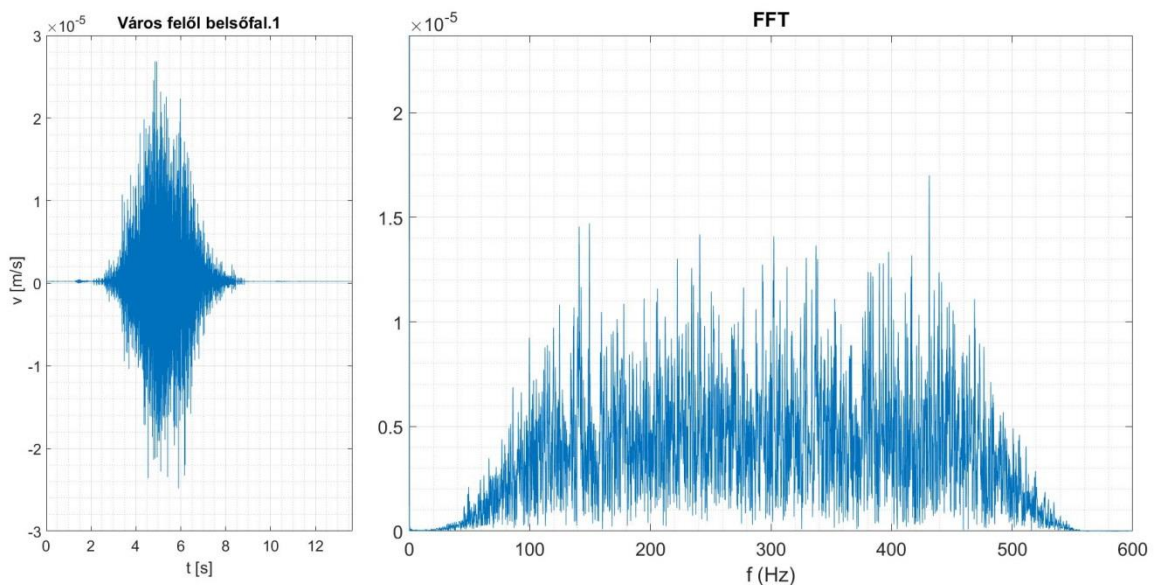


50. ábra: A belső fal rezgései a város felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)

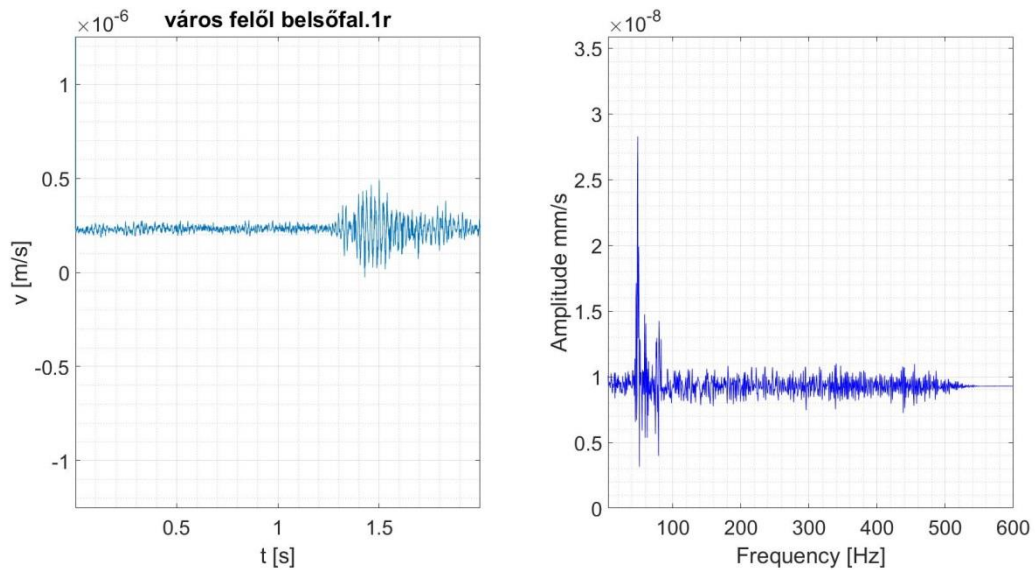


51. ábra: A belső fal rezgései Diósgyőr felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)

Két esetben is előfordult, hogy a belső falon történő méréseket valami távolról érkező egyéb zaj (dobbantás vagy ajtó becsapás az épület távolabbi lakásaiban, esetleg a közeli Dayka-ház építéséről érkező rezgés) zavarta meg. Ez hallható is volt és sokkal nagyobb amplitúdójú, mint a villamos okozta rezgés. Megjegyezzük, hogy mi a lakásban a mérés kb. 10 másodperce alatt semmiféle mozgást nem végeztünk, még a lélegzetünket is visszatartottuk. A zavar mindenképpen kívülről jött. Az 52. ábra egy ilyen megzavart mérést mutat. A fal rezgése a zaj miatt 4-5 másodpercig tartott, az amplitúdója közel százszorosán meghaladta a villamos keltette rezgéseket, a rezgések spektruma folytonos volt. A mérést úgy indítottuk, hogy a villamos kb. az 1,5 s-os időkoordinátánál érkezzen. Ez így is történt, ahogy ezt az 53. ábra szerinti nagyításon láthatjuk.



52. ábra: Egy távoli „dobbantás” hatása a belső falon a város felől érkező villamos esetén



53. ábra: Az előző időspektrum egy része, amely még a villamos hatása. Jobb oldalon a kinagyított időspektrum FFT spektruma

A kb. 2 s-os időkoordinátánál érkező zajig történő néhány rezgés FFT spektruma is jól kivehető. Ez az ábra hasonlít az 50. ábra és az 51. ábra FFT spektrumaira. Abban különösen, hogy a maximum itt is 48-50 Hz-nél van.

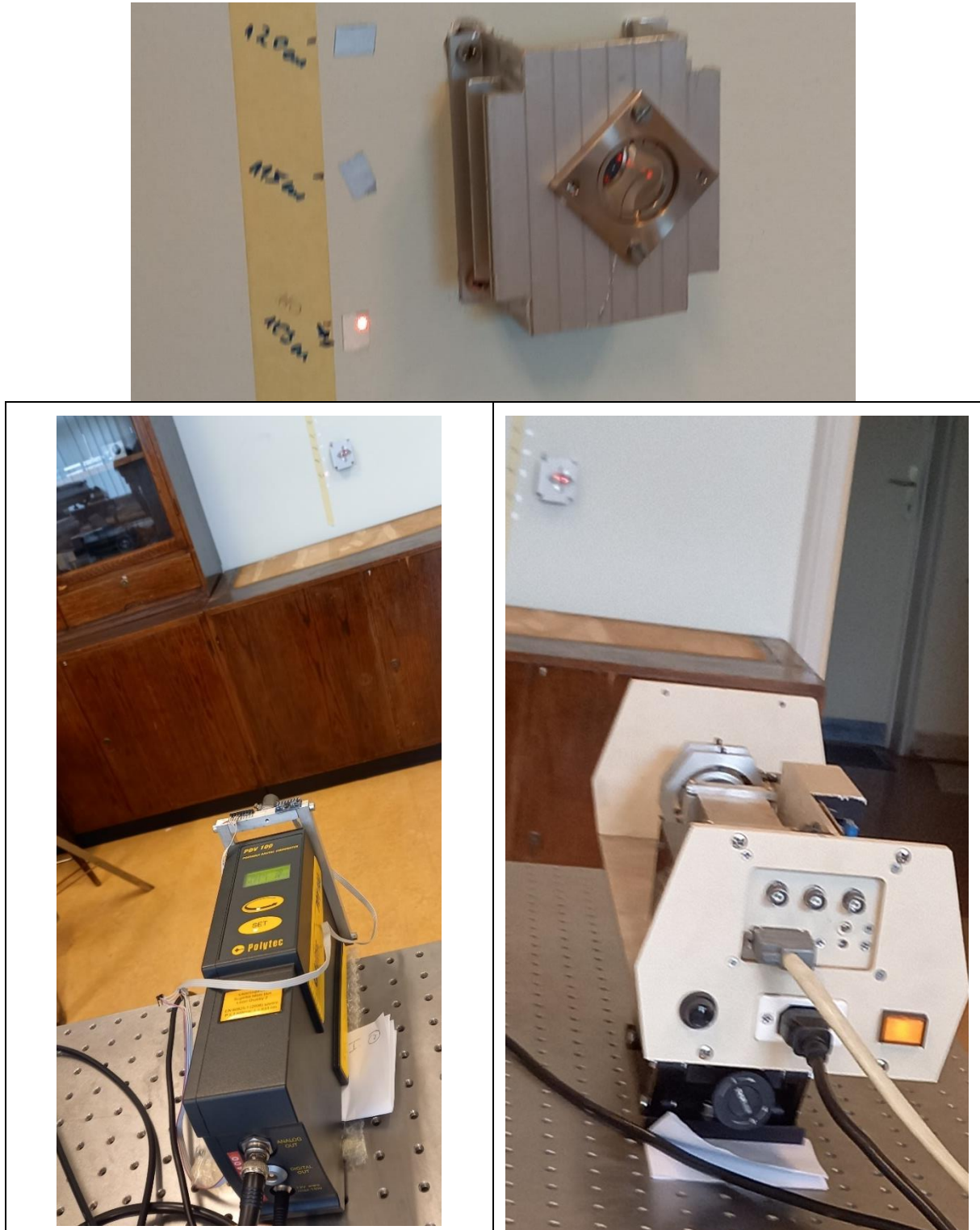
Ennek a távolról érkező „dobbantásnak” a forrását a helyszínen nem sikerül megtalálnunk, de a délelőtti folyamán többször megismétlődött a villamosok járásától függetlenül.

### 3.6.3 KÖVETKEZTETÉSEK

Az LDV módszert alkalmasnak találtuk kis amplitúdójú (a megengedett maximális amplitúdó ezredrészénél is kisebb) épület rezgések mérésére. A villamos elhaladása által kiváltott rezgéseket mértük az utcai főfal és az ablaküveg belső oldalán, valamint egy belső falon. A falak rezgéseiben a 40-50 Hz-es rezgések dominálnak, az ablaküveg kb. két nagyságrenddel nagyobb rezgéseiben pedig a 75 Hz. Detektáltunk ismeretlen eredetű, távolról érkező falrezgéseket is, amelyek amplitúdója legalább két nagyságrenddel nagyobb volt, mint a villamos által kiváltott rezgése.

## 3.7 ÉPÜLETEK REZGÉSEINEK MÉRÉSE LABORATÓRIUMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT

## 3.7.1 MÉRÉSI MÓDSZER



54. ábra: A rezgésmentes asztalon lévő LDV eszköz (balra lent), a LIMA eszköz (jobbra lent), valamint a falra erősített mérőoldali sarokprizma (LIMA) és visszaverő fólia (LDV) működés közben (fent)

A mi lézinterferometrikus módszereink az alaplátvány és a fényt visszaverő felület relatív mozgását mérik. Ha az egész épület egyben rezeg (leng), akkor az épületen belül elhelyezett rezgés mérő műszerek (részben vagy egészben) átvehetik az épület rezgéseit, eltüntetve ezzel a relatív mozgásokat. Ezt legegyszerűbben úgy kerülhetjük el, ha a műszereket rezgésmentes asztalra helyezük el. Álló (nem rezgő) műszerekkel a fal rezgése pedig optikai módszerrel is jól követhető.

