



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

ELEKTROMOS KORMÁNYSZERVÓ MOTOROK REZGÉSANALÍZISE

Készítette

Gungl Szilárd

Konzulens

Aranyi Csaba
Orosz György

2018

TARTALOMJEGYZÉK

Kivonat.....	5
Abstract.....	6
1. Bevezetés	7
2. Rendszerterv és specifikáció.....	11
3. Irodalomkutatás	15
3.1. Elektromos szervomotorok működési elve.....	15
3.2. Felhasznált jelfeldolgozási módszerek	20
3.2.1. Spektrum.....	20
3.2.2. Spektrogram.....	20
3.2.3. Order	22
3.2.4. Jelszint számítás.....	25
3.2.5. Order cut	26
3.2.6. Averaged order	27
3.3. Létező szoftverek bemutatása.....	28
3.3.1. ArtemiS SUITE.....	28
3.3.2. MATalyzer.....	29
4. Felhasznált eszközök	31
4.1. Hardver	31
4.2. Szoftver.....	33
5. Megvalósított szoftver	34
5.1. Beolvasó komponens	34
5.2. Jelfeldolgozó komponens	37
5.2.1. Jelszint (Level).....	37
5.2.2. Spektrogram.....	37
5.2.3. Order spektrum (RPM sync).....	38
5.2.4. Order cut, Averaged order	39
5.3. GUI felépítése	39
5.4. Elkészült program értékelése	41
6. Mérési eredmények elemzése	43
6.1. Vizsgálati módszertan.....	43

6.2. Mérés eredményei.....	45
6.3. A házrezgések oka	46
7. Javaslattétel a mérési eljárás módosítására	51
8. Összefoglaló.....	57
Irodalomjegyzék	59
Függelék.....	60

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Gungl Szilárd, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2018. 12. 15.

.....
Gungl Szilárd

Kivonat

Az általános értelemben vett zajnak számos negatív élettani hatása van, melyek különösen fontossá válnak akkor, ha az alany olyan veszélyes tevékenységben vesz részt mint a vezetés. Az utastér belső zaja rontja kognitív képességeket, zavarja a figyelmet, valamint nem utolsósorban csökkenti a komfortérzetet is. Így nem meglepő, hogy a gyártók nagy hangsúlyt fektetnek a zajrezgés vizsgálatokra, illetve a zaj csökkentésére.

A folyamatos mérnöki fejlesztésnek köszönhetően a járművek zaja egyre inkább lecsökkent, melynek hatására olyan zajkomponensek is hallhatóvá váltak, mint például a kormányzárségitő rendszer zaja. A mai modern rendszerekben a meghajtást egy elektromos szervomotor végzi, mely tekinthető a zaj forrásának is.

A motorokon elvégzett zajrezgés mérések spektrális elemzésével lehetőségünk van azonosítani az egyes zajkomponensek forrását, melyet a későbbi tervezés során figyelembe tudunk venni.

A dolgozatomban megvizsgálom a mérések kiértékelésére leggyakrabban használt jelfeldolgozási eljárásokat, mint a spektrogram, Campbell-diagram, order spektrum, majd ezeket implementálom egy MATLAB program formájában, mely képes akár több fájl automatikus beolvasására és a generált diagramok exportálására is.

A mérési eredmények korreláció-analízisével megállapítom, hogy az előzetes várakozásokkal ellentétben a nyomaték hullámosság és a házrezgések között nincsen közvetlen kapcsolat.

Az implementált jelfeldolgozási algoritmusok pontosságának és robusztusságának növelése érdekében új fordulatszám-felfutási görbék használatát vetem fel, melyekkel kiküszöbölhető a spektrum-elkenődés, illetve a rezonanciafrekvenciák torzítása.

Abstract

Noise can have various negative effects on health, which are important to consider when one engages in dangerous activities, such as driving. Cabin noise can distract the driver, cause stress and lower the cognitive abilities and reaction time. Excessive noise can inhibit the general comfort of passengers. These factors explain why car manufacturers invest financially in NVH measurements and lowering the cabin noise.

A continuous development of the acoustic behaviour of vehicles resulted in the discovery of new noise sources. Modern steering systems utilise an electric servo motor which acts as the origin of the emitted noise. By analysing the spectral structure of the motor NVH measurements we can find the sources of the noise. This information can later be used when designing steering systems to further optimise the vibration and sound emission.

In this paper I examine the most common signal processing methods, such as the spectrogram, Campbell diagram, and order spectrum, and show my implementation in the form of a MATLAB program. This application is capable of reading multiple files and exporting the generated figures, making it possible to process large number of measurements automatically.

Through correlation analysis between motors with different parameters, I will prove that there is no connection between the motor torque ripple and the house vibrations. In order to enhance the robustness and accuracy of the implemented signal processing methods, I propose use of non-linear rpm curves for motor measurements, which can counter the effect of the spectrum smearing and the bias caused by the resonance frequencies.

1. Bevezetés

Ha hétköznapi értelemben zajról beszélünk, általában valamilyen nemkívánatos hangra gondolunk: a szomszédból áthallatszó ütvefűró, egy vonat zakatolása, vagy egy repülő hajtóművének süvítése. A napjaink részévé váló, állandó zajhoz már annyira hozzászoktunk, hogy egyesek ennek hiányát is zavaró hatásként élik meg. Akadnak olyanok is, akik különböző zajokat, életükben állandóan jelenlevő, és így már természetessé váló hangokat tartalmazó zenéket hallgatnak például a jobb alvási körülmények megteremtése és a könnyebb elalvás érdekében. A népszerű videómegosztókon keresgélve a legkülönbözőbb alvást segítő zajforrásokkal találhatjuk szemben magunkat, melyek közül néhányal könnyen azonosulhatunk, mint például a zuhogó eső, vagy az óceán hangja, de akad porszívó, ventilátor, vagy akár repülőgép hang is.

A zaj az emberi létezés mellékterméke már a kezdetektől fogva, mely a technika fejlődésével egyre jelentősebben mértékben van jelen életünkben. Ugyanakkor elmondható, hogy a legtöbb esetben – eltekintve az imént említett különleges helyzetektől – negatívan ítéljük meg: valamilyen kellemetlen, zavaró, bántó ingerként tekintünk rá. Már a korai uralkodókat is foglalkoztatta a kérdés, hogy hogyan lehetne csökkenteni a nagyvárosok zaját. Ismereteink szerint, a történelem során először Julius Caesar foglalkozott a kibocsátott zaj problémájával. Időszámításunk előtt 44-ben kiadott rendelete megtiltotta, hogy napkeltétől napnyugtáig kerek járművek közlekedjenek Rómán belül, melyeket később Claudius császár teljesen ki is tiltott a városból. A középkori városokban is igyekeztek törvényekkel fellépni a csendhábortók ellen, akiket harang alá ültettek és fejük felett húzatták a harangot. [1] [2]

Ha a zaj fogalmát a mérnöki tudományok szemszögéből próbáljuk megközelíteni, hasonló definícióhoz jutunk: a zaj általános elnevezés a jel azon komponenseire, mely számunkra nem hordoz lényegi információt, és ennél fogva nem kívánatos összetevő. A zaj lehet egy komponensű, például a hangszórókon hallható halk, de konzisztens bűgás, melynek okozója a hálózati váltakozó feszültség. Ugyanakkor zajként tekintünk a minket körülvevő környezetből érkező folyamatos háttérzajra is, melyet szinte már észre sem veszünk. Ez a fajta zaj sok-sok zajforrás összege, így sok komponensből tevődik össze – egyenlő mértékben tartalmaz komponenseket a mélytől a magas tartományig – és ennél fogva aposztrofálják fehérként is, mely analóg az ugyancsak több komponensből (színből) álló fehér fény elnevezésével.

A zajok mellett, hogy rontják a hangulatunkat, közérzetünket, számos egészségügyi problémával is kapcsolatban állnak. A folyamatos zajterhelés okozhat állandó fülzúgást, növeli az általános feszültség szintet, a hosszú távú kitettség pedig eredményezhet szív- és agyér-problémákat, valamint esetenként felelős lehet alvászavarokért is. [3]

Ezeket a negatív hatásokat csak a közelmúltban ismerték fel, illetve kezdték kellő komolysággal kezelni. Az első modern kori előrelépés a zajkibocsátás kordában tartása érdekében az amerikai környezetvédelmi hatóság által megfogalmazott *Noise Pollution*

and Abatement Act of 1972 volt. Ez a kiadvány elsősorban a nagyvárosi környezetben leginkább számottevő zajforrások – tehát a motoros járművek, légi közlekedés, tömegközlekedés – által keltett zaj csökkentését célozta meg.

Napjainkban már számos törvényi előírás szabályozza a közlekedési eszközök zajkibocsátását, Az autógyártók szemszögéből vizsgálva a helyzetet viszont nem ez az egyetlen fontos paraméter amire figyelemmel kell lennünk. A járművek utasterében jelentkező zajok nagyságának csökkentése a vezetési élmény, valamint élettani hatások szempontjából is egyaránt fontos feladat. A kényelmi szempontokat nem kell részletezni. Egyértelmű, hogy egy csendes és nyugodt utastér sokkal kellemesebb környezetet biztosít a vezetéshez. Másrészt a korábban már említett egészségügyi hatások természetesen továbbra is érintik az utasokat, ám ami ennél sokkal veszélyesebb, hogy a sofőrt is. A folyamatos zaj közvetlenül befolyásolhatja a figyelmet, reakcióidőt, kognitív képességeket, valamint általánosan növelheti a feszültséget és a stresszt. Biztosan látott már mindenki olyan sofőrt, aki lehalkítja az autójában hangosan szóló rádiót, annak érdekében, hogy jobban tudjon koncentrálni egy parkolási manőver során. Ez a reakciónk önkéntelenül belénk van kódolva, viszont a rádióval ellentétben, a jármű működéséből adódó zajt nem tudjuk egyszerűen kikapcsolni.

Az utastér belső zajának csökkentése az elmúlt 30 év során egyre inkább előtérbe került. Eleinte a fő cél a kabin zajának elviselhetővé tétele volt, illetve, hogy a lehető legkisebbre csökkentsék az akusztikus zaj mértékét. Viszont az így lecsökkent általános zajszint hatására a motor kevésbé tudta elfedni a jármű többi zaját, melynek eredményeképp egyéb zajforrások is hallhatóvá váltak. Azóta a járművek fejlődésük során egyre csendesebbek lettek, ugyanakkor megnőtt a vásárlók érzékenysége is azok akusztikai tulajdonságaira. A motorzaj lecsökkentése után – mivel annak már nem volt kellő elfedő hatása – a menetszél zaja vált zavaróvá, annak csökkentése a kerékzajt, ez utóbbinak optimalizálása pedig újra a motorzajt tette hallhatóvá. Így tehát – leegyszerűsítve a folyamatot – egy véget nem érő optimalizálási kört eredményezett.

Következésképpen az autóiipari mérnökök egyre nagyobb figyelmet fordítottak a zajkibocsátásra, illetve azon komponensek vizsgálatára, melyek korábban teljesen el voltak fedve. Egy ilyen lehetséges összetevő – a sok közül – a kormányzárségítés zaja, melynek vizsgálata ennek a dolgozatnak a célja. Érdekes módon mindemellett lehetnek olyan elemei is a teljes kibocsátott zajnak, melyek pozitív megítélésűek és amelyeket nem szeretnénk elnyomni, vagy akár még az erősítésük is cél lehet. Erre jó példa a motor hangja egyes sportautó modelleknél.

Az utastér zajának vizsgálatakor nem elegendő pusztán az akusztikus zaj értékét figyelembe venni. Az utast is a rezgésakusztikai rendszer részének kell tekintenünk, aki a különböző érintkezési pontokon (kormánykerék, ülés, padlólemez, pedálok) keresztül csatolódik be a rendszerbe. Számos tanulmány kimutatta már a szerkezeten terjedő és teljes testen keresztül vagy kéz-kar útvonalon továbbított rezgések egészségre vonatkozó káros hatását. Ezek a jelenségek további érveket sorakoztatnak fel a jármű szerkezeti rezgéseinek csökkentése, valamint a teljes zajszint minimalizálása mellett. [4]

Ezen a ponton felmerülhet a kérdés, hogy valóban akkora problémát jelent-e egy nagy teljesítményű robbanó motor mellett működő elektromos (vagy akár hidraulikus) kormányzárségítő rendszer által keltett zaj és rezgés.

Egyrészt a motort a lehető legjobban igyekeznek elszigetelni, hogy minél kevesebb zaj juthasson az utastérbe, míg a kormánymű direkt mechanikus kapcsolatban áll a sofőrrel, így teret engedve a vezetett, szerkezeten terjedő rezgések számára. Természetesen a motorból is érkeznek vezetett rezgések az utastérbe, de ezek egy közvetett úton haladnak (váz, karosszéria, ülés...).

Másrészt, az akusztikus zaj amplitúdóján kívül annak spektrális tulajdonságai is fontos szerepet játszanak – vagyis, hogy a keltett rezgések milyen frekvenciájú összetevőket tartalmaznak. Figyelembe kell venni a jelentkező komponensek pszichoakusztikai hatásait is, például, hogy a különböző frekvenciájú és amplitúdójú összetevők ténylegesen milyen hangosnak hallunk, illetve hogy az egyes spektrális komponensek együttese milyen érzetet kelt. Zenészek – különösen elektromos gitárosok – körében ismert tény, hogy a páros számú felharmonikusok egyfajta „sima”, „lekerekített”, kellemes hangzást adnak, míg a páratlan harmonikusok kellemetlen hangúak (gondoljunk egy négyszögjel hangjára). [5]

Továbbá, a sofőr számára a hibák észlelése szempontjából is fontos lehet, hogy az általános zajszintet alacsonyan tartsuk. A hallásunk a második legfontosabb érzékszervünk, mellyel fontos visszajelzést kaphatunk a jármű állapotáról, például, hogy ha az egyik alkatrész hangosabb a szokásosnál. Ezt persze csak akkor tudjuk megtenni, ha az utastér többi eleme gyárilag halk működés közben és nem fedi el az elromlott rész által keltett zajt.

A kényelmi, élettani és biztonsági megfontolásokon túl a zajrezgés-vizsgálatot felhasználhatjuk az egyes alkatrészek megfelelőségének ellenőrzésére is, illetve segítségével követelményeket támaszthatunk a beszállítók felé is. A megfelelő paraméterek vizsgálatával – például a szervomotor házának különböző irányú rezgései – képet kaphatunk a rendszert felépítő alkatrészek gyártási minőségéről, az összeszerelés pontosságáról stb.

A házrezgések mellett természetesen további fizikai jellemzőket is mérhetünk, melyek kapcsolatban állnak (legalábbis intuíciónk alapján azt gondoljuk, hogy kapcsolatban állhat) a motor által keltett rezgésekkel. A valós kapcsolatok és összefüggések feltérképezésével még pontosabb, árnyaltabb képet kaphatunk a vizsgált rendszerről, illetve lehetőségünk nyílik arra is, hogy az egyes részegységeken végzett mérésekből extrapolálva következtetéseket vonjunk le a teljes rendszer viselkedésével kapcsolatban.

Itt jelenik meg a komponens tesztelés, illetve a szimuláció fontossága. Amíg egy valós fizikai környezetben – például egy autón – elvégzett zajrezgés mérések rengeteg időt, pénzt, embert és fizikai teret is igényelnek, addig egy mérőpadon elvégzett motor teszt, vagy egy virtuális környezetben lefuttatott szimuláció erőforrásigénye jóval alacsonyabb.

Továbbá, ha *effect-cause* jellegű vizsgálatot végzünk – tehát a rendszer ok-hatás viszonyait szeretnénk felmérni – sokkal egyszerűbb dolgunk lesz, ha a komponenseket a

rendszerrel elkülönítve vizsgáljuk (például hardware / software in the loop tesztek, ahol a környezeti jeleket is a tesztrendszer szimulálja).

Az *effect-cause* jellegű vizsgálatokat segíti az is, ha meg tudjuk vizsgálni a rendszer által keltett zaj spektrális összetételét. Az egyes komponensek amplitúdója, de még inkább a frekvenciája lényegi információt hordozhat arról, hogy a rendszer mely része keltette.

Összességében elmondható, hogy a járművek utasterében keletkező zajok csökkentése mind élettani, mind biztonsági megfontolásokból is kiemelten hasznos. A kisebb zajterhelés javítja az emberek közérzetét, illetve segít a koncentrációban és pozitívan hat a kognitív képességekre is. Ezek a hatások különösen fontosá válnak abban az esetben, ha az adott személy olyan veszélyes tevékenységben vesz részt mint a vezetés. Mindemellett a zajreagálás-vizsgálat a mérnöki tervezés és tesztelés egyes lépéseit is számos módon képes segíteni.

Ebben a dolgozatban az utastér megannyi zajforrása közül a kormányzásréségitő rendszert, azon belül is az ezt meghajtó elektromos szervomotort fogom közelebbről megvizsgálni különböző szempontok szerint.

2. Rendszerterv és specifikáció

A bevezetőben leírt megfontolások alapján a dolgozat célja az elektromos kormányzásrésegítő rendszerek (Electric Power-Assisted Steering - EPAS) rezgés- és zajkibocsátásának vizsgálata.

Az EPAS rendszerek feladata, hogy valamilyen mechanikán keresztül megkönnyítsék a kormányzást a jármű vezetője számára. Ezt úgy tudják megtenni, hogy hidraulikus vagy elektromos aktuátorok segítségével szabályozott módon energiát juttatnak a kormánymű mechanikájába, így a kormány mögött ülőtől kisebb erőfeszítést igényel a kormánykerék elmozdítása, mely különösen számottevő alacsony sebesség, vagy álló helyzet esetén.

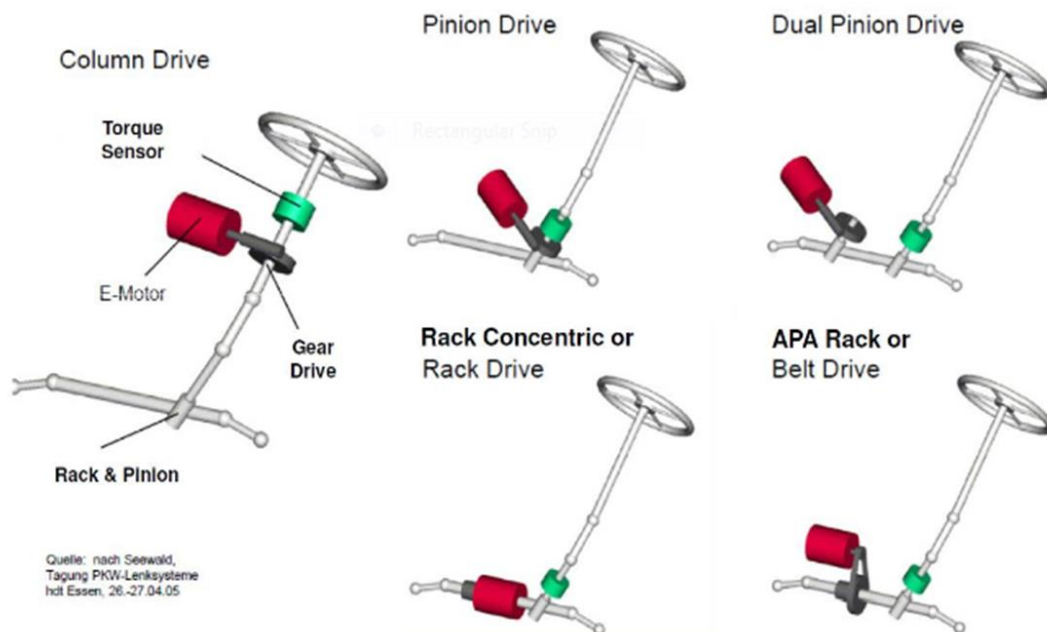
A szabályzó kör vezérlő jelét a kormánykeréken keresztül kifejtett nyomaték adja. Minél nagyobb erővel tekerjük a kormányt, annál nagyobb lesz a nyomaték, melynek következtében a beavatkozó jel nagysága is megnő.

A járművekben nagyon sokáig hidraulikus rendszereket alkalmaztak széleskörben, viszont az utóbbi időben az elektromos motorok és főként a számítástechnika fejlődése lehetővé tette ezen rendszerek kiváltását. Az EPAS rendszereknek számos előnyük van a hidraulikus társukkal szemben. Egyrészt a hidraulikus rendszerekben az állandó nyomás fenntartása érdekében a pumpáknak folyamatosan üzemelniük kell és ez az állandó energiafelvétel a jármű fogyasztásán is megmutatkozott. Az EPAS rendszerek esetén nincs állandó teljesítményfelvétel, hiszen ha éppen nem változtatunk a kormány állásán akkor a beavatkozó sem fog energiát juttatni a rendszerbe, így nincs teljesítményfelvétel.

Emellett a szoftver rugalmasságának köszönhetően a vezérlés egyszerűen és gyorsan változtatható, ezáltal több teret biztosít a fejlesztőmérnökök számára, valamint új lehetőségeket is rejt magában.

Gondoljunk csak a napjainkban egyre nagyobb népszerűségnek örvendő önvezető autókra. Ezek esetében praktikus megoldás az elektromos vezérlésű kormányzásrésegítés, melyet akár több vezérlési móddal is felruházhatunk attól függően, hogy épp egy személy szeretné vezetni, vagy teljesen önvezető módban szeretnénk használni az autót.

Attól függően, hogy a kormánymű szerkezetén belül hol található a nyomatékszenzor, illetve, hogy hol és milyen módon csatlakozik a résegítést megvalósító motor a mechanikához, eltérő EPAS rendszereket különböztetünk meg. Ezek a rendszerek természetesen eltérő teljesítménnyel, energia felvétellel és egyéb viselkedési paraméterekkel rendelkeznek.



1. ábra Különböző EPAS rendszerek

A teljes rendszer kibocsátott zajához számos összetevő járul hozzá. Ezek egy része, a különböző fizikai elemek interakciójaként a levegőben születik és a levegőben terjed tovább. Ilyen például a kerékzaj, a menetszél zaja, motorzaj (...). Ezek ellen viszonylag jól lehet védekezni szigetelő anyagok alkalmazásával, melyek lényegében a terjedési út (levegő) átviteli függvényét módosítják.

A másik csoport, ugyancsak a mechanikai elemek kölcsönhatásából születik, de a jármű szerkezetén belül, illetve itt is terjed tovább. Ennek szigetelése jóval nehezebb feladat. A strukturális zajok csökkentése történhet például gumi alátétek, szilikon áthidaló elemek beiktatásával, viszont ezek az elemek általában negatív irányba változtatják meg a szerkezet mechanikai tulajdonságait, valamint a szigetelő hatásuk sem kielégítő.