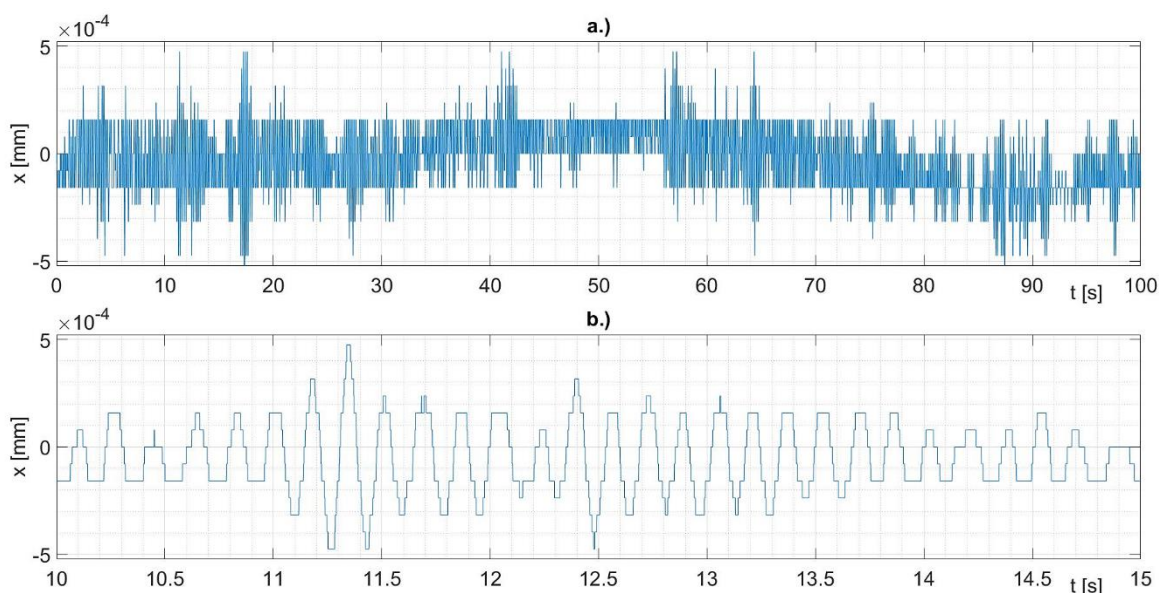
Az új rezgésmentes asztalunkat, a LIMA-val és LDV-vel történő mérések elvét az előző fejezetekben már részletesen ismertettük. A mérések helyszíne értelemszerűen a Fizikai Tanszéknek az a laboratóriuma, amelyben a rezgésmentes asztal (rajta a LIMA készülékkel) elhelyezésre került. Ez az A/2 épület III. emeletének 10. szobája. Jelen mérések során mindkét műszer a rezgésmentes asztalon volt elhelyezve, kivéve a LIMA mérőoldali sarokprizmáját, amelyet a falra csavaroztunk fel. Ez a fal – amelyen tehát az első méréseket végeztük – a laboratóriumnak a folyosó oldali tartófala.

Közvetlenül a sarokprizma mellől a falról verődik vissza az LDV lézernyalábja is (54. ábra). A két eszközzel külön-külön és szimultán is tudjuk mérni ennek a falnak a rezgéseit. Hangsúlyozandó, hogy a lézinterferometrikus módszerek csak a lézersugár irányú rezgéseket mérik. Jelen mérések során tehát a falnak a saját síkjába eső (tehát hosszirányú) rezgései rejtve maradnak.

### 3.7.2 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

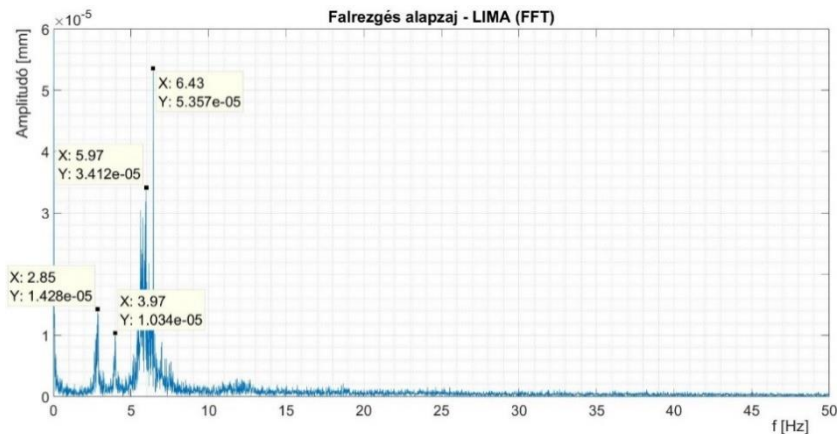
#### 3.7.2.1 LIMA MÉRÉSEK

Az első méréseket egy (időjárási és forgalmi szempontból is) csendes napon délelőtt végeztük el. A LIMA-val végzett 100 s-os mérés időspektruma az 55. ábra felső felében látható, alatta pedig ennek egy 5s-os kinagyított részletét láthatjuk.



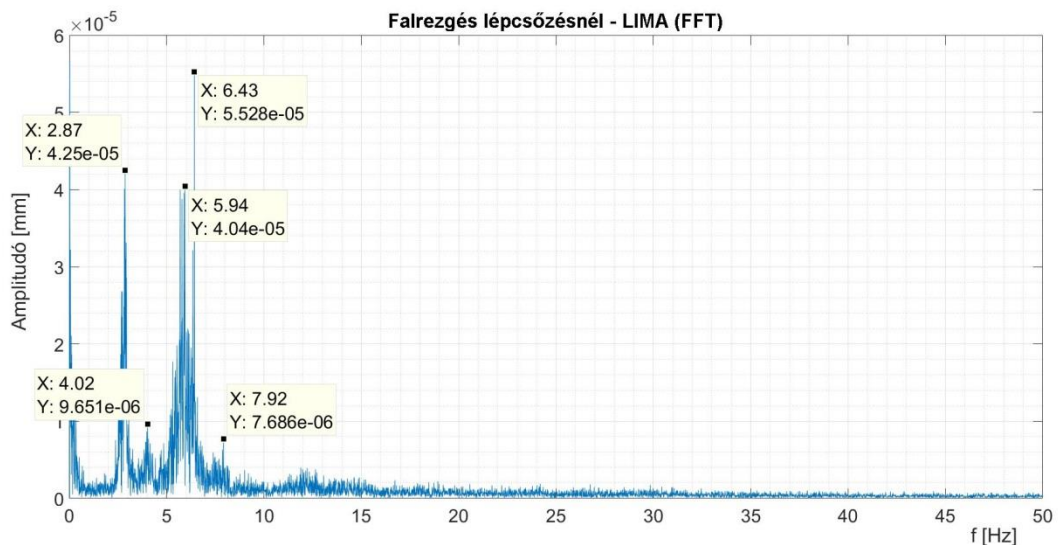
55. ábra: A falrezgés LIMA-val mért időspektruma (elmozdulás-idő függvénye) és annak egy kinagyított szakasza (lent) csendes laboratóriumban

A hosszabb időspektrum egy viszonylag szabálytalan rezgés képét mutatja, amelynek még a középpontja is tolódik kissé. A rövidebb spektrum viszont jól mutatja, a szabályosságot is, vagyis azt, hogy az időspektrumot egy kb. 6Hz-es rezgés dominálja. Az ábrák lépcsős szerkeze annak köszönhető, hogy a műszer az elmozdulást  $\lambda/8$  egységekben méri (ami 79,1nm-nek felel meg) – lásd [60][82]. Jól látható, hogy a rezgés amplitúdója néhány egység csupán, alatta marad a fény hullámhosszának, azaz a nem interferencián alapuló optikai módszerekkel egyáltalán nem lennének mérhetőek.



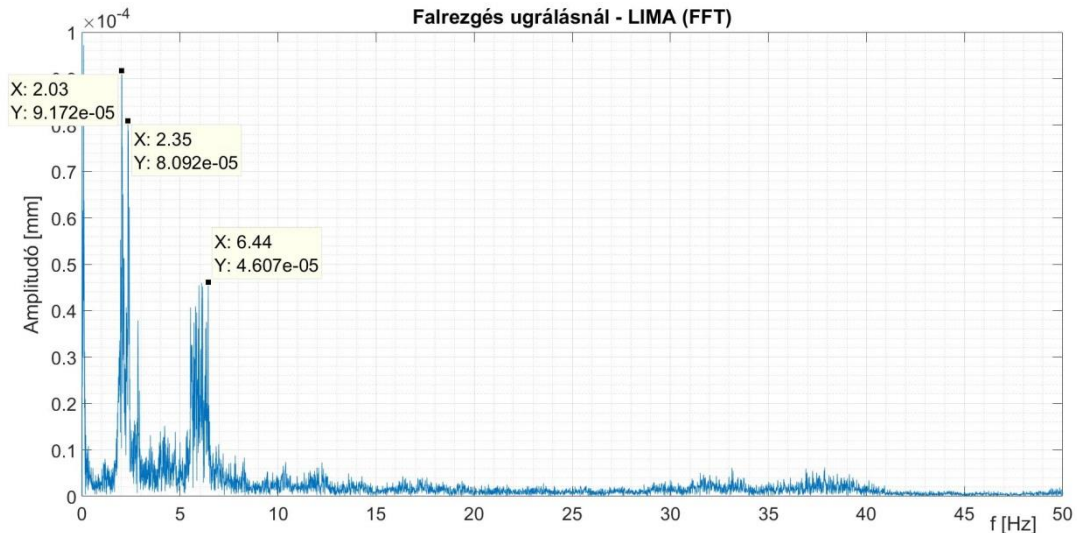
56. ábra: A falrezgés LIMA eszközzel mért FFT spektruma (az előző ábrán - 55. ábra - bemutatott időspektrumhoz tartozó FFT spektrum) csendes laboratóriumban

A falrezgés FFT spektruma (56. ábra) is jól mutatja a 6Hz körüli rezgések dominanciáját. Ez nem egy éles rezonancia, a félérték szélessége 1Hz körül van. Kisebb rezonanciák 3 és 4Hz környékén is vannak, de nagy komponens van 0,1Hz alatt is. Az utóbbi komponens az igen lassan változó rezgési középpont következménye, amit minden bizonnyal a hőtágulás okoz. A felhasznált FFT program a spektrális komponensek amplitúdóit  $6 \cdot 10^{-5}$ mm (=0,06 $\mu$ m) alá teszi. Megjegyezzük, hogy ezek az értékek a vonatkozó szabványban [81] szereplő értékek ezredrészét sem érik el. Tehát igen messze vannak attól, hogy ezeket az ember érzékelje, vagy az épület állagát veszélyeztessék.