A szerkezeten terjedő zajok a jármű egyes mechanikai elemein terjedve bejuthatnak az utastérbe és ott akusztikus zajjá alakulva növelik a teljes zajszintet. Amellett, hogy ezeket nehéz csillapítani, fennállhat a lehetősége annak is, hogy a megfelelő komponensek a rendszer sajátfrekvenciáin (rezonanciafrekvenciáin) még erősödnek is.

Kormányrendszerek esetén a rásegítést megvalósító motor által keltett rezgések a kormányrúdon és kormánykeréken keresztül jutnak az utastérbe. Erre az összeállításra tekinthetünk úgy, mint egy rendszerre. A gerjesztést a motor vezérlése adja, mely működése során rezgéseket kelt. Ez a gerjesztés a mechanikai szerkezeten – mint átviteli függvényen keresztül – torzulva, az utastérben eredményez káros rezgéseket és akusztikus zajt.

Ezen gondolatmenet alapján az egyik távlati cél, hogy az egyes elemek és szintek mérési adatai között valamilyen kapcsolatot keressünk, és megismerjük az egyes egységek közti

átviteli függvényeket. A különböző szinteken – motor, motor + ECU (Electronic Control Unit – elektromos beágyazott vezérlő) és rendszer szinten (a teljes jármű zajregzés tulajdonságainak vizsgálata) – végzett mérések közti korreláció keresésével (ideális esetben) lehetőségünk nyílik megtalálni a zajok okát, illetve képet kaphatunk arról is, hogy az egyes zajforrások a végső rendszerben mekkora zajt fognak eredményezni. Ezek ismeretében meg tudunk fogalmazni követelményeket a motor paramétereivel szemben, úgy, hogy az a kívánt viselkedést teljesítse.

Mint láthatjuk a rendszer igencsak összetett. A jel terjedése során rengeteg átalakuláson megy keresztül. Ha szeretnénk jobb képet kapni az egész rendszer működéséről, először le kell bontanunk azt kisebb elemekre. Jó kiindulási pont lehet, ha a vizsgáldást a rezgések (egyik) forrásaként funkcionáló elektromos szervomotorral kezdjük.

Ezen megfontolások szerint végzik a méréseket a thyssenkrupp Components Technology Hungary vállalatnál is, ahol a diplomatermben bemutatott munkát végeztem.

A cég motor csoportja már évtizedek óta foglalkozik a kormányművek hajtását biztosító szervomotorok vizsgálatával. A budai központban elsősorban a motorok viselkedésének megállapítására végeznek méréseket, de emellett a cég escheni központjával együttműködve végeznek motor + ECU, valamint komplett rendszer szintű méréseket is. A munkám során elsősorban én is a motorokat önállóan tesztelő mérésekkel foglalkoztam.

Az elektromos szervomotorok működésük során a bemeneti kapcsaikra adott feszültségből – illetve ennek hatására a tekercseken folyó áramból – állítanak elő nyomatékot. A két fizikai mennyiség kapcsolata viszont közel sem triviális.

A kialakult nyomaték a forgási szög függvényében nem lesz konstans. Viszont a változó, *hullámzó* nyomaték ugyancsak változó mechanikai feszültséget kelt, mely végső soron rezgéseket eredményez. A későbbiekben látni fogjuk, hogy ez a fajta *nyomatékhullámosság* még a tökéletes mechanikai pontossággal legyártott és összeszerelt motoroknál is jelentkezik. Továbbá feltételezhetjük azt is, hogy a motor *nyomatékhullámossága* és az az által keltett rezgések kapcsolatban állnak az utastérben keletkező akusztikus zajjal, tehát érdemes ezeket a fizikai mennyiségeket megvizsgálni.

A cég által a motor nyomatékának és házregzésének vizsgálatára rendszeresített mérés blokkdiagramja látható az alábbi ábrán.



2. ábra A mérőrendszer felépítése

A feladatkiírás megalkotásakor a cég kérése elsősorban az volt, hogy az ilyen motoros tesztek során keletkezett eredményeket olvassam be, dolgozzam fel, jelenítsem meg a

leggyakrabban használt ábrák és diagramok formájában, valamint értékeljem a kapott eredményeket, figyelembe véve az egyes motorok jellemző paramétereit (fog, pólus szám...). Emellett lehetőség szerint adjak javaslatot a mérési eljárás javítására.

Továbbá a távlati célok közt szerepelt az ok-okozati viszonyok feltárása is, a korábban már említett kormányrendszerekben terjedő zajrezgések jelútjában.

A feladatkiírásnak megfelelően a munkám során a mérőrendszer elemei közül a késsel jelzett blokkokat vizsgáltam meg közelebbről. Az egyik a mérés feldolgozását reprezentáló utófeldolgozás blokk, a másik pedig a mérési eljárás tervezésénél felhasznált vezérlés blokk.

A vezérlésnél megadhatjuk az inverter számára hogy milyen gerjesztőjelet hozzon létre a vizsgálandó motor számára. A mérések pontossága érdekében a motor először egy kalibrációs eljáráson esik át, melynek során kompenzálják az egyes fázisok amplitúdóját és szögét annak érdekében, hogy a motor tekercseiben indukálódott feszültségek megfeleljenek az előírásoknak, valamint, hogy a mezőgyengítés optimálisan végbemehessen (a mezőgyengítés fogalmáról a 3.1 fejezetben írok részletesebben). Ezt a kalibrációt figyelembe véve kell kiadni a vezérlő jeleket az inverter számára.

A motor tesztek során általában rpm (round per minute – fordulatszám) felfutás jellegű méréseket végeznek, annak érdekében, hogy a motor viselkedését minél szélesebb tartományon jellemezni tudják. A felfutás jellegét (pl.: lineáris), a végértékeket és a mérés időtartamát is itt lehet specifikálni.

Az utófeldolgozás részletes lépéseit a későbbi fejezetekben ismertetem részletesen, de ahhoz hogy ezt világosan és érthetően megtehessem, először is meg kell ismerkedni a mérés elméleti háttérével, a mért paraméterekkel és a felhasznált jelfeldolgozási módszerekkel.

3. Irodalomkutatás

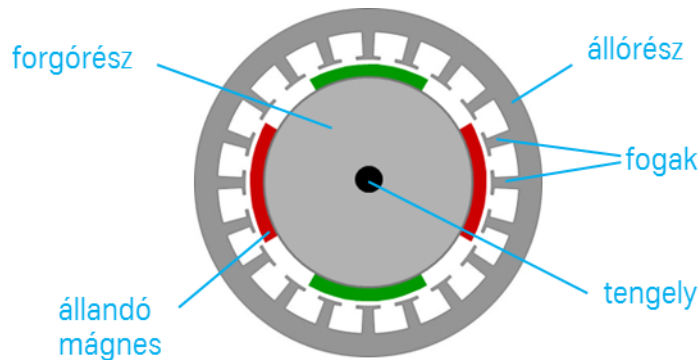
Ebben fejezetben bemutatom a motor azon működési mechanizmusait, melyek a zajrezgés vizsgálat szempontjából lényegesek. Emellett ismertetem azokat a mért paramétereket, melyek segítségével a cég a motorokat jellemzi.

Ezt követően megvizsgálom azokat a különböző jelfeldolgozási és megjelenítési módszereket, melyek segítségével a méréseket feldolgozzák és értelmezhető formában megjelenítik.

Végül röviden leírom azokat a cégnél jelen pillanatban használatos szoftvereket, melyek a bemutatott elvek alapján végzik a kiértékelést.

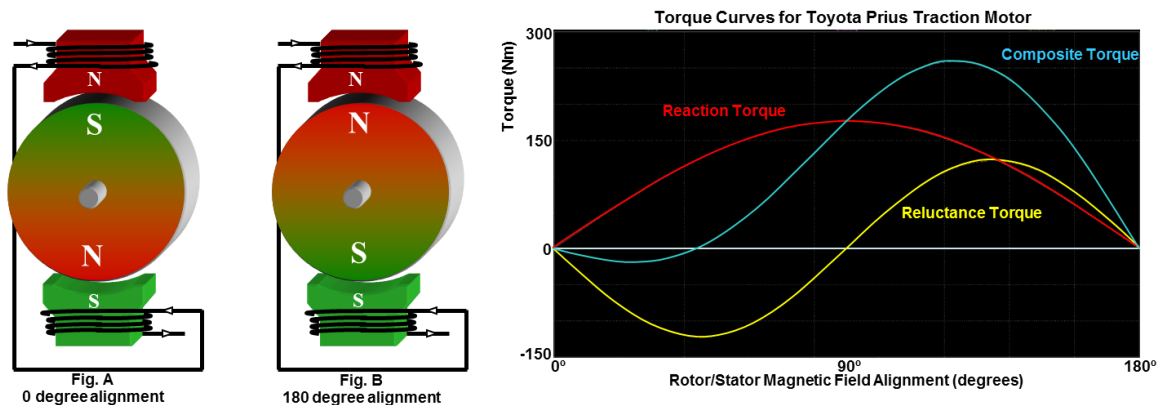
3.1. Elektromos szervomotorok működési elve

A kormányzársésegítő rendszerekben alkalmazott motorok elsősorban állandó mágneses, váltakozó áramú, szinkron motorok. Mivel az állandó mágnesek a forgórész felszínén helyezkednek el, így ezeket nevezik SPM (Surface Permanent Magnet) motroknak is.



3. ábra SPM motor felépítése

Az SPM motorokban az áram a motor tekercsein áthaladva mágneses teret hoz létre, mely kölcsönhatásba lép az állandó mágnesek terével, mely egy erőhatást, forgatónyomatékot eredményez. Ugyanakkor ez a forgatónyomaték több komponensből tevődik össze, melyek értéke nem állandó. Az egyik tisztán az álló- és forgórész mágnesek (vagy mágneses terek) közti kölcsönhatásból kialakuló nyomaték (reaction torque), a másik pedig a reluktancia nyomaték (reluctance torque), mely abból származik, hogy a mágneses mező próbálja minimalizálni a mágneses ellenállást (reluktanciát, mely a fluxus útjába esik). [6]



4. ábra Állandó mágnes motorok nyomatéka [6]

Ahogy az a fenti ábrán is látható a két végpontban, ahol az álló- és forgórész mezők pólusai egy egyenesre esnek, a nyomaték nulla lesz. A két nyomaték komponens maximumát pedig 90° és 45° , 135° kitérésnél találjuk. Természetesen ezek az értékek függenek a motorban levő pólusok és fogak számától is.

Mivel ezekben a motorokban állandó mágnesek vannak, így akkor is létrejön kölcsönhatás az álló- és forgórész között, ha nem folyik áram a tekercseken. Ezt a jelenséget nevezzük *coggingnak*. Ha a motor tengelyét kézzel, lassan elkezdjük forgatni, egyfajta „remegést” érzünk, mely az állandó mágnesek és a fogak kölcsönhatásából alakul ki.

A cogging jelensége főként alacsony fordulatszámon mutatkozik meg, és hullámosságot okoz a forgatónyomatékban – itt a nyomatékként a meghajtás nélkül motor tengelyének forgatásához szükséges nyomatékként értem. Természetesen a cogging hozzájárul a motor nyomatékhullámosságához is, viszont nagyobb sebesség esetén a forgórész tehetetlensége többnyire elfedi annak hatását.

Kormányzársésegítő rendszerek esetén fontos, hogy a nyomaték minél egyenletesebb legyen, hiszen az ingadozása közvetlenül érezhetővé válik a kormánykereket tartva. A nyomatékhullámosságnak nincsen pozitív hatása a rendszer viselkedésére nézve, így a cél, hogy ennek értékét minél inkább lecsökkentsük.