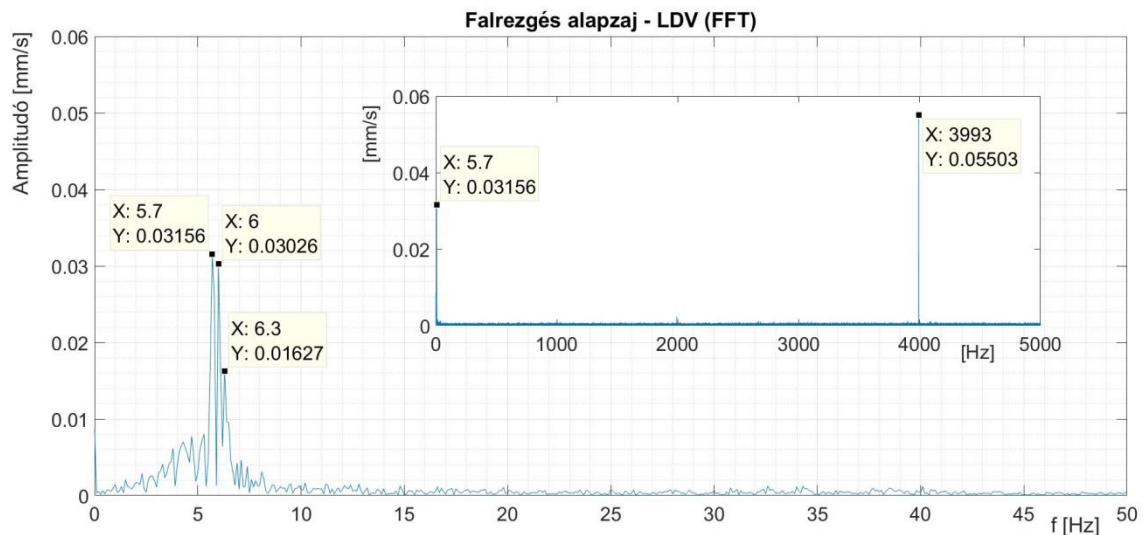
57. ábra: A falrezgés LIMA eszközzel mért FFT spektruma, ha a kb. 10 méterre lévő lépcsőn ugrálnak

A laboratóriumban és környezetében végzett tevékenységek (beszélgetés, séta a folyosón, szomszédos helyiségben lévő eszterga bekapcsolása) alig befolyásolták a rezgési képeket. A folyosón és a lépcsőkön történő ugrálás, futkosás hatása azonban már látható volt (57. ábra és 58. ábra).



58. ábra: A falrezgés LIMA eszközzel mért FFT spektruma ha a laboratórium előtti folyosón ugrálnak

Ez az ugrálás, futkosás azonban a domináns 6Hz körüli rezgésekre nem volt hatással, hanem a kisebb 2-3Hz közötti rezgések amplitúdóját növelte meg, akár a domináns rezgés amplitúdója fölé is. A folyosón történő ugrálás gerjesztett egy gyenge 30-40Hz-es rezgést is.



59. ábra: A falrezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma (belül a teljes spektrum, kívül a 0-50Hz tartomány kinagyítva) csendes laboratóriumban

### 3.7.2.2 LDV MÉRÉSEK

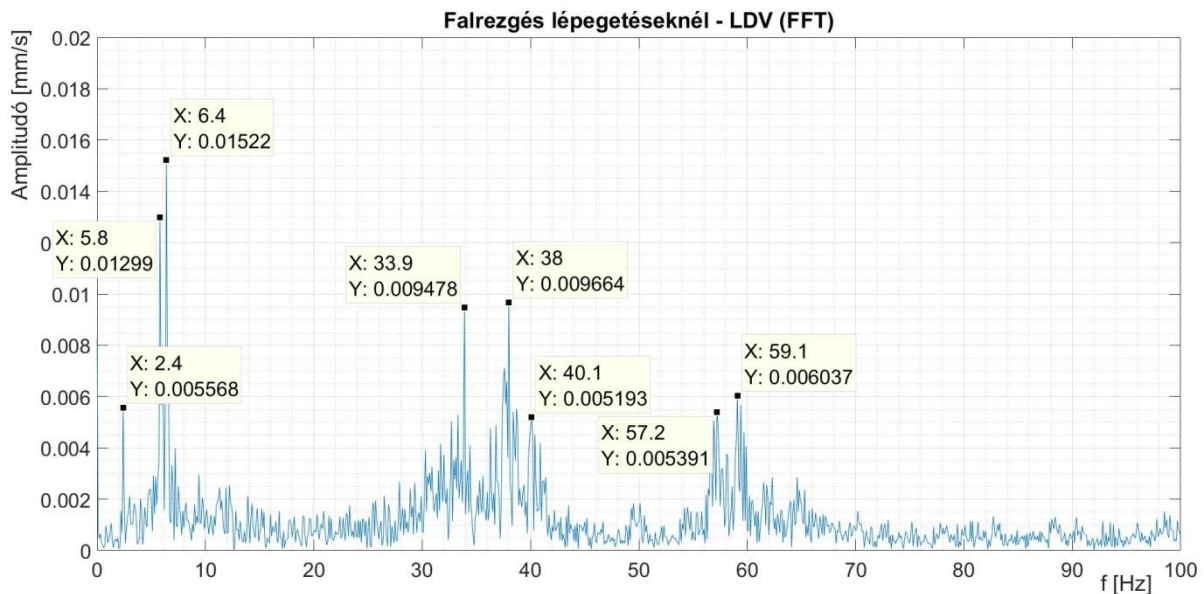
Ahogy a bevezetésben is utaltunk rá, ezzel a módszerrel elsődlegesen sebességet mérünk. Közismert, hogy azonos amplitúdójú rezgések esetén a nagyobb frekvenciájú rezgéshez nagyobb sebességek ( $v_{max}=A \cdot \omega$ ) tartoznak. Tehát az LDV módszer (a LIMA-hoz képest) a 0Hz körüli

rezgéseket nem tudja jól mérni, a nagyobb frekvenciájú jeleket viszont kiemeli. Másrészt az LDV eszköz belsejéből jön egy kb. 4kHz-es rezgés is, minden bizonnyal a Bragg-cella működése miatt. Az látható minden LDV spektrumban, de olyan messze esik a vizsgált 0-100Hz tartománytól, hogy a mérést érdemben nem zavarja. Megjegyezzük, hogy a 4kHz-en mért 0,055mm/s sebességhez csupán 1-2nm-es amplitúdó tartozik, tehát ezt a rezgést a LIMA már elvben sem tudja mérni.

A csendes laboratóriumban mért LDV spektrumban (60. ábra) is jól láthatóak az épület kb. 6Hz-es lengései (a már említett 4kHz-es műszer rezgés mellett), de a kisebb, 3-4Hz-es rezgéseket ez a módszer már nem tudja kiemelni.

A folyosón történő ugrálás, futkosás hatására az LDV spektrumban is megjelenik egy éles 2Hz-es és egy 30-40Hz-es rezgés is. Ez utóbbi értelemszerűen jobban látszik itt, mint a LIMA spektrumban (58. ábra). Sőt ebben a spektrumban egy 56-60Hz-es rezgés is láthatóvá válik.

Az LDV módszerrel lehetőség van a laboratórium többi falának a tanulmányozására is. A külső tartófal (amelyen az ablakok is vannak) ugyanúgy leng, mint a belső (folyosó oldali) tartófal, amit a 59. ábra mutat.

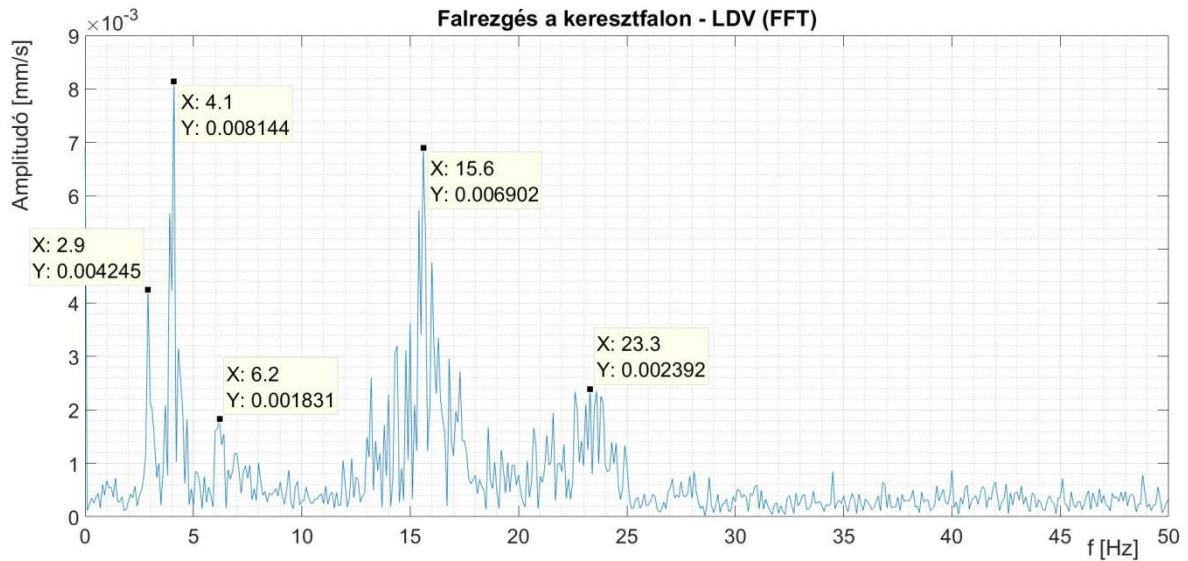


60. ábra: A falrezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma ha a laboratórium előtti folyosón ugrálnak

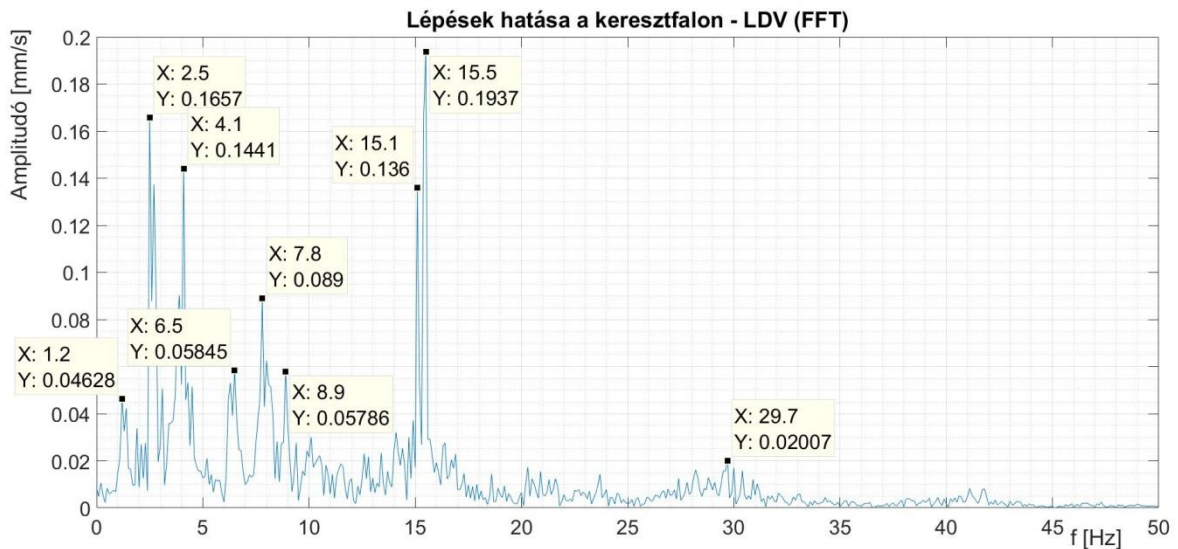
A két tartófalat összekötő keresztfalak rezgéseiben azonban teljesen más spektrummal bírnak (61. ábra). Ez persze nem meglepő, hiszen ezek a rezgések az épület hossz tengelye irányába mutatnak, tehát merőlegesek a főfalakon mért rezgésekre. A spektrumban itt nyoma sincs a 6Hz körüli csúcsnak, viszont egyértelmű csúcsok vannak 3-4Hz, 15-16Hz és 23Hz környékén.

A folyosón történő fizikai aktivitás (ugrálás, futkosás) azonban sokkal nagyobb hatással volt a keresztfal rezgéseire, mint az öt határoló tartófaléra. Az amplitúdó növekedés néhány frekvencián (3-4Hz és 15-16Hz) több mint egy nagyságrend (62. ábra). Másképpen fogalmazva a keresztfal csendes környezetben mért rezgéseit eltörpülnek a fizikai aktivitás esetén mérhető rezgések mellett.



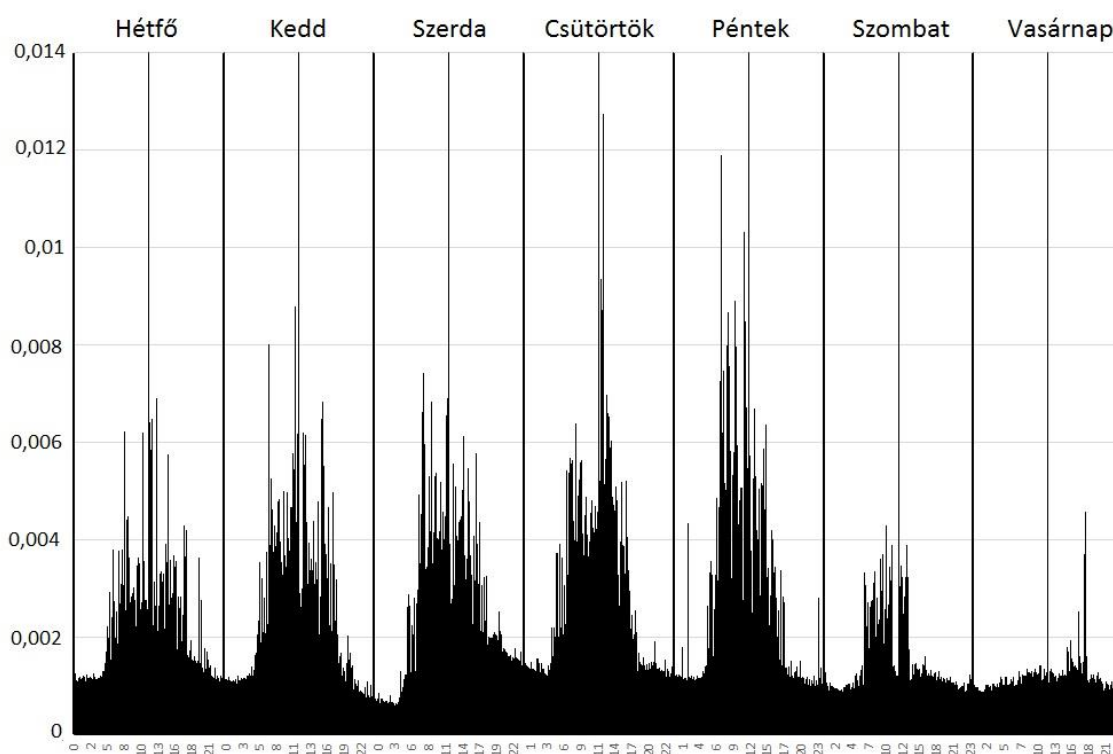


61. ábra: A keresztfal rezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma csendes laboratóriumban



62. ábra: A keresztfal rezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma, ha a folyosón fizikai aktivitás (ugrálás, futkosás) van

Több héten át folyamatosan mértük a tartófal rezgéseit. Tíz másodperces időspektrumokat vettünk fel, ezeket Fourier-analízissel kiértékeljük. A kapott FFT spektrumokban meghatároztuk a maximális amplitúdót és az ahhoz tartozó frekvenciát. A 63. ábra az egy héten át (2021. július 12. (hétfő) 0 órától 18. (vasárnap) 24 óráig) kapott maximális amplitúdókat ábrázolja. A könnyebb kezelhetőség és a kiértékelési hibák csökkentése érdekében az amplitúdókat 12 adatonként (2 percenként) átlagoltuk. Érdekes megjegyezni, hogy a héten végig napsütéses, frontmentes idő volt, de hétfőre megérkeztek a felhők és vasárnap délután az eső is.

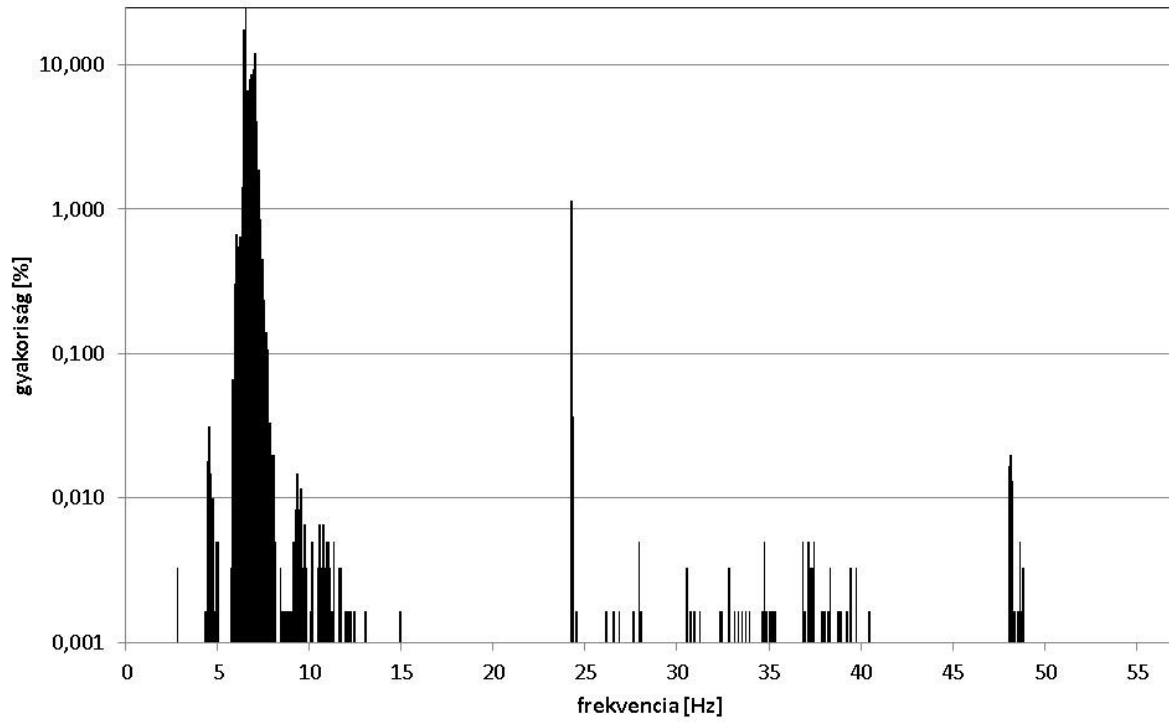


63. ábra: A tartófal rezgés LDV spektrumainak maximális amplitúdói mm/s egységben. Kétperces átlagok 2021. július 12. (hétfő) 0 órától 18. (vasárnap) 24 óráig (a vastag függőleges segédvonalak az éjjelt, a vékonyak a délet mutatják)

A rezgési (sebesség) amplitúdóknak jellegzetes napi menete volt. Éjszaka általában kicsik voltak az értékek (kb. 0,001mm/s), a minimumokat hajnalban érte el. Nappal sokkal nagyobbak voltak az amplitúdók, a hétköznap mindig elérték a 0,006mm/s-os maximumot. A hétvégi nappalokon (különösen vasárnap) azonban kevésbé rezgett az épület. Ebből az egyheti adatsorból nem dönthető el, hogy ezt a jellegzetes napi menetet, ill. a hétköznap-hétvége különbséget mi okozta. Ez az ok lehet például az épületben lévők fizikai aktivitása, ami munkaidőben nyilván nagyobb. De okozhatják meteorológiai tényezők is. Például a szélereősség, ami napsütéses, frontmentes időben nagyon hasonló tendenciával rendelkezik (éjszaka minimális, a déli órákban maximális). Szerepe lehet a széliránynak is, az épületre merőleges légáramlás nagyobb keresztirányú rezgéseket okozhat. A napsütés nemcsak szeleket generálhat, hanem speciális épületen belüli, ill. épület körüli áramlásokat, amelyek szintén rezgéseket kelthetnek. E kérdés tisztázása érdekében jelenleg is folynak a mérések.

A 64. ábra a tartófal rezgés LDV spektrumainak maximális amplitúdóihoz tartozó frekvenciáit mutatja be. A gyakoriságot a 0,1Hz osztással felvett hisztogramra vonatkoztattuk. A kis gyakoriságú frekvenciák ábrázolhatósága érdekében logaritmikus skálát alkalmaztunk. A logaritmikus skála ugyanakkor elrejteti azt a tényt, hogy az összes adat kb. 98%-a az 5,9-7,6Hz frekvencia tartományba esik. A görbe csúcsa kettős (6,5 és 7,0Hz), közöttük kis behorpadás van. Igen éles, bő 1%-os gyakorisági csúcsot kaptunk 24,2Hz-en. Ez a frekvencia egyetlen kb. kétórás időintervallumban (2021. július 15. (csütörtök) 12.49–14.54) dominált, minden bizonnyal egy, valahol az épületben (de az adott fal közelében) bekapcsolt gép okozhatta. A lapos 35-40Hz-es csúcsokat tanszéki fizikai aktivitás okozhatta (lásd 60. ábra, 58. ábra), de zivatarok idején is

dominált (talán a menydörgés is okozhatta). A 48-49Hz-en látható kicsi csúcs néhány rövid periódusban jött, minden bizonnyal egy bekapcsolt gép okozta.



64. ábra: A tartófal rezgés LDV spektrumainak maximális amplitúdóihoz tartozó frekvenciák eloszlása logaritmikus gyakorisági skálán. A gyakoriságot a 0,1Hz osztással felvett hisztogramra vonatkoztattuk

### 3.7.3 KÖVETKEZTETÉSEK

Az A/2 épület falainak rezgései folyamatosan a lézinterferometrikus eszközeink mérési küszöbjei fölött vannak. Az amplitúdók tipikusan a  $0,1 - 1 \mu\text{m}$  tartományba, a sebesség amplitúdók az  $1-10 \mu\text{m/s}$  tartományba esnek. A tartófalak rezgései spektrumaiban 6-7Hz körüli frekvenciájú keresztirányú rezgések dominálnak. Azt találtuk, hogy ez az egész A/2 épület keresztirányú rezgése, amit lokális fizikai tevékenységgel (ugrálás, futkosás) nem lehet befolyásolni. A lokális tevékenységek egyes épületelemek rezgését okozzák, amelyek frekvenciája ettől nagyon eltérő (2Hz, 30-40Hz, 56-60Hz).

A 6-7Hz körüli frekvenciájú rezgés folyamatosan jelen van, a méréseink több mint 97%-ában ez a legnagyobb amplitúdójú komponens. Az épület rezgéseknek tipikus napi ill. heti menete van. Az épület rezgések éjjel a legkisebbek, de egész éjszaka mérhető marad (stabilan kb.  $0,001\text{mm/s}$ ). Ezek a rezgések hétköznapi nappal a legnagyobbak, de erősen ingadozóak  $0,003-0,006\text{mm/s}$  átlagértékkel. A nappali rezgések hétvégén kisebbek, mint hétköznapi. A rezgést (távoli) emberi aktivitás és/vagy meteorológiai tényezők okozhatják. A kiváltó okok feltárása érdekében jelenleg is folynak a mérések. Jelenleg úgy gondoljuk, hogy az épület rezgésekre az egyetem körüli utak forgalma van a legnagyobb hatással.