Az alábbi táblázat összefoglalja azokat a motortulajdonságokat és lehetséges hibákat melyek felharmonikusokat eredményeznek a motor nyomatékában. Az első oszlop a villamos, a második a mechanikai felharmonikus számát tartalmazza, ahol p jelöli a póluspárok számát (tehát az adott motor $2p$ pólusú), N_s a fogak száma (slot), az LCM pedig a legkisebb közös többszörös rövidítése (Least Common Multiple).

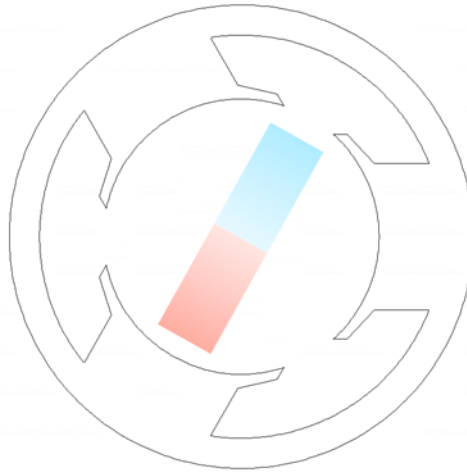
Electrical harmonic frequency [1/electrical_turn]	Motor harmonic frequency [1/turn]	Cause of harmonic order
$1/p$	1	Clutch misalignment error (usual)
$2/p$	2	Clutch misalignment error (less frequent)

$2/p$	2	Dynamic rotor imbalance
1	p	Fundamental electrical frequency
1	p	Current measurement algorithm (1-shunt)
1	p	Current measurement (offset error) (Hall)
$1 \pm 1/p$	$p \pm 1$	Rotor position sensor (with 2 magnet poles)
2	$2 \times p$	Misalignment of rotor against stator center line (excentricity)
2	$2 \times p$	Oval stator
2	$2 \times p$	Rotor tilt due to radial forces on the shaft
2	$2 \times p$	Unequal phase resistance, R_{imb}
2	$2 \times p$	Current measurement (gain error) (1-shunt)
$2 \pm 1/p$	$2 \times p \pm 1$	Rotor position sensor (with 2 magnet poles)
N_s/p	N_s	Run out of rotor / static rotor imbalance
N_s/p	N_s	Magnetic and/or mechanical tolerances of magnets
N_{Phase}	$N_{Phase} \times p$	Current measurement algorithm (1-shunt)
3	$3 \times p$	Triangular ovality
3	$3 \times p$	Third-harmonic modulation by the inverter
2×2	$(2 \times p) \times 2$	Over harmonic of above
4	$4 \times p$	Unequal phase resistance (over harmonic)
$(N_s \times 2)/p$	$N_s \times 2$	Over harmonic of above
$(LCM \text{ of } 2 \times p \text{ and } N_s) / p$	$LCM \text{ of } 2 \times p \text{ and } N_s$	Cogging base harmonic (CPMR)
$2 \times N_{Phase}$	$2 \times N_{Phase} \times p$	Protection (dead) time for the transistors
$2 \times N_{Phase}$	$2 \times N_{Phase} \times p$	3rd harmonic of the EMF in delta connection
8	$8 \times p$	Unequal phase resistance (over harmonic)
$2 (LCM \text{ of } 2 \times p \text{ and } N_s) / p$	$(LCM \text{ of } 2 \times p \text{ and } N_s) \times 2$	Over harmonic of cogging base harmonic

1. táblázat A nyomaték hullámosság összetevői [7]

Az egyik érdekes elem a táblázatban a *Cogging Base Harmonic (CPMR)* sor. Ez az összetevő az, mely a fizikai kialakításból adódóan, még tökéletes, hibátlan motorok esetén is jelentkezik. Oka a forgórész mágneses pólusainak és az állórész fogainak a kölcsönhatása.

Ezt a hatást könnyen megérthetjük, ha tekintünk egy egyszerű esetet, például egy 3/2-es motort (3 fog, 2 pólus, gyakorlatban nem használnak ilyen motorokat). Ha elképzeljük, hogy a mágnes az óramutató járásával megegyezően forog, akkor a pólusai az óramutató járásával ellentétes sorrendben érik el a fogakat. Egy fordulat hatszor (3 és 2 legkisebb közös többszöröse) fordul elő az, hogy valamely pólus egy fog fölé kerüljön, így ez a nyomatékban – ha az alapharmonikusnak a fordulatszámot tekintjük – hatos felharmonikust eredményez. Nyilván egy összetettebb (pl.: 12/10-es) motor esetén is ugyanez a folyamat játszódik le, némileg bonyolultabban.

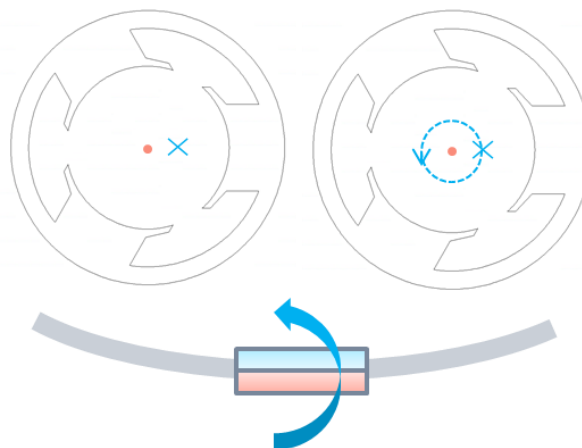


5. ábra elméleti 3/2-es motor

A nyomatékhullámosság többi összetevőjét jellemzően a motorhibák okozzák. Az egyik ilyen a statikus excentrikusság (táblázatban: *Misalignment of rotor against stator center line (eccentricity)*), ami azt jelenti, hogy a forgórész középpontja nem esik egybe az állórész középpontjával. Ennek hatását úgy tudjuk magyarázni, hogy a tengely eltolódása miatt lesz egy olyan fog, melyhez a forgórész a legközelebb lesz és a működés során fordulatonként minden pólus elhalad efelett a fog felett, így a pólusszámnak megfelelő felharmonikust eredményez.

Egy másik hibalehetőség, az állórész ovalitása, melyet az előbbi probléma inverzének tekinthetünk, és hasonló módon pólusszámmal megegyező felharmonikust okoz.

Gyakori még a tengely ferdeségéből származó hiba is, melynek hatására a forgórész középpontja egy kör alakú pályát fog leírni működés közben. Ezt hívjuk dinamikus excentricitásnak (táblázatban: *Run out of rotor / static rotor imbalance*). Ebben az esetben a forgórész egyik pólusa lesz közelebb az állórész fogaihoz, így fordulatonként minden fog felett elhaladva változik a nyomaték nagysága, így ez a fogszámnak megfelelő számú felharmonikust okoz.



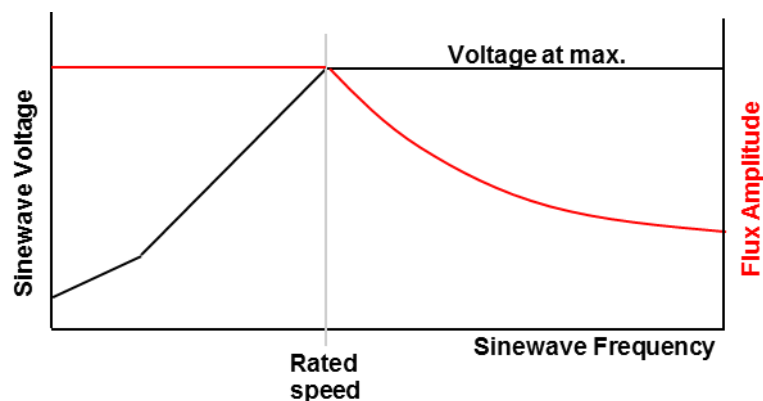
6. ábra motor hibák: statikus és dinamikus excentricitás

A motor mechanikai paraméterein kívül nyomatékhullámosságot eredményezhet még a meghajtás pontatlansága is: váltakozó áramon megjelenő DC offset, az egyes fázisok közti amplitúdóbeli eltérés stb.

A motorok szimulációs vizsgálata szempontjából mindegy, hogy a motort tekintjük ideálisnak és a meghajtásban szimuláljuk a hibát, vagy fordítva tesszük meg, hasonló viselkedést érhetünk el mindkét esetben. A valóságban természetesen mindkét hatás egyszerre jelentkezik.

A kormányzásrésegítő rendszerben a meghajtást az ECU vezérli. A vezérlő algoritmus – avagy a megvalósított szabályzó – szintén befolyásolja a nyomatékhullámosságot. Ugyanakkor van egy tervezett funkció is, mely a hatással van a nyomatékra, ez a mezőgyengítés. Mezőgyengítésre akkor van szükség, ha a motort a névleges sebességtartomány felett szeretnénk használni. A jelenség fizikai háttere a következő:

Ha egy hurok vezetőn áthaladó fluxus nagysága változik, az a vezetőben elektromotoros erőt (feszültség, back-EMF) indukál, melynek nagysága arányos a fluxus időbeli deriváltjával ($d\Phi/dt$). A motor gyorsulásakor a tekercsek – melyeket hasonló módon hurok vezetőként képzelhetünk el – gyorsabban haladnak át a fluxus vonalakon, így a fluxus változás nagysága ($d\Phi$) állandó marad, viszont a periódusidő (dt) egyre kisebb lesz. Ezáltal a tekercsekben indukált feszültség egyre nőni fog. Ez alapvetően egy pozitív tulajdonság, hiszen korlátozza a tekercseken átfolyó áram nagyságát. Ha ez nem lenne, a motor működése során folyamatosan az indító áramát venné fel. Viszont elérhetjük azt a sebességet, mellynél az indukált feszültség megegyezik a forrásfeszültséggel. Ezen a ponton a motor árama nulla lesz, így nem tud tovább gyorsulni. Ha mégis gyorsítani szeretnénk, akkor a $d\Phi/dt$ hányados értékét kell csökkentenünk. Természetesen dt értéke a fordulatszám függvénye, így a motort csak úgy tudjuk gyorsítani, ha a fluxust csökkentjük.



7. ábra Mezőgyengítés

Az ábra első szakaszán a fluxus, és így a nyomaték is konstans, majd a névleges sebesség felett a működés átvált állandó teljesítmény üzemmódba, melyen a feszültség lesz konstans. Ezt nevezzük mezőgyengítésnek.

A motor működése során nem csak a nyomaték változása okozhat rezgéseket, sőt gyakran várakozásink ellenére nyomaték hullámossága nem is hozható közvetlen kapcsolatba a motor házában mérhető – illetve a meghajtással továbbított – rezgésekkel. Annak érdekében, hogy a motor gerjesztéséről pontosabb képet kaphassunk gyorsulásmérő szenzorokkal, több irányban is mérjük a házon keletkező rezgéseket.

3.2. Felhasznált jelfeldolgozási módszerek

A motorok jellemzésére leggyakrabban használt paraméter a nyomatékhullámosság, vagy angolul ripple. Mint azt az előző fejezetben láthattuk, a nyomatékhullámosságnak nem csupán a nagysága hordoz lényegi információt, hanem az azt alkotó komponensek frekvenciája is fontos jelentőséggel bír. Annak érdekében, hogy ezeket vizsgálni tudjuk spektrum számítást kell alkalmaznunk.