#### 4 TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

**T1.** A fejlesztő team tagjaként részt vettem a Fizikai Tanszéken 1980-as években a Központi Fizikai Kutató Intézettel közösen kifejlesztett Michelson típusú lézerinterferometrikus elmozdulásmérők felújításában, amellyel lézerinterferometrikus mozgásanalizátorokat (LIMA) hoztunk létre az elmozdulásmérőkből.

- a) A projekt elején a koncepció kialakításában, a megvalósulás során a LIMA-ban lévő He-Ne lézereink egymódusú működésének visszaállításában, hőmérsékleti munkapontjának beállításában, s végül a rendszer Fabry-Pérot interferométerrel történő ellenőrző méréseiben vettem részt. A korszerűsített eszközök immár nemcsak laboratóriumi körülmények közti mérésekre alkalmasak, hanem a mechanikai megmunkálások során fellépő, lézersugár irányába eső mozgások analizálására, valamint terepen alkalmazott eszközök hitelesítésére is.
- b) A kereskedelmi LDV és a korszerűsített saját készítésű LIMA eszköz összemérésével laboratóriumi körülmények között teszteltük a LIMA eszköz megbízhatóságát és az LDV eszköz gyári kalibrációjának a pontosságát. Az összemérés eredménye, hogy a saját gyártmányú rezgésmentes asztalon összeállított LIMA a saját mérőági sarokprizmájának rezgéseit az LDV egy 2 %-os hibahatáron belül képes mérni az optimális tartományban. Az eltérés oka a két mérési módszer különbözősége.
- c) Megállapítottam, hogy az LDV alkalmasabb a pillanatnyi sebességek meghatározására, mint az elsődlegesen elmozdulást mérő LIMA. Különösen igaz ez azokra a rezgésekre, ahol a sebesség 0,1 mm/s alatt marad.

**T2.** Megállapítottam, hogy a tokmányba fogott és megpendített fúrószárak keresztirányú szabad rezgéseit általában két, egymáshoz közeli (néhány %-on belüli) frekvenciájú komponens szuperpozíciójából származó lebegés dominálja, amelyek a fúrószárak horonyvég irányú és az arra merőleges keresztirányú rezgéséhez tartoznak. Ez főleg a fúrószár lézersugárra merőleges koppintás utáni rezgése esetén igaz, ekkor a rezgések harmonikusak. Lézersugár irányú koppintás esetén az első rezgések erősen anharmonikusak.

- a) A fúrószárakat egyik végén befogott kör keresztmetszetű hengeres rudaknak tekintve modelleztük a rezgéseket. A hangvilla modell a 9mm átmérőjű fúrószár szabad rezgéseinek frekvenciáit pár százalékon belüli pontossággal megadja, a vastagabb (10 és 12mm-es) fúrószárak esetében viszont 15-20%-kal felülbecsli.
- b) Mérési eredményekkel támasztottam alá, hogy a fúróvég megtámasztása a rezgési frekvenciát kb. 2,7-szeresére növeli, szemben a hengeres rudakra elméletileg levezetett 4,37-szeres értékkel, ugyanakkor a fúrószár tokmányból kintebb húzása csökkenti a rezgési frekvenciákat kb. olyan arányban, ahogy a fúró tokmányon kívüli hossza növekedett.

- c) Igazoltam, hogy a koppintás típusa is jelentős hatással van a rezgési spektrumra. A tompa eszközzel végzett gerjesztés az alulfrekvenciákat, a karakterisztikusabb gerjesztés pedig számos további magasabb frekvenciájú rezgést is eredményezett.

**T3.** Használatban lévő esztergán végzett fúrás során fúrószár rezgéseit mértem LDV módszerrel. Az alábbi következtetésekre jutottam:

- különböző fúrási szakaszokat a rezgési sebességamplitúdó változása alapján különítettem el, ezek a szakaszok jól egyeznek a fúrás paramétereire alapján számított szakaszokkal is.
- A fúrás kezdetén és a végén (a kihúzási szakaszban) éles frekvencia csúcsok látszanak: a 9 mm-es fúró esetében kb. 570 Hz, a 12 mm-es fúró esetében pedig kb 450 Hz. Ezek a szabad hegyű fúró szabad rezgéseiként azonosíthatóak.
- A fúrás érdemi szakaszában a megtámasztott hegyű fúró elmosódott rezgései dominálnak (12mm. kb 1,3kHz), vagy legalábbis láthatóak (9mm: kb. 1,7kHz).

Ugyanakkor a két mérési sorozat eredményei jelentősen eltéréseket is mutatnak. Úgy gondoljuk, hogy az eltérés oka valószínűleg a burkolatajtó zártsága/nyitottsága.

**T4.** Esztergán végzett fúrás során fúrószár torziós rezgéseit mértem Lézeres Torziós Rezgésmérővel (LTV). Ilyen jellegű méréseknek a szakirodalmi kutatásaim során nem találtam nyomát. Az LTV eszköz paramétereire, felhasználási feltételeire és egyéb okok miatt a fúrószár lineáris rezgése is megváltozott. Ezért az eszköz LDV-vel történő összehasonlításához újabb LDV mérések kerültek elvégzésre.

Megállapítottam, hogy az LTV készülékkel végzett mérés eredményeiből kiemelhető a 4400Hz, ill. 5600Hz környékén jelentkező torziós rezgés. Továbbá a spektrumban jelen van egy kisebb frekvenciájú torziós rezgéscsoport is. Ezek jól egybeesnek a fúró fordulatszámának (13.3 1/s) felharmonikusával, amelyek ún. pseudo-rezgések lehetnek.

**T5.** Épület rezgések LDV módszerrel történő mérése során a következőket állapítottam meg:

- Villamos elhaladása által kiváltott rezgéseket mértünk egy belvárosi épület utcai főfalán, ablaküvegének belső oldalán, valamint az épület belső falán. A mérési eredmények alapján elmondható, hogy a falak rezgéseiben a 40-50 Hz-es rezgések domináltak, az ablaküveg kb. két nagyságrenddel nagyobb rezgéseiben pedig a 75 Hz.
- A második mérési sorozatban az egyetem A/2 épülete falainak rezgéseit lettek megmérve. Az épület tartófalainak rezgése folyamatosan a lézerinterferometriai eszközeink mérési küszöbjei fölött voltak. A kapott rezgési amplitúdók tipikusan a 0,1 – 1  $\mu\text{m}$  tartományba, a sebesség amplitúdók pedig az 1-10  $\mu\text{m/s}$  tartományba esnek.
- A tartófalak rezgéseinek spektrumaiban 6-7Hz körüli frekvenciájú keresztirányú rezgések dominálnak. (több mint 97% ában ez a legnagyobb amplitúdójú komponens).
- A vizsgált épület keresztirányú rezgését lokális fizikai tevékenységgel (ugrálás, futkosás) nem lehet befolyásolni.
- A lokális tevékenységek egyes épületelemek rezgését okozzák, amelyek frekvenciája ettől nagyon eltérő (2Hz, 30-40Hz, 56-60Hz).
- Az épület rezgéseknek tipikus napi ill. heti menetét figyeltem meg. Az épület rezgések éjjel a legkisebbek, de egész éjszaka mérhető marad (stabilan kb. 0,001mm/s). Ezek a rezgések hétköznap nappal a legnagyobbak, de erősen ingadozóak 0,003 0,006mm/s átlagértékkel.

## ÖSSZEFOGLALÁS

PhD dolgozatom precíziós mozgásanalizálási módszerek alkalmazásával foglalkozik. Azt kutatja, hogy miként lehet felhasználni ezeket az eljárásokat bizonyos mérnöki területeken. Célja hogy a jelenlegi lézeres interferometrikus mérési eljárásokat a mérnöki munka gyakorlatába átültesse, vagy legalább felhasználhatóságát néhány oldalról megvizsgálja.

A disszertáció tartalmilag szakirodalmi kutatással kezdődik, amely során először a precíziós lézeres mozgásanalizáló eljárásokat, és egyéb optikai módszereket mutatja be. Fontos, hogy a különböző elven működő eszközöket hogyan használták fel eddig az iparban. Ezért külön fejezet foglalkozik a gépgyártásban alkalmazott lézeres mérőeszközökkel és módszerekkel. Igyekeztem a legteljesebben feltérképezni azokat a jelentősebb – elsősorban az utóbbi évtizedre vonatkozó, és rendelkezésre álló – publikációkat, melyek olyan kutatásokkal kapcsolatosak, melyek a lézeres mérés technika mérnöki területeken történő felhasználásával foglalkoznak.

A harmadik fejezet összefoglaltja azokat a mérési eredményeket és a hozzájuk kapcsolódó következtetéseket, amelyeket a kutatómunkám során végeztem.

Első helyen a Miskolci Egyetem Fizikai Tanszékének Michelson típusú interferométeren elvégzett fejlesztések szerepelnek, melyek során a korábbi mérőeszközt – többed magammal – korszerűsítettem, jelfeldolgozási koncepciójának kidolgozásában dolgoztam. Az ellenőrző mérések során megvizsgáltam, hogy a mozgásanalizátor mennyire felel meg az új körülményeknek.

A LIMA-t, mint elmozdulásmérőt felhasználva hitelesítettem a Mach-Zehnder interferometrikus elven mérő, immáron ipari kivitelű sebességmérő LDV mérőeszközt. Mérésekkel igazoltam a mérőági sarokprizmától származó hibák okát.

A dolgozat a lézeres rezgésmérés mérnöki alkalmazásaként először a forgácsolás közbeni jelenségek vizsgálatát tárgyalja. Bár ilyen mérések nem ismeretlenek a mérnöki gyakorlatban, a fűrási folyamatot tekintve, jelentős hiány érződik ki a szakirodalomból.

Ahhoz, hogy a megmunkálás közben kapott méréseket helyesen értelmezhesük, megvizsgáltam a „rezgő rendszert”, azaz a munkagép-szerszám-munkadarab együttest. Három, különböző átmérőjű fűrószár impulzus-szerű gerjesztésével elemeztem a dinamikai környezetet. Megállapítottam, hogy a tokmányba fogott fűrószárak keresztirányú szabad rezgéseiben két, egymáshoz közeli frekvenciájú komponenstől származó lebegés a domináns. A disszertáció kitér a fűrószár befogási körülményeinek a hatásaira is. A kapott eredményeket összevettem két elméleti modellel: a hangvilla-moddal és a rúdmodellel. A modellezés során kapott eltéréseket elemeztem, az eltérések okaira magyarázatot kerestem.

A dolgozat harmadik fejezet 4. és 5. alfejezetében a fűrási folyamat elemzése található. Kétféle eszközt használtam: LDV-t és LTV-t. A két eljárással kapott eredményeket külön-külön és egymással összevetve megállapítottam, hogy a két módszerrel kapott frekvenciaspektrumok egymást kiegészítve használhatóak. Az LDV frekvenciatartománya alapján időben jól el lehet különíteni az egyes anyag leválasztási lépéseket. Az LTV azonban más frekvenciasávokban hoz

új ismereteket. Utóbbi eszköznek azonban továbbra is hátránya marad a forgási periodicitásból származó pszeudo-rezgések jelenléte.

A 3.6 és 3.7 fejezetek a korábban alkalmazott lézeres eszközök épületek rezgéseire történő alkalmazását tartalmazzák. Kísérleti munkámban valós és laboratóriumi körülmények között egyaránt megvizsgáltam az épületszerkezet rezgéseit. A fejezet kitér a rezgések lehetséges okaira, és megvizsgálva a fallengések időszaki ciklikusságát, a különböző időtartamokra vonatkozó rezgésspektrumokra von le következtetéseket.

A laborkörülmények között LDV-vel és LIMA-val rezgésmentes asztról történő precíziós elmozdulás mérések a falrezgésvizsgálatok új mérési aspektusát jelentik az épületrezgések vizsgálatában.

További kutatási-fejlesztési terveim között szerepel a LIMA jeléből képzett sebesség pontosabb kiszámítása, az LTV jeleiben megjelenő pszeudo-rezgések kiküszöbölése, a forgácsolási folyamat további vizsgálata, valamint az épületrezgéseknél fellépő sajátrezgések mérési jelből történő kiküszöbölése.

## SUMMARY

This PhD dissertation deals with the application of precision motion analysis methods. During the PhD research work, it is investigated how these processes can be used in specific areas of engineering. Its goal is to transfer the current laser interferometric measurement procedures to the practice of engineering work, or at least to examine their usability from a few aspects.

The content of the dissertation begins with a literature review, during which the precision laser motion analysis procedures and other optical methods are first presented. It is crucial how devices operating on different principles have been used in the industry so far. Therefore, a separate chapter deals with laser measuring devices and methods used in machine manufacturing processes. I tried to map as fully as possible the most important publications - mainly from the last decade, which were available - related to research using laser measurement technology in engineering fields.

The third chapter summarises the measurement results and the related conclusions I made during my research.

In the first place are the developments carried out on the Michelson-type interferometer of the Physics Department of the University of Miskolc, during which I modernised the previous measuring device - mostly myself - and worked on developing its signal processing concept. I checked how well the motion analyser met the new conditions during the control measurements.

Using the LIMA as a displacement meter, I certified the LDV measuring device, which measures according to the Mach-Zender interferometric principle, and is now an industrial speed measuring device. I verified the cause of the errors from the corner prism of the measuring branch with measurements.

As an engineering application of laser vibration measurement, the thesis first discusses the investigation of phenomena during cutting. Although such measurements are not unknown in engineering practice, there is a significant lack in the literature regarding the drilling process.

To correctly interpret the measurements obtained during machining, I examined the "vibrating system", i.e. the machine-tool-workpiece combination. I analysed the dynamic environment by pulse-like excitation of three drill bits with different diameters. I found that in the transverse free vibrations of the drill bits held in the chuck, the dominant is the flutter from two components with frequencies close to each other. The dissertation also covers the effects of the drill bit clamping conditions. I compared the obtained results with two theoretical models: the tuning fork model and the rod model. I analysed the deviations obtained during the modelling and looked for an explanation for the causes of the deviations.

The analysis of the drilling process can be found in subsections 4 and 5 of the third chapter of the dissertation. I used two tools: LDV and LTV. By comparing the results obtained by the two methods separately and with each other, I found that the frequency spectra obtained by the two methods can be used in addition to each other. Based on the frequency range of the LDV, the individual material separation steps can be well separated in time. However, LTV brings new



knowledge to other frequency bands. However, the latter device still has the disadvantage of pseudo-oscillations resulting from rotation periodicity.

Chapters 3.6 and 3.7 contain the application of previously used laser devices to measure the vibrations of buildings. In my experimental work, I examined the vibrations of the building structure both under natural and laboratory conditions. The chapter discusses the possible causes of the vibrations. After examining the regular cyclicity of the wall vibrations, it draws conclusions on the vibration spectrum for different periods of time.

Under laboratory conditions, precision displacement measurements with LDV and LIMA from a vibration-free table represent a new measurement aspect of wall vibration tests in the investigation of building vibrations.

My further research and development plans include a more accurate calculation of the speed formed from the LIMA signal, eliminating pseudo-vibrations appearing in the LTV signals, further investigation of the cutting process, and eliminating self-vibrations that occur in building vibrations from the measurement signal.

## KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Hálámat és őszinte köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek Prof. Dr. Paripás Béla egyetemi tanárnak, aki nemcsak folyamatosan segített és biztatott tudományos munkám során, hanem egyúttal példamutató módon vezetett végig azon a folyamaton, amelynek révén e kutatás kibontakozott és a disszertáció elkészült. Nélküle nem született volna meg ez a disszertáció.

Szeretnék köszönetet mondani egyúttal a Fizika Tanszék valamennyi oktató és dolgozó munkatársának türelmükért és támogatásukért. Külön köszönet illeti Jenyó Tamást, aki a kísérleteknél rengeteg segítséget nyújtott.

A kutatásaimat nem lehetett volna elvégezni azok nélkül az anyagi juttatások nélkül, amelyet Wigner Fizikai Kutatóközpont vezetősége „Az interferometriától a spektroszkópián át a plazmadiagnosztikáig” című, a Budapesti Műszaki Egyetemmel és a Miskolci Egyetemmel együttműködésben végzett Kiválósági programban tanulmányaimhoz, és a disszertáció elkészítéséhez nyújtott; valamint mindazon szellemi hozzájárulások nélkül, melyekkel a Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet Alkalmazott és Nemlineáris Optika Osztály munkatársai az évek során segítettek.

Szeretném megköszönni bírálóimnak Dr. Nagy Attilának és Dr. Hegedűs Györgynek, hogy idejüket és energiájukat szánták a disszertáció átolvasására, szakmai tartalmában azt segítették, építő kritikai megjegyzéseikkel színvonalát emelték.

Köszönet illeti Prof. Dr. Tisza Miklós Professzor urat, mint volt vezetőjét, és Vadászné Dr. Bognár Gabriella Professzor Asszonyt, mint a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola jelenlegi vezetőjét, akik lehetőséget teremtettek a doktori iskolában való részvételre, és annak elvégzésére.

Köszönöm az NKFI-125117 számú projekt Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatását, melynek segítségével a dolgozat a K\_17 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Végül értekezésemet szüleimnek és családomnak ajánlom, akik hosszú-hosszú éveken keresztül sok-sok szeretettel, megértéssel és biztatással segítettek abban, hogy ez a dolgozat elkészüljön.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] *Budó, Á., Mátrai, T., Hornyák, L.*: Kísérleti fizika. Vol III, Optik, Budapest, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 1999.
- [2] *Czitrovsky, A.*: LI-03 típusú szubmikronos lézerinterferométer kezelési és karbantartási könyv. Budapest, 1998.
- [3] *Jani, P., Czitrovsky, A., Szótér, L., Tajnafői, J., Barna, B., Molnár, L.*: A laser interferometric motion analyser system and some of its applications. Publications University of Miskolc, Vol 1, pp. 17–24, 1999.
- [4] *Chapuis, B.*: Introduction to Structural Health Monitoring. In: Chapuis, B., Sjerne, E. (eds) Sensors, Algorithms and Applications for Structural Health Monitoring. IIW Collection. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69233-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69233-3_1), 2018.
- [5] *Ge, Zhiqiang, Song, Zhifan, Gao, Furong*: Review of Recent Research on Data-Based Process Monitoring. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol 52, pp. 3543–3562. 10.1021/ie302069q, 2013.
- [6] *Landers, R., Ulsoy, A., Furness, R.*: Process Monitoring and Control of Machining Operations. The Mechanical Systems Design Handbook: Modeling, Measurement, and Control. 10.1201/9781420036749.ch6, 2001.
- [7] *Djurđjanovic, D., Mears, L., Niaki, F. A., Haq, A. U., Li, L.*: State of the Art Review on Process, System, and Operations Control in Modern Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, Vol 140, No 6, American Society of Mechanical Engineers (ASME), Vol 140, No 6, 061010, 2018.
- [8] *Zhou, Z., Yao, B., Xu, W., Wang L.*: Condition monitoring towards energy-efficient manufacturing: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 91, pp. 3395–3415, 2017.
- [9] *D. E. Dimla Snr.*: Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - a review of methods. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 40, No 8, pp. 1073–1098, 2000.
- [10] *Kuntoğlu, M.; Aslan, A.; Sağlam, H.; Pimenov, D.Y.; Giasin, K.; Mikolajczyk, T.*: Optimization and Analysis of Surface Roughness, Flank Wear and 5 Different Sensorial Data via Tool Condition Monitoring System in Turning of AISI 5140. Sensors, Vol 20, No 4377, <https://doi.org/10.3390/s20164377>, 2020.
- [11] *Sadilek, Marek & Kratochvíl, Jiří & Petru, Jana & Čep, Robert & Zlamal, Tomas & Stančeková, Dana*: Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers. Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette (online), Vol 21, pp. 639-644, 2014.
- [12] *Donati, S., Norgia, M.*: Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering. Optical Engineering, Vol 57, No 5, 051506, 2018.

- [13] Kurada, S., Bradley, C.: A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. *Computers in Industry*, Vol 34, No 1, pp. 55–72, 1997.
- [14] Randall, R. B.: *Vibration-based Condition Monitoring*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [15] Downey, J., Bombiński, S., Nejman, M., Jemielniak, K.: Automatic multiple sensor data acquisition system in a real-time production environment. *Procedia CIRP*, Vol 33, pp. 215–220, 2015.
- [16] B. Hussain *et al.*, “Fast processing of optical fringe movement in displacement sensors without using an ADC,” *Photonic Sensors*, vol. 3, no. 3, pp. 241–245, Sep. 2013, doi: 10.1007/s13320-013-0088-5.
- [17] *ME Fizikai Intézet, Wigner FK.*: Extrém anyagok, energiák és technológiák - Az interferometriától a spektroszkópián át a plazmadiagnosztikáig. Kiválósági Együttműködési Program, 2014.
- [18] Béres, M., Paripás, B., Majár, J., Bodolai, T., Rónai, L., Illavszky, V.: Rezgések precíziós összehasonlító vizsgálata lézertérferometriai mozgásanalizátorokkal. doi: 10.26649/musci.2016.054, 2016.
- [19] Portable Digital Vibrometer PDV-100. Polytec GmbH, pp. 2–3, 2012, Accessed: Jan. 28, 2021. Available: <https://datasheets.globalspec.com/ds/107/Polytec/91504811-15A2-4E51-BFB9-F1D85AADC8BB>. [Online]
- [20] Halliwell, N. A.: The laser torsional vibrometer: A step forward in rotating machinery diagnostics. *Journal Sound and Vibration*, Vol 190, No 3, pp. 399–418, 1996.
- [21] Rothberg, S. J., Halliwell, N. A.: Vibration measurements on rotating machinery using laser doppler velocimetry. *Journal Vibration and Acoustics*, Trans. ASME, Vol 116, No 3, pp. 326–331, 1994.
- [22] Bell, J., Rothberg, S. J.: Radial vibration measurements on rotors using laser vibrometry: a first practical solution to the cross-sensitivity problem. In: *Third International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, Jun. 1998, Vol 3411, pp. 14–22, doi: 10.1117/12.307692, 1998.
- [23] Halliwell, N. A., Pickering, C. J. D., Eastwood, P. G.: The laser torsional vibrometer: A new instrument. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 93, No 4, Academic Press, pp. 588–592, doi: 10.1016/0022-460X(84)90427-9, 1984.
- [24] Halliwell, N. A., Rothberg, S. J., Miles, T. J., Eastwood, P. G., Pickering, C. J. D., Gatzwiller, K. B.: On the working principle of torsional vibration meter Type 2523. Exposure, Accessed: Jan. 28, 2021. Available: <http://www.bksv.com/doc/bo0426.pdf>. [Online], 1997.
- [25] Suh, Y. S.: Laser sensors for displacement, distance and position. *Sensors (Switzerland)*, Vol 19, No 8. MDPI AG, doi: 10.3390/s19081924, 2019.
- [26] Berkovic, G., Shafir, E.: Optical methods for distance and displacement measurements. *Advances in Optics and Photonics*, Vol 4, No 4, pp. 441–471, doi: 10.1364/aop.4.000441. 2012.
- [27] Paripás, B., Béres, M.: Optikai módszerek mikrométeres felbontású távolságmérésre. Proc., MultiScience - XXXII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc, 5-6 September, ISBN 978-963-358-162-9, 2018.