3.2.1. Spektrum

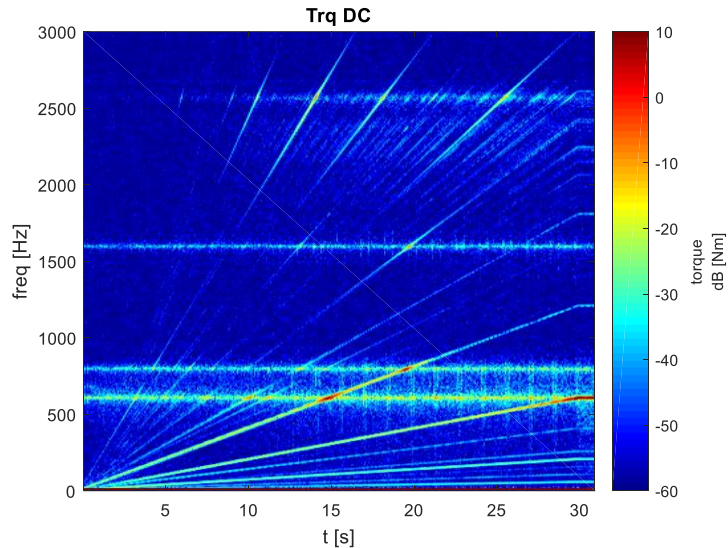
Minden periodikus jel előállítható szinuszos jelek összegeként. Azt, hogy ez a felbontás milyen amplitúdóval és fázissal tartalmazza a szinuszos komponenseket az ismert Fourier-transzformációval kaphatjuk meg. Ezt a véges mérési idő és véges mintavételi frekvencia miatt nem tudjuk alkalmazni, helyette a Discrete Fourier transform (DFT) használható.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

Ha ezen a komponensek – komplex együtthatók – amplitúdóit a frekvencia tengely mentén ábrázoljuk, megkapjuk a jel spektrumát. Zajrezgés mérések esetén gyakran használt a Decibel skála is, mely jobban reprezentálja a zaj „hangosság érzetét”.

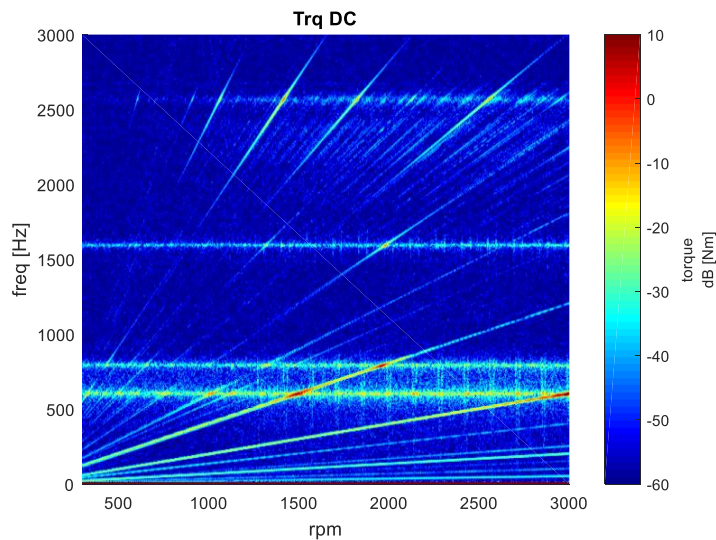
3.2.2. Spektrogram

A spektrogram a spektrum időbeli változásának vizuális reprezentációja. Ha a jelből adott mintaszámú ablakokat vágunk ki – gyakran átlapolódással – melyekre kiszámítjuk a spektrumot és ezen időpillanatokhoz tartozó ablakok spektrumát egymás mellé rajzoljuk, megkapjuk a spektrogramot.



8. ábra Spektrogram (nyomatékszenzor, lineáris rpm felfutás)

Természetesen az ablakok spektrumát az idő helyett a gerjesztő jel, vagyis a motor fordulatszáma függvényében is ábrázolhatjuk. Ezt az ábrázolási módot nevezzük Campbell-diagramnak (lineáris felfutás esetén természetesen nincs nagy különbség a kettő közt).



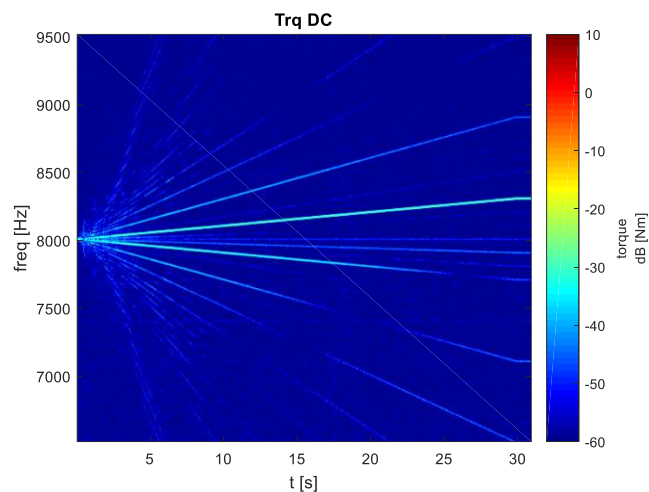
9. ábra Campbell-diagram (nyomatékszenzor, lineáris rpm felfutás)

Ez persze azt a feltételezést is maga után vonja, hogy az ablakokon belül a fordulatszámot állandónak tekintjük, mely az rpm felfutásos mérések esetén nem teljesül. Ábrázoláskor az ablak spektrumát csupán ablakon belüli átlagfordulatszámhoz tudjuk hozzárendelni. Az ablakon belül változó rpm a spektrum „elkenődését” okozza.

Az előző ábrát megvizsgálva látszik, hogy a gerjesztés frekvenciájának (fordulatszám) növekedésével egyre inkább nő az erre adott válasz felharmonikusainak frekvenciája is. Ezeket a láthatjuk origóból kiinduló egyenesek formájában. Az állandó frekvenciájú komponensek – vízszintes egyenesek – a rendszer rezonanciafrekvenciái, melyek minden gerjesztés esetén konstans frekvenciájú választ eredményeznek.

A rezonanciák oka főként a mechanikus szerkezet rugalmassága. Az egyes alkatrészeket úgy választották meg, hogy azok a lehető legmerevebb rendszert eredményezzék, de a mérésben még így is megjelennek a 600-700 Hz körüli frekvenciák – melyek mechanikai szempontból már magasnak tekinthetők. Ennél merevebb rendszert nehéz tervezni. Hiába az erős, merev felfogatás, a rövid és vastag tengelyek, a nyomatékszenzor például mindig rendelkezni fog egy minimális rugalmassággal.

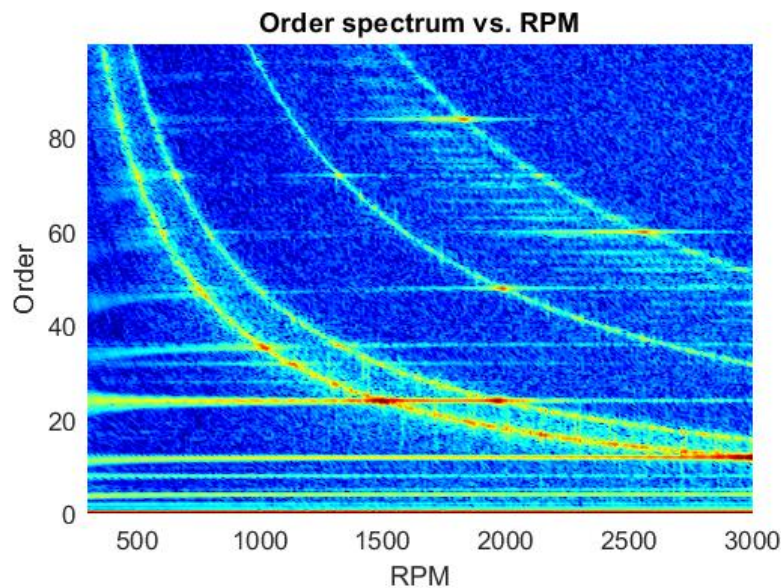
Mindemellett magasabb frekvenciatartományban még megjelenik a spektrogramban az impulzus-szélesség modulációból eredő zaj is.



10. ábra A PWM modulációból származó zaj

3.2.3. Order

Annak érdekében, hogy könnyebben nyomon lehessen követni az adott felharmonikusokat bevett szokás a frekvencia értékeket az aktuális fordulatszámmal leosztani. Ezeket a felharmonikusokat – melyek a motor fordulatszámának többszörösei – nevezik ordereknek is, vagy magyarul rendszámoknak, melyek az ábrán vízszintes egyeneseként jelennek meg.



11. ábra Order spektrum (változó méretű DFT, nyomatékszenzor, lineáris rpm felfutás)

Ha az rpm felfutás lineáris, akkor a fordulatszámmal való leosztás hatására a konstans rezonanciafrekvenciákból hiperbolikus lecsengés ($const \cdot 1/x$) lesz (az order spektrum természetesen ábrázolható az idő függvényében is).

Az order spektrum kiszámításának különböző módjai léteznek. Én ebből kettőt fogok részletesebben megnézni: a változó méretű DFT és a pozíciófüggő újramintavételezés algoritmusát.

3.2.3.1. Változó ablakméretű DFT

Az order spektrum kiszámítása során a jelet ablakozva, kisebb egységekben dolgozzuk fel. Annak érdekében, hogy az egyes ablakokra kiszámított spektrum order-felbontása megegyezzen, a frekvenciafelbontásnak eltérőnek kell lennie, hiszen a fordulatszám függvénye, hogy az egyes orderekhez tartozó frekvenciák mennyire lesznek közel egymáshoz. Eltérő frekvenciafelbontást pedig eltérő ablakmérettel tudunk számolni, hiszen ha N a minták száma, akkor a DFT felbontása:

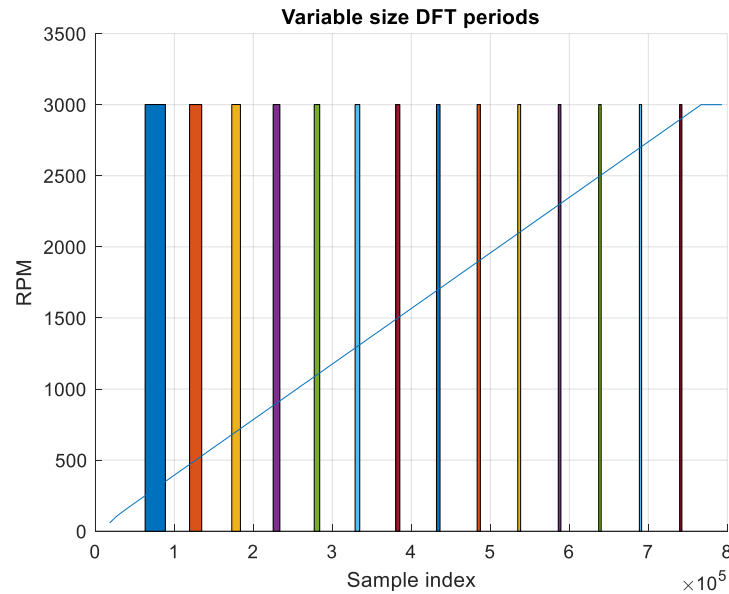
$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2)$$

Másként megközelítve a dolgot, a motorok működésük során bizonyos zajkomponenseket adott szögállás mellett bocsátanak ki, melyek fordulatonként ismétlődnek és így harmonikus komponenseket okoznak a spektrumban. A koherens mintavételezés érdekében fontos, hogy a kivágott ablak (legalább egy) egész számú periódust tartalmazzon. Így ha például a fordulatszám kicsi, akkor egy fordulathoz tartozó

idő-ablak mérete jóval nagyobb lesz mint nagy fordulatszám esetén. Az ablakok méretét az alábbi képlettel határozhatjuk meg:

$$\Delta T = \frac{60}{rpm * o_r} \quad (3)$$

ahol o_r az order felbontás. Mint látható az order felbontás fordítottan arányos az ablakmérettel, tehát minél finomabb felbontást szeretnénk, annál több fordulatot szükséges mintavételeznünk.