- [28] Kiss, Á. K., Bachrathy, D., Stépán, G.: Laser scanned patterns of machined surfaces,” *Procedia CIRP*, Vol 77, pp. 355–358, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.034. 2018.
- [29] Zhang, H., Ren, Y., Liu, C., Zhu, J.: Flying spot laser triangulation scanner using lateral synchronization for surface profile precision measurement. *Applied Optics*, Vol 53, No 20, pp. 4405–4412, doi: 10.1364/ao.53.004405. 2014.
- [30] Wu, C. C., Wu, W. J., Pan, Z. S., Lee, C. K.: Laser linear encoder with both high fabrication and head-to-scale tolerances. *Applied Optics*, Vol 46, No 16, pp. 3169–3176, Jun. 2007, doi: 10.1364/AO.46.003169. 2007.
- [31] Dong, Z., Sun, X., Chen, C., Sun, M.: A fast and on-machine measuring system using the laser displacement sensor for the contour parameters of the drill pipe thread. *Sensors (Switzerland)*, Vol 18, No 4, doi: 10.3390/s18041192. 2018.
- [32] Petrović, P.: Rubberized cord thickness measurement based on laser triangulation, Part I: Technology. *FME Transactions*, Vol 35, No 2, pp. 77–84, 2007.
- [33] Žbontar, K., Mihelj, M., Podobnik, B., Povše, F., Munih, M.: Dynamic symmetrical pattern projection based laser triangulation sensor for precise surface position measurement of various material types. *Applied Optics*, Vol 52, No 12, pp. 2750–2760, doi: 10.1364/AO.52.002750. 2013.
- [34] Dainty, J. C.: The statistics of speckle patterns. *Progress in Optics*. Vol 14, No C, pp. 1–46, doi: 10.1016/S0079-6638(08)70249-X. 1977.
- [35] Nishiguchi, T., Koizumi, Y., Maeda, Y., Masami, M., Nagayama, K., Okamura, K.: Improvement of Productivity in Aspherical Precision Machining with In-situ Metrology. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, Vol 40, No 1, pp. 367–370, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62008-3. 1991.
- [36] Gao, W., Kim, S. W., Bosse, H., Haitjema, H., Chen, Y. L., Lu, X. D., Knapp, W., Kunzmann, H.: Measurement technologies for precision positioning. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, Vol 64, No 2, pp. 773–796, doi: 10.1016/j.cirp.2015.05.009. 2015.
- [37] Miles, T. J., Lucas, M., Halliwell, N. A., Rothberg, S. J.: Torsional and bending vibration measurement on rotors using laser technology. *Journal Sound and Vibration*, Vol 226, No 3, pp. 441–467, doi: 10.1006/jsvi.1999.2253. 1999.
- [38] Rothberg, S. J., Allen, M. S., Castellini, P., Di Maio, D., Dirckx, J. J., Ewins, D. J., Halkon, B., Muyschondt, P.G., Paone, N., Ryan, T.J., Steger, H., Tomasini, E.P., Vanlanduit, S., Vignola, J. F.: An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 99, pp. 11–22, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.023. 2017.
- [39] Dornfield, D. A., Lee, Y., Chang, A.: Monitoring of ultraprecision machining processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 21, No 8, pp. 571–578, doi: 10.1007/s00170-002-1294-2. 2003.
- [40] Bhuiyan, M. S. H., Choudhury, I. A.: Review of Sensor Applications in Tool Condition Monitoring in Machining. *Comprehensive Materials Processing*, Vol 13, pp. 539–569, doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01330-3. 2014.
- [41] Urbikain, G., Olvera, D., de Lacalle, L. N. L., Elías-Zúñiga, A.: Spindle speed variation technique in turning operations: Modeling and real implementation. *Journal Sound and Vibration*, Vol 383, pp. 384–396, doi: 10.1016/j.jsv.2016.07.033. 2016.
- [42] Sun, H.: Modeling the near-field and far-field modes of single spatial mode laser diodes. *Optical Engineering*, Vol 51, No 4, p. 044202, doi: 10.1117/1.oe.51.4.044202. 2012.
- [43] Naqwi, A. Durst, F.: Focusing of diode laser beams: a simple mathematical model. *Applied Optics*, Vol 29, No 12, pp. 1780–1785, doi: 10.1364/ao.29.001780. 1990.

- [44] Wong, Y. S., Nee, A. Y. C., Li, X. Q., Reisdorf, C.: Tool condition monitoring using laser scatter pattern. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 63, No 1–3, pp. 205–210, doi: 10.1016/S0924-0136(96)02625-8. 1997.
- [45] Prasad, B. S., Sarcar, M. M. M., Ben, B. S.: Development of a system for monitoring tool condition using acousto-optic emission signal in face turning-an experimental approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol 51, No. 1–4, pp. 57–67, doi: 10.1007/s00170-010-2607-5. 2010.
- [46] Prasad, B. S., Prabha, K. A., Kumar, P. V. S. G.: Condition monitoring of turning process using infrared thermography technique – An experimental approach. *Infrared Physics and Technology*, Vol 81, pp. 137–147, doi: 10.1016/j.infrared.2016.12.023. 2017.
- [47] Rao, K. V., Murthy, B. S. N., Rao, N. M.: Experimental study on tool condition monitoring in boring of AISI 316 stainless steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol 230, No 6, pp. 1144–1155, doi: 10.1177/0954405414565139. 2016.
- [48] Chern, G. L., Liang, J. M.: Study on boring and drilling with vibration cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 47, No 1, pp. 133–140, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.017. 2007.
- [49] Béres, M., Paripás, B.: Measuring of drill bit vibration by laser Doppler methods. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol 448, No 1, doi: 10.1088/1757-899X/448/1/012068, 2018.
- [50] Béres, M., Paripás, B.: Fúrósár rezgéseinek mérése lézer Doppler módszerrel, In: Kékesi Tamás (szerk.) *MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*. 2017, [online] Paper C2/4, p.9 (ISBN:978-963-358-132-2) Miskolc, Hungary, 2017.
- [51] Tatar, K., Gren, P.: Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 48, No. 3–4, pp. 380–387, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2007.09.009. 2008.
- [52] Béres, M., Paripás, B.: Measurements of vibration by laser doppler method in the course of drilling. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 199–208, Springer, Cham., 2018.
- [53] Balaji, M., Murthy, B. S. N., Rao, N. M.: Optimization of Cutting Parameters in Drilling of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA. *Procedia Technology*, Vol 25, pp. 1106–1113, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.217. 2016.
- [54] Ryabov, O., Mori, K., Kasashima, N., Uehara, K.: An In-Process Direct Monitoring Method for Milling Tool Failures Using a Laser Sensor. *CIRP Annals*, Vol 45, no 1, pp. 97–100, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63024-8. 1996.
- [55] Faassen, R. P. H., Van de Wouw, N., Oosterling, J. A. J., Nijmeijer, H.: Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol 43, No 14, pp. 1437–1446, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00171-8. 2003.
- [56] M. Rantatalo, “Non-contact measurements and modelling of milling machine tool vibrations. Licent. thesis / Luleå Univ. Technol., 2006.
- [57] Österlind, T., Frangoudis, C., Archenti, A.: Operational Modal Analysis During Milling Of Workpiece, Fixed On A Stiffness Controllable Joint. *Journal of Machine Engineering*, Vol 13, No 2, p. 69-78, 2013.
- [58] Nakagawa, H., Kurita, Y., Ogawa, K., Sugiyama, Y., Hasegawa, H.: Experimental Analysis of Chatter Vibration in End-Milling Using Laser Doppler Vibrometers. *International Journal of Automotive Technology*, Vol 2, No 6, pp. 431–438, doi: 10.20965

- /ijat.2008.p0431. 2018.
- [59] *Norman, P., Bäckström, M., Rantatalo, M., Svoboda, A., Kaplan, A.*: A sophisticated platform for characterization, monitoring and control of machining. *Measurement Science and Technology*, Vol 17, No 4, pp. 847–854, doi: 10.1088/0957-0233/17/4/032. 2006.
- [60] *Béres, M., Paripás, B.*: “Comparison of two laser interferometric methods for the study of vibrations,” *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Vol. Part F12, pp. 205–216, doi: 10.1007/978-3-319-51189-4\_20. 2017.
- [61] *Majár, J., Béres, M., Kovács, E.*: Különböző alátámasztások hatása a lézer doppleres mérések szisztematikus hibáira. *Proc., MultiScience - XXXIII. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc*, 5-6 September 2019, doi: 10.26649/musci.2019.024. 2019.
- [62] *Munoa, J., Beudaert, X., Dombovari, Z., Altintas, Y., Budak, E., Brecher, C., Stepan, G.*: Chatter suppression techniques in metal cutting. *CIRP annals*, Vol 65, No 2, 785-808. 2016.
- [63] *Norgia, M., Melchionni, D., Pesatori, A.*: Self-mixing instrument for simultaneous distance and speed measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 99, pp. 31–38, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.013. 2017.
- [64] *Halkon, B. J., Rothberg, S. J.*: Taking laser Doppler vibrometry off the tripod: correction of measurements affected by instrument vibration. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 91, pp. 16–23, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.11.006. 2017.
- [65] *Hosek, P.*: Algorithm for signal drop-out recognition in IC engine valve kinematics signal measured by laser Doppler vibrometer. *Optics and Laser Technology*, Vol 44, No 4, pp. 1101–1112, doi: 10.1016/j.optlastec.2011.09.034. 2012.
- [66] *Drain, L. E.*: *The laser-Doppler technique*. John Wiley & Sons, 1980.
- [67] *Tatar, K., Rantatalo, M., Gren, P.*: Laser vibrometry measurements of an optically smooth rotating spindle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 21, No 4, pp. 1739–1745, doi: 10.1016/j.ymsp.2006.08.006. 2007.
- [68] *Bell, J. R., Rothberg, S. J.*: Laser vibrometers and contacting transducers, target rotation and six degree-of-freedom vibration: What do we really measure? *Journal of Sound and Vibration*, Vol 237, No 2, pp. 245–261, doi: 10.1006/jsvi.2000.3053. 2000.
- [69] *Rothberg, S. J., Baker, J. R., Halliwell, N.A.*: On Laser Vibrometry of Rotating Targets: Effects of Torsional and In-Plane Vibration. *Journal of Laser Applications*, Vol 2, No 1, pp. 29–36, doi: 10.2351/1.4745250. 1990.
- [70] *Martin, P., Rothberg, S.*: Introducing speckle noise maps for Laser Vibrometry. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol 47, No 3–4, pp. 431–442, 2009.
- [71] *Rothberg, S. J., Baker, J. R., Halliwell, N. A.*: Laser vibrometry: Pseudo-vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 135, No 3. pp. 516–522, doi: 10.1016/0022-460X(89)90705-0. 1989.
- [72] *Courville, S. W., Sava, P.*: *Toward Orbital Seismology: Theory for Speckle Noise Reduction in Laser Doppler Vibrometer Measurements on Distant Rough Surfaces*. Diss., ProQuest, 2020.
- [73] *Vass, J., Šmíd, R., Randall, R. B., Sovka, P., Cristalli, C., Torcianti, B.*: Avoidance of speckle noise in laser vibrometry by the use of kurtosis ratio: Application to mechanical fault diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 22, No 3, pp. 647–671, doi: 10.1016/j.ymsp.2007.08.008. 2008.
- [74] *Béres, M., Majár, J., Rónai, L., Paripás, B.*: Precíziós sebességmérés lézer-interferometrikus módszerrel. *Multidiszciplináris Tudományok, Miskolci Egyetem Közleményei*, Vol 6, No 1, pp. 9–19, [Online]. 2016.

- 
- [75] *Hack, G., Kugler, F., Radnai, S., Tóth, Gy.*: Négyjegyű függvénytáblázatok matematikai, fizikai, kémiai összefüggések. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.
- [76] *Han, S. M., Benaroya, H., Wei, T.*: Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories. *Journal of Sound and Vibration*, Vol 225, No 5, pp. 935–988, doi: 10.1006/jsvi.1999.2257. 1999.
- [77] “Tuning fork,” *WIKI*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Tuning\\_fork](https://en.wikipedia.org/wiki/Tuning_fork). Access.: 2021.
- [78] *Zhang, John X. J., Hoshino, K.*: Mechanical transducers: Cantilevers, acoustic wave sensors, and thermal sensors. Ch 6 In: *Molecular Sensors and Nanodevices*, 2019.
- [79] *Bosznay, Á.*: Műszaki rezgésstan. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.
- [80] *Tyihonov, A. N., Szamarszkij, A. A.*: A matematikai fizika differenciálegyenletei. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1956.
- [81] “MSZ 18163-2:1998 Rezgésmérés. Az emberre ható környezeti rezgések vizsgálata lakó-, üdülő- és középületekben című szabvány.” 1998.
- [82] *Loughridge, R., Abramovitch, D. Y.*: A tutorial on laser interferometry for precision measurements. In: *Proceedings of the American Control Conference*, Jun. 2013, pp. 3686–3703, doi: 10.1109/ACC.2013.6580402, 2013.



ÁBRÁK JEGYZÉKE

1. ábra: Az intézeti lézerinterferométer opto-mechanikai vázlata.....	6
2. ábra: A detektor rendszer (az 1. ábra bal alsó sarka) részletezve.....	6
3. ábra: A vibrométer vázlatos felépítése .....	8
4. ábra: Az LTV módszer (szögsebesség mérése kétsugaras technikával) .....	9
5. ábra: A lézeres háromszögeléses módszer .....	10
6. ábra: Háromszögeléses távolságmérés sematikus vázlata, és a nyalábforma .....	11
7. ábra: A konfokális távolságérzékelők elvi felépítése .....	12
8. ábra: Ultraprecíziós megmunkálásnál monitoringhoz használt érzékelők ([28]alapján) .....	13
9. ábra: A lézerinterferométer új központi egysége .....	20
10. ábra: A LabView mérőprogram folytonos mérési üzemmódjának grafikus felülete .....	21
11. ábra: A felújított lézerinterferometrikus mozgásanalizátor az új rezgésmentes asztalon működés közben.....	22
12. ábra: A lézerinterferometrikus mozgásanalizátor lézernyalábjának mérése Fabry-Pérot interferométerrel.....	23
13. ábra: Az egyik mozgásanalizátor lézernyalábjának Fabry-Pérot spektruma .....	23
14. ábra: A lézernyaláb egymódusú üzemben.....	24
15. ábra: A műszerek elhelyezése a régi „rezgésmentes” asztalon .....	25
16. ábra: A műszerek elhelyezése az új rezgésmentes Nexus Breadboard asztalon .....	25
17. ábra: Egy „koppantás” sorozatot követő csillapodó rezgések sebesség adatai: felül: LDV (fekete) és LIMA (piros) sebességadatok együtt, alul: ezek különbsége .....	26
18. ábra: A 8. koppantás utáni első néhány rezgés kinagyítva. (Adatok, mint az előző ábrán.)...27	
19. ábra: A 8. koppantás utáni rezgések megszűnése. (Adatok, mint a 17. ábra felső részén.) ....28	
20. ábra: Az optimális LDV korrekciós faktor meghatározása .....	29
21. ábra: A mérés elrendezése .....	30
22. ábra: A tokmányba fogott 12mm átmérőjű fűrészár lézersugárra merőleges koppintás utáni rezgése: a.) időspektrum (sebesség [m/s] az idő függvényében); b.) FFT spektrum (amplitúdó a frekvencia függvényében) .....	31
23. ábra: A tokmányba fogott 9mm átmérőjű fűrészár rezgési spektrumai (FFT) különböző fűrészár pozíciókban és koppintási irányok esetén: a.) eredeti (0°-os) pozíció, lézersugár irányú koppintás; b.) eredeti pozíció, lézersugárra merőleges koppintás; c.) 90°-os pozíció, lézersugár irányú koppintás; d.) 90°-os pozíció, lézersugárra merőleges koppintás .....	32
24. ábra: mint az előző ábrán, de itt a fűrészár átmérője 10mm .....	32
25. ábra: mint az előző ábrán, de itt a fűrészár átmérője 12mm .....	32
26. ábra: A tokmányba fogott 10mm átmérőjű fűrészár rezgési spektrumai (FFT) úgy, hogy a fűrészár csúcsát „pontoszerű” módon megfogtuk: a.) megfogás „normál” erővel, lézersugár irányú koppintás; b.) megfogás „normál” erővel, lézersugárra merőleges koppintás; c.) megfogás	

megnövelt erővel, lézersugár irányú koppintás; d.) megfogás megnövelt erővel, lézersugárra merőleges koppintás.....	33
27. ábra: A 26/c ábrán bemutatott FFT spektrumhoz tartozó időspektrum (sebesség [m/s] az idő függvényében) és a megjelölt két pont közötti rész FFT spektruma.....	34
28. ábra: A 9mm átmérőjű tokmányba fogott 90°-os pozíciójú fúrószár (lézersugárra merőleges koppintás) rezgési spektrumai (FFT) a.) gumikalapáccsal; b.) másik fúrószárral történő koppintást követően.....	34
29. ábra: A 9mm átmérőjű tokmányba fogott 90°-os pozíciójú fúrószár rezgési spektrumai (FFT) az eredeti (a tokmányba teljesen betolt), ill. 3mm-rel kihúzott állapotában: a.) eredeti állapot, lézersugár irányú koppintás; b.) eredeti állapot, lézersugárra merőleges koppintás; c.) kihúzott állapot, lézersugár irányú koppintás; d.) kihúzott állapot, lézersugárra merőleges koppintás.....	35
30. ábra: A háttér rezgések időspektruma (sebesség [m/s] az idő függvényében) és FFT spektruma. ....	35
31. ábra: A fúrószárak mért rezgési frekvenciáinak összevetése az egyező méretű hengeres rudak számított frekvenciáival (növekvő frekvencia szerint a 12mm, a 10mm és a 9mm átmérőjű fúrószárak).....	37
32. ábra: A 9mm átmérőjű, rögzített és „hajtott” típusú tokmányba fogott fúrószár (lézersugárra merőleges fémes koppintás) rezgési spektrumai (FFT): a.) 3-pofás tokmányba fogott, rögzített fúró, b.) hajtott, befogóperselyes tokmányba fogott fúró.....	38
33. ábra: Az LDV mérési elrendezés .....	40
34. ábra: A fúrószár keresztirányú rezgési sebességének időfüggése a kiválasztott mérésben. Az ábrán a fúrási szakaszokat is bejelöltük .....	41
35. ábra: A fúrás 34. ábra által bemutatott első szakaszának (0,5-1,05s) kinagyított része.....	41
36. ábra: A (b) fúrási szakasz sebesség-idő függvénye és ennek Fourier-spektruma.....	42
37. ábra: A (d) fúrási szakasz sebesség-idő függvénye és ennek Fourier-spektruma.....	42
38. ábra: A (f) fúrási szakasz sebesség-idő függvényének egy részlete (fent), az f1 szakasz (középen) és az f2 szakasz végének Fourier-spektruma .....	43
39. ábra: A fúró “csigavonalának” az áthaladása a lézernyalábon.....	44
40. ábra: Az LTV mérési elrendezés .....	46
41. ábra: A fúrás közbeni LDV mérés szakaszokra bontása (középen a sebesség-idő függvényen) és a különböző szakaszokat jellemző Fourier-spektrumok (alul és fölül), esetenként a kis frekvenciájú tartomány kinagyítva.....	48
42. ábra: Az előbbi ábrán szereplő sebesség-idő függvény egy részlete .....	49
43. ábra: A fúrás közbeni LTV mérés szakaszokra bontása (középen a $d\omega$ -idő függvényen) és a különböző szakaszokat jellemző Fourier-spektrumok (alul és fölül), esetenként a kis frekvenciájú tartomány kinagyítva.....	49
44. ábra. Időtartománybeli jel és a hozzá tartozó teljesítmény-sűrűség függvény.....	50
45. ábra. Az LDV és az LTV által mért jel spektruma alsó tartománya .....	51
46. ábra: Az utcafronti főfal rezgései a város felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum).....	53
47. ábra: Az utcafronti főfal rezgései Diósgyőr felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum) .....	54
48. ábra: Az ablaküveg rezgései a város felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum).....	54

49. ábra: Az ablaküveg rezgései Diósgyőr felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum).....	55
50. ábra: A belső fal rezgései a város felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum).....	55
51. ábra: A belső fal rezgései Diósgyőr felől érkező villamos esetén (időspektrum és FFT-spektrum)w.....	56
52. ábra: Egy távoli „dobbantás” hatása a belső falon a város felől érkező villamos esetén.....	56
53. ábra: Az előző időspektrum egy része, amely még a villamos hatása. Jobb oldalon a kinagyított időspektrum FFT spektruma.....	57
54. ábra: A rezgésmentes asztalon lévő LDV eszköz (balra lent), a LIMA eszköz (jobbra lent), valamint a falra erősített mérőoldali sarokprizma (LIMA) és visszaverő fólia (LDV) működés közben (fent).....	58
55. ábra: A falrezgés LIMA-val mért időspektruma (elmozdulás-idő függvénye) és annak egy kinagyított szakasza (lent) csendes laboratóriumban.....	59
56. ábra: A falrezgés LIMA eszközzel mért FFT spektruma (az előző ábrán - 55. ábra - bemutatott időspektrumhoz tartozó FFT spektrum) csendes laboratóriumban.....	60
57. ábra: A falrezgés LIMA eszközzel mért FFT spektruma, ha a kb. 10 méterre lévő lépcsőn ugrálnak.....	60
58. ábra: A falrezgés LIMA eszközzel mért FFT spektruma ha a laboratórium előtti folyosón ugrálnak.....	61
59. ábra: A falrezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma (belül a teljes spektrum, kívül a 0-50Hz tartomány kinagyítva) csendes laboratóriumban.....	61
60. ábra: A falrezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma ha a laboratórium előtti folyosón ugrálnak.....	62
61. ábra: A keresztfal rezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma csendes laboratóriumban.....	63
62. ábra: A keresztfal rezgés LDV eszközzel mért FFT spektruma, ha a folyosón fizikai aktivitás (ugrálás, futkosás) van.....	63
63. ábra: A tartófal rezgés LDV spektrumainak maximális amplitúdói mm/s egységben. Kétperces átlagok 2021. július 12. (hétfő) 0 órától 18. (vasárnap) 24 óráig (a vastag függőleges segédvonalak az éjfélt, a vékonyak a delet mutatják).....	64
64. ábra: A tartófal rezgés LDV spektrumainak maximális amplitúdóihoz tartozó frekvenciák eloszlása logaritmikus gyakorisági skálán. A gyakoriságot a 0,1Hz osztással felvett hisztogramra vonatkoztattuk.....	65