12. ábra Egy fordulathoz tartozó, csökkenő méretű ablakok

A változó hosszúságú DFT azt feltételezi, hogy az ablakon belül a jel frekvenciája állandó, ami felfutásos mérések esetén nem teljesül. A hosszú időablakban nagyobb lesz a fordulatszám megváltozás, mint a rövid ablak esetén, így a spektrum alacsony fordulatszámokon jobban el fog kenődni (kiszélesednek az orderek), ahogy ez jól megfigyelhető a 11. ábra képen.

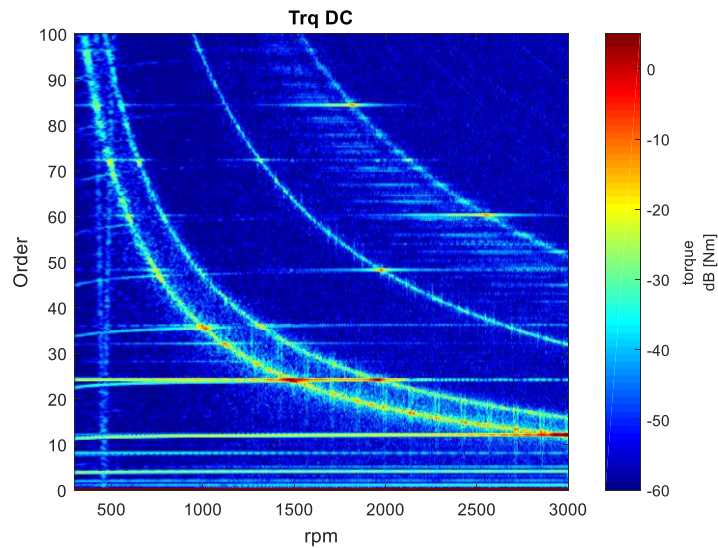
3.2.3.2. Pozíciófüggő újramintavételezés

Mint azt láthattuk, annak érdekében, hogy az order felbontás állandó maradjon, a spektrum frekvencia felbontását kellett megváltoztatni. Ezt a változó méretű DFT úgy oldotta meg, hogy a (2) egyenletnek megfelelően változtatta az N mintaszámot. Ugyanezt a hatást úgy is elérhetjük, hogy a mintaszámot állandónak vesszük és az f_s mintavételi frekvenciát módosítjuk. Így működik a pozíciófüggő újramintavételezés módszere.

Az rpm információ, vagy pontosabban, ennek deriváltja a pozíció függvényében mintavételezett jel mintái nem időben, hanem forgási szögben lesznek ekvidisztánsak. Ha ezeken a mintákon végezzük el a Fourier-transzformációt, közvetlenül order spektrumot kapunk.

Mivel a mintavételi frekvenciát változtatjuk, így egy állandó méretű ablakkal végezhetjük a jel feldolgozását, melynek méretét a kívánt order felbontás és az újramintavételezés gyakorisága együtt határozza meg.

A pozíciófüggő újramintavételezés módszere különösen hasznos, ha a mérés során gyorsan változik az rpm jel, nagy order felbontásra van szükségünk vagy magas rendszámú ordereket szeretnénk megvizsgálni. Az újramintavételezés miatt ennek a módszernek jóval nagyobb a számításigénye, mint a változó ablakhosszú DFT-nek.



13. ábra Order spektrum (pozíciófüggő újramintavételezés, nyomaték szenzor, lineáris rpm felfutás)

3.2.4. Jelszint számítás

A jelszint – vagy angolul level – a jel amplitúdójának reprezentációja. Időben változó jeleknél általában egy átlagértékkel szokás jellemezni, például négyzetes középértékkel (RMS), így a jel amplitúdójában bekövetkező változások könnyen nyomon követhetők.

Az amplitúdó értékek jellemzésekor is gyakran használt a Decibel skála. A pillanatnyi érték meghatározására alkalmazható képlet:

$$X(t) = 10 \cdot \log \left(\frac{x(t)}{x_0} \right)^2 \text{ dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{x(t)}{x_0} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

A jelszint reprezentációt ezen értékek átlagolásával kaphatjuk meg. Az alábbi képletben használt, integrálon belüli exponenciális átlagolás lényegében egy aluláteresztő szűrést eredményez. Ennek a szűrőnek az időállandója ipari standard szerint (DIN EN 61672:2014-07) lehet:

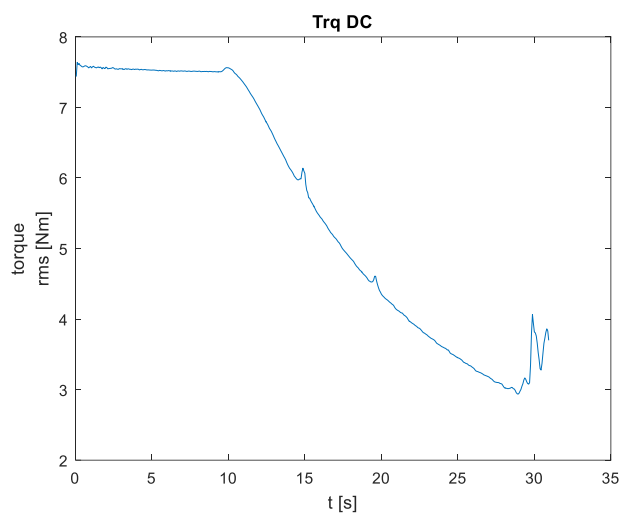
* gyors – fast: *125 ms*

* lassú – slow: 1 s

A level számítás módja:

$$X(t) = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{-\infty}^t \left(\frac{x(\tau)}{x_0} \right)^2 \cdot e^{-\frac{t-\tau}{T}} d\tau \right] \quad (5)$$

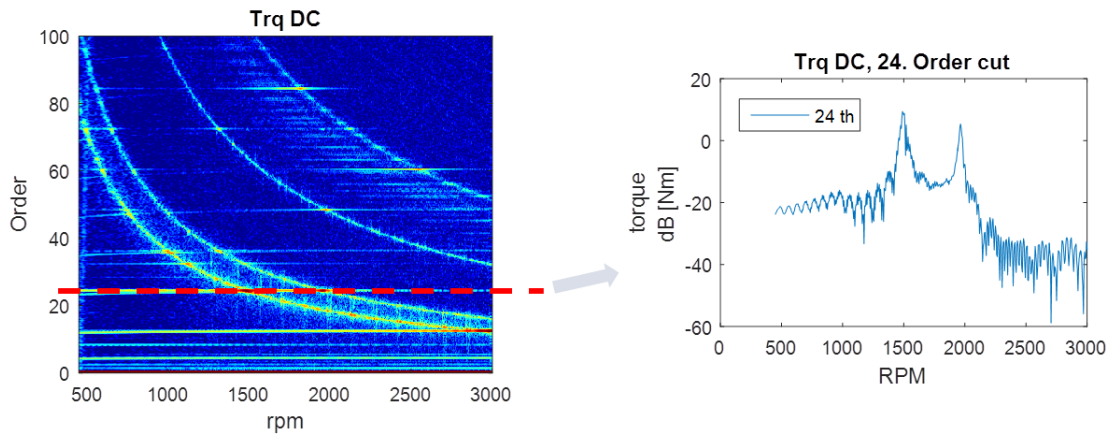
Természetesen a level értékeket az idő és a fordulatszám függvényében is meg tudjuk határozni. A lineáris felfutás vizsgálatokor viszont ez a két ábra igen hasonló lesz.



14. ábra Level vs time (nyomaték)

3.2.5. Order cut

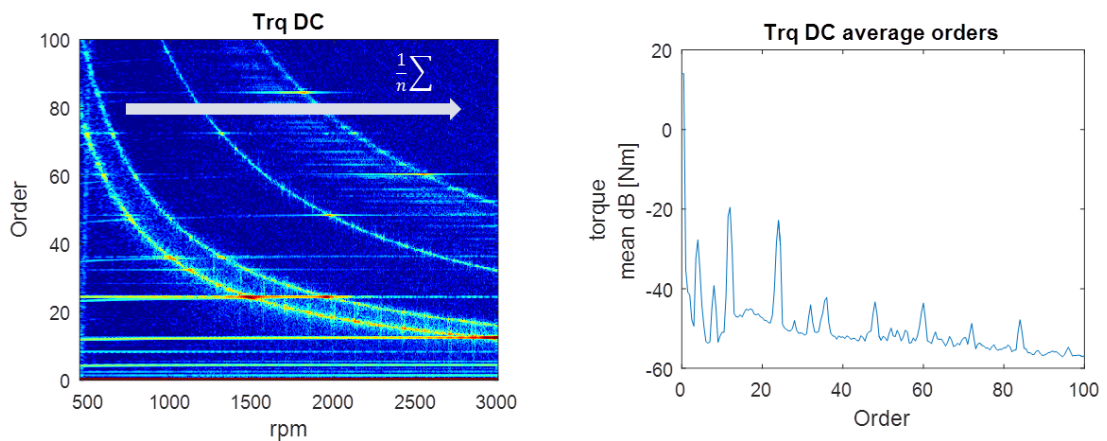
Az egyes orderek amplitúdóinak idő- vagy fordulatszám-beli változásának követésére használják az order cut diagramot. Ez lényegében a spektrogram egyes felharmonikusainak kivágását jelenti. Ez könnyedén megtehető az order spektrum esetén, hiszen itt a felharmonikusok egyszerűen vízszintes egyenesek.



15. ábra Order cut (nyomaték, 24. order)

3.2.6. Averaged order

Ha az egyes orderek amplitúdó viszonyait szeretnénk meghatározni, alkalmazhatjuk az averaged order számítást. Ez az előző order cut módszerhez hasonlóan az order spektrumból indul ki, de nem csupán egy felharmonikust vág ki, hanem az idő- vagy fordulatszám tengely mentén átlagolja az összes ordert, így megkapjuk az átlagos felharmonikus tartalmat. Természetesen az átlagolás ebben az esetben is többféle módon is történhet: számtani közép, RMS, stb. A kapott ábra order felbontását a kiszámított spektrogram order felbontása fogja meghatározni.



16. ábra Averaged order (nyomaték)

3.3. Létező szoftverek bemutatása

Az elkövetkezendőkben bemutatom azokat a szoftvereket, melyeket a cég a diplomamunka írásának idejékor, a mérések feldolgozására és kiértékelésére használt.

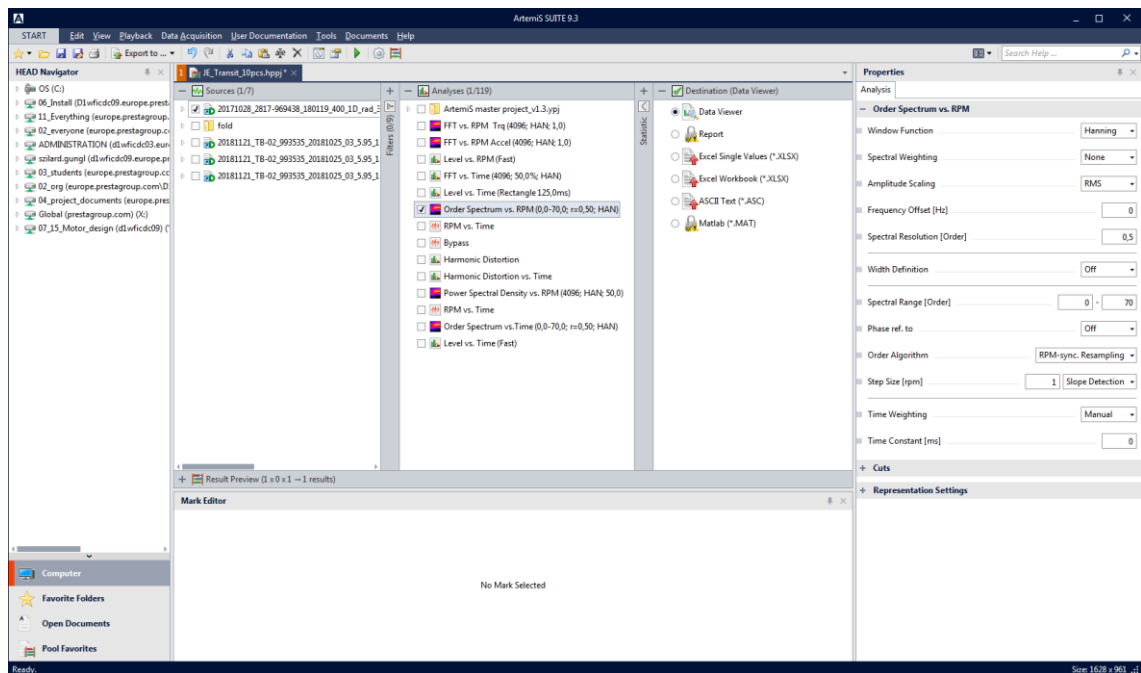
3.3.1. ArtemiS SUITE

Az NVH (Noise Vibration Harshness), azaz zajrezgés analízis piacának egyik legmeghatározóbb alakja a HEAD Acoustics, akinek ArtemiS SUITE nevű programja most is használatban van a cégnél. Lényegében a diplomamunka első része ennek a szoftvernek a kiváltására irányult.

Az programban implementálásra került a korábban ismertetett jelfeldolgozási és megjelenítési eljárások mellett még megannyi egyéb funkció is, ami jelen felhasználás szempontjából kevésbé lényeges.

Azért tartom fontosnak a szoftver egyes funkcióinak megemlítését, mivel a saját alkalmazásom elkészítésekor is ezek szolgáltatták a támpontokat, valamint az egyes jelfeldolgozási módszerek tesztelésekor is nagy segítség volt, hiszen ez egy (többé-kevésbé) validált eszköznek tekinthető.

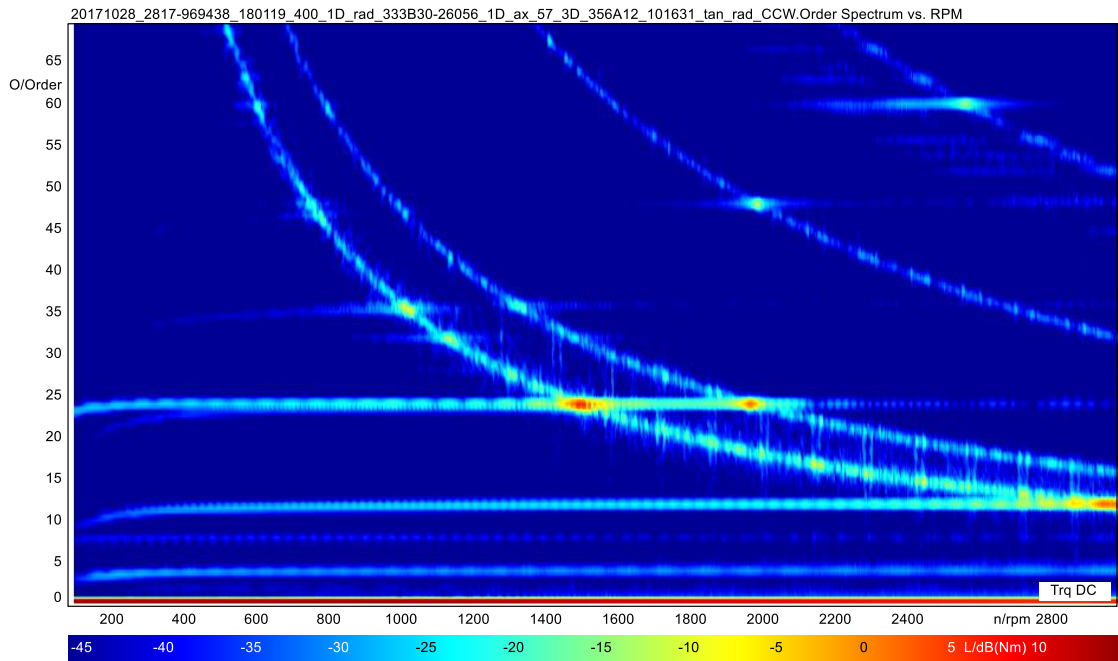
Funkcionalitás szempontjából a legfontosabb a képernyő közepén található három, listákat tartalmazó doboz. A bal oldali (a *Sources* fül alatt) tartalmazza a projekthez hozzáadott fájlokat, a középsőben (*Analyses*) kiválasztható az elvégezni kívánt analízis, végül a jobb oldali dobozban (*Destination*) pedig azt lehet specifikálni, hogy az elkészített ábrákat milyen formában jelenítse meg, vagy exportálja a program.



17. ábra Az ArtemiS SUITE képernyőképe

A jobb oldalon levő menüben egy-egy kiválasztott elem (fájl, analízis, export) tulajdonságait tudjuk megváltoztatni. Természetesen a kívánt formában beállított analízisüket el is tudjuk menteni, ezek listáját tartalmazza a középső *Analyses* doboz.

Egyszerre akár több fájlt, analízis és akár kimeneti formátumot is választhatunk, melyeket a program automatikusan kezelni fog, így akár batch-szerű végrehajtással fel tudunk dolgozni nagy számú fájlt.



18. ábra Az ArtemisSUITE által kiszámított order spektrum

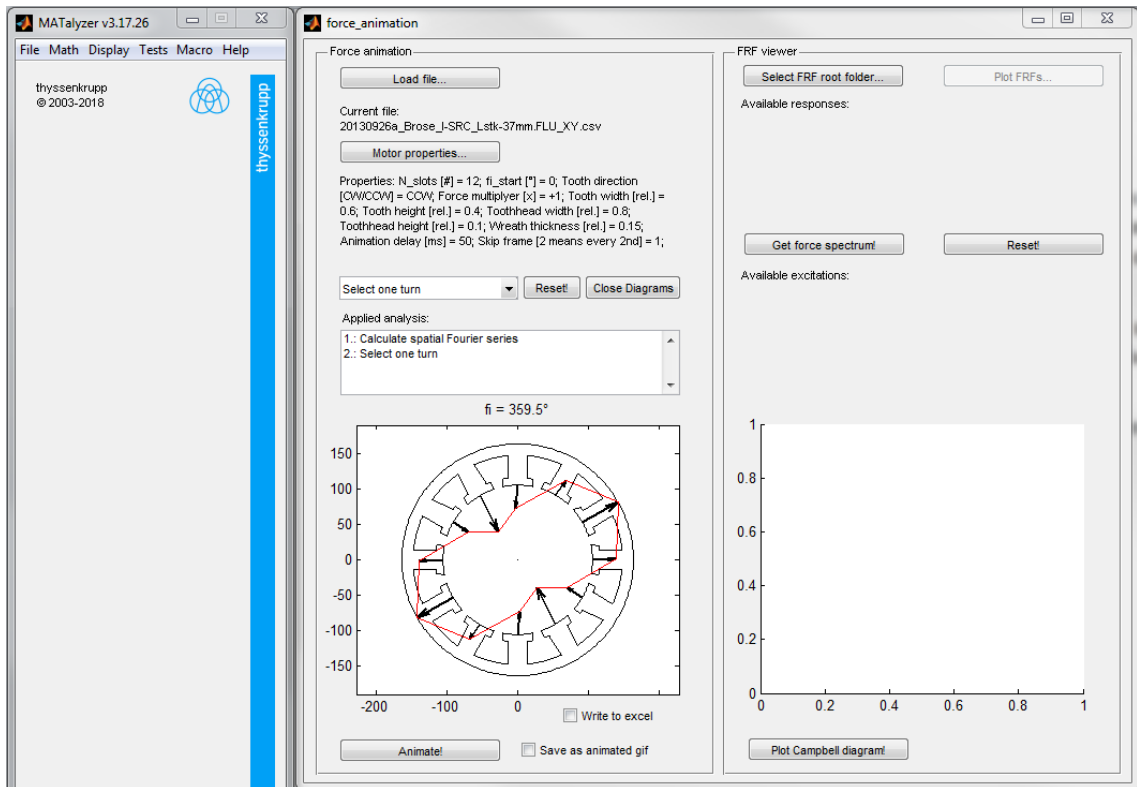
3.3.2. MATalyzer

A MATalyzer egy belső, céges fejlesztésű szoftver, mely számos felhasználás-specifikus funkciót tartalmaz. Az alkalmazás alapja egy MATLAB futtató környezetet (MATLAB runtime environment v7.11), melynek segítségével képes előre megírt és lefordított MATLAB programokat végrehajtani.

A program már most is képes általános jellegű jelfeldolgozásra (DFT, szűrők stb.) de csak specifikus fájlformátumokat tud beolvasni, illetve ezeket nem lehet összetettebb számításokhoz (pl.: order számítás) kombináltan használni.

A cég elképzelése az volt, hogy az általam készített MATLAB program ebbe a környezetbe legyen plug-in formájában implementálva, így a cég dolgozói számára elérhető és könnyen használható a mérések kiértékelésére.

Az alábbi ábrán láthatjuk a MATalyzer felületét, valamint egy megnyitott plugint.



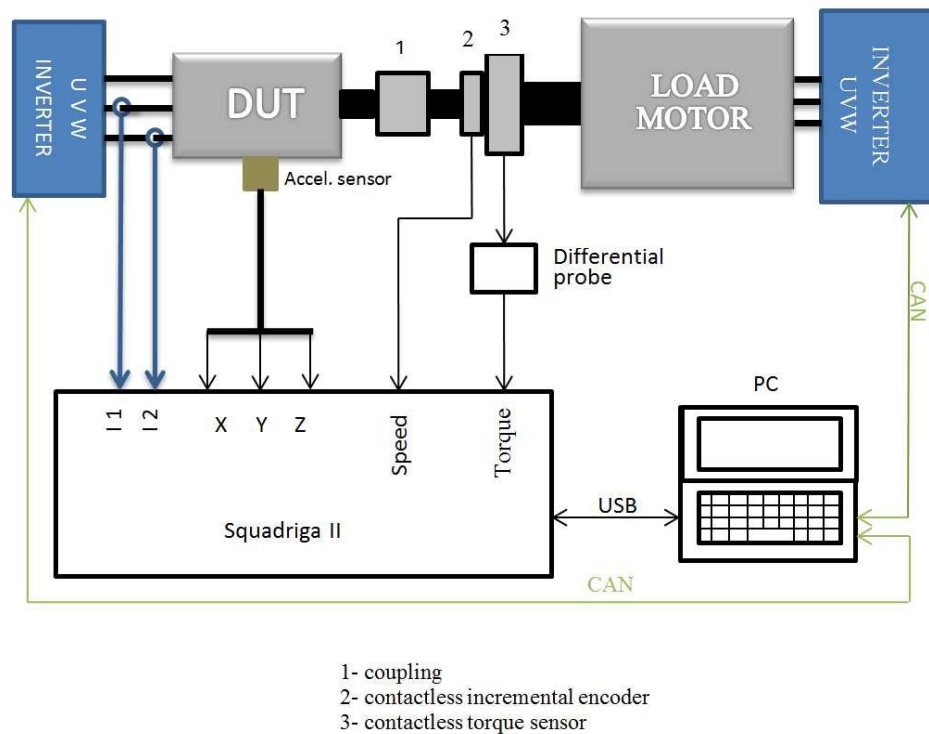
19. ábra MATalyzer (bal ablak) és a Force Animation plug-in (jobb ablak)

4. Felhasznált eszközök

Ebben a fejezetben bemutatom a motorok vizsgálatához kifejlesztett mérőrendszer felépítését, valamint a méréshez felhasznált hardver és szoftver eszközöket.

4.1. Hardver

A motorok teszteléséhez használt mérési elrendezés meglehetősen összetett. A választott eszközök típusa és az elrendezésük hosszas mérnöki fejlesztés és tapasztalatszerzés útján alakult ki. Az alábbi ábrán láthatjuk a 2. fejezetben ismertetett blokkdiagram részletesebb megfelelőjét.



20. ábra A mérési elrendezés

Az ábrán két motort is láthatunk: az egyik a *DUT* feliratú, ami a Device Under Test, vagyis a tesztelés alatt álló eszköz rövidítése; a másik pedig a *LOAD MOTOR*, ami a kívánt terhelést biztosítja a motor mérés során. Az egyes motorok vezérlését, illetve az adatok tárolását, majd azok utólagos feldolgozását egy különálló PC végzi.

Az ábra alján megjelenített adatgyűjtő egység egy Squadriga II, ugyancsak a HEAD Acoustics terméke. Ez az eszköz képes analóg csatornákat egyszerre, vagy különböző frekvenciákon, egymáshoz képest szinkronban is mintavételezni, továbbá csatlakoztatható hozzá enkóder, képes CAN, USB kommunikációra, önálló vagy PC-re továbbított adatrögzítésre stb.



21. ábra Suadriga II [8]

A 20. ábra blokkdiagramján látható, hogy 4 különféle jel rögzítése történik egy időben. Balról jobbra haladva az első a fázisáram mérése, mely árammérő lakatfogóval történik. Ez jellemzően ellenőrzési célokat szolgál, hogy tényleg az előírt áram folyik-e a tekercseken, illetve hogy ez az ideálistól mennyire tér el (offset, gain hiba). A következő a házon található három irányú (triax) gyorsulásérzékelő jele, mely három külön csatornán kerül eltárolásra. Ezt követi az inkrementális enkóder, majd végül a kontaktus nélküli nyomatékszenzor.

A motorok meghajtását Lenze 9400-as típusú szervo inverterek végzik. Ezeket az eszközöket CAN buszon elküldött parancsokkal lehet vezérelni, melyek hatására az eszköz automatikusan szabályozza a fázisáramokat (mezőorientált szabályzás, mezőgyengítés). Az egyik kényelmes funkciója, hogy képes automatikus lineáris felfutást generálni a kezdő és végértékek, valamint a meredekség ismeretében.

A vizsgálandó motor az ábrán 1. számmal jelölt tengelykapcsolón keresztül csatlakozik a fékezőmotorhoz, melyre mechanikai megfontolások miatt van szükség. Az egytengelyűség és szöghiba túrés miatt fontos, hogy a tengelykapcsoló kellően rugalmas legyen, ugyanakkor a mérés szempontjából viszont kellően merevnek kell lennie, hiszen a rugalmas csatolás további rezonanciafrekvenciákat eredményezhet, valamint aluláteresztő hatása van a nyomaték vizsgálatokor is. A mérések során precíziós, acél harmonika tengelykapcsolókat használnak.



22. ábra Acél harmonika tengelykapcsoló [9]

A házrengések vizsgálatakor fontos tényező, hogy a fogakhoz képest hol helyezkedik el a szenzor, mivel a különböző pozíciókban elhelyezett szenzorok eltérő gyorsulásértékeket mérhetnek. A céges standard szerint a szenzort a fogak közepén kell elhelyezni, a motor végétől (pajzs) megfelelő távolságban. Az felhelyezést 3D nyomtatott pozícionáló elemek segítik a különböző motoroknál.

4.2. Szoftver

A Squadriga II adatgyűjtő USB kapcsolaton keresztül kommunikál a PC-vel. A PC-n az ArtemiS SUITE-en keresztül lehet kezelni a beállításokat, illetve ennek egy elemével, a HEAD recorder modul segítségével tudjuk az adatokat közvetlenül a PC-re menteni.

Ezek után nem meglepő, hogy a mért adatokat egy önálló, HEAD eszközök által kezelt formában menti el a szoftver. A mért adatok mellett tárolja a csatornákra jellemző paramétereket (fizikai mennyiség, mértékegység, skálázó tényezők stb.), a felhasználó által specifikált adatokat, valamint a mérése jellemző egyéb metaadatokat.

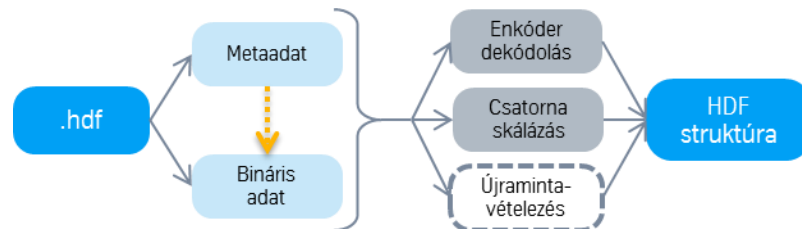
A következő fejezetben megvizsgálom, hogy ennek a létrehozott mérési fájlnak pontosan milyen szerkezete van, illetve milyen módon lehet beolvasni, a nyers adatokat feldolgozni (enkóder) és a mérést értelmezhető formában kiértékelni.

5. Megvalósított szoftver

A feladatkiírásban leírtak alapján a munka egyik nagyobb egysége a felvevőszoftver által generált fájl beolvasására képes alkalmazás elkészítése volt, mely a beolvasáson túl az adatok feldolgozására, kiértékelésére és megjelenítésére is alkalmas. Ebben a fejezetben az elkészült program fontosabb működési egységeit, valamint a jelfeldolgozási módszerek implementációit fogom bemutatni részletesebben.

5.1. Beolvasó komponens

A HEAD Acoustics eszközeivel készített mérések kimeneti fájlformátuma egy sajátos struktúrájú, *.hdf* (HEAD Data Format) kiterjesztésű állomány. A fájl két nagyobb részből áll: az első egy leíró jellegű, szöveges szakasz, mely metaadatokat (adatleíró adatokat) tartalmaz; a fájl második fele pedig a felvett csatornák jelét tartalmazza tisztán bináris formában. A beolvasás fontosabb lépéseit az alábbi ábra foglalja össze.



23. ábra A HDF fájl beolvasásának folyamata

A szöveges rész a csatornákra vonatkozó specifikus információkat, kalibrációs adatokat, illetve a méréshez tartozó általános paramétereket tárolja. Az információ név-érték formában van strukturálva, így akár szemmel is könnyen olvasható.

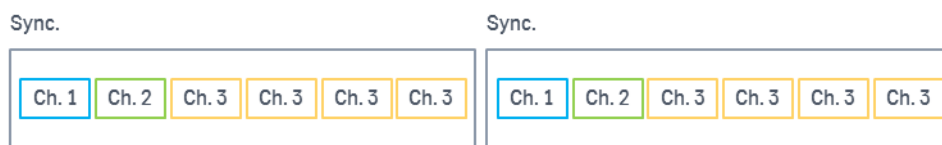
channel definition:	1
name str:	Trq DC
abbreviation str:	
title str:	In3
;#moniker:	Audio.Decoded
physical channel nbr:	0
;#group:	256
ch sort:	all data
physical quantity:	torque
physical unit:	Nm
emphasis:	False
calibration:	27.9794
delta_headroom:	0
;#dB reference:	1
quantisation func:	linear
composition:	sample
implementation type:	FLOAT32
graph style:	curve

A beolvasás során először is a fájlleíró adatokat kell feldolgozni, hiszen ez fogja meghatározni, hogy milyen formátumban, sorrendben, hosszúságban kell beolvasni a bináris adatokat.

Az egyes címkék megkeresését, és az azokat követő információ kiolvasását *regex()* függvény segítségével valósítottam meg. Ez lehetővé teszi, hogy bizonyos reguláris kifejezésekkel leírható mintákat keressünk a szövegben. Különösen hasznos például ha változó hosszúságú, vagy több szóból álló kifejezéseket kell olvasnunk, vagy bizonytalan számú szóköz karaktert kell figyelmen kívül hagyni.

A kinyert információt felhasználva (bináris adatok kezdete, hossza, sorrendje, formátuma stb.), az *fread()* függvény segítségével olvastam be a teljes bináris részt. Fontos, hogy az I/O művelet megszakítás nélkül futhasson le (ne *for* ciklusban), hiszen a nagy méretű fájlok beolvasásakor – mint például a 30 MB körüli méretű mérés fájlok – ez jelentősen növeli a futásidőt.

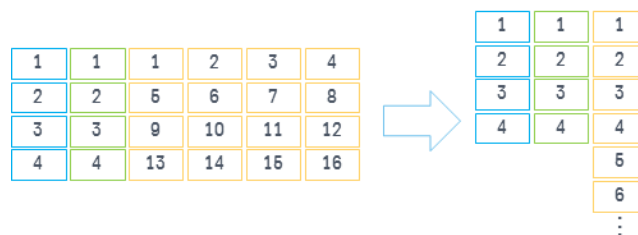
A bináris állományban az adatok keretekbe rendezve vannak egymás után eltárolva. A keret jelenti az egyes csatornák közti szinkronizálási pontot.



24. ábra Keretes adatstruktúra

A kereten belül egy adott csatorna első mintája a közös mintavételi pontra esik, majd a kereten belül eltérő számú minta tartozhat az egyes csatornához, ami összességében eltérő mintavételi frekvenciát jelent.

A beolvasás során ezeket a kereteket olvassuk be, melynek eredményeként egy mátrixba rendezve kapjuk meg az értékeket. Ezt követően a mátrix oszlopait sorrendhelyesen kell összefésülni, hogy megkapjuk a valós csatorna adatokat.



25. ábra Összefésült oszlopok

Az ArtemiS SUITE standard működése szerint minden csatorna adatát a legmagasabb mintavételi frekvenciára interpolálja fel, így én is ezt a gyakorlatot követtem. Az interpolálást a beépített *resample()* függvénnyel végeztem, mely a hagyományos interpolációs algoritmust valósítja meg: nullák beszúrása a minták közé; aluláteresztő szűrés (FIR); minták eldobása (amennyiben szükséges).

Persze ha az adatgyűjtőt szimultán, a csatornák egyidejű mintavételezésére állítottuk be, akkor erre nincs szükség.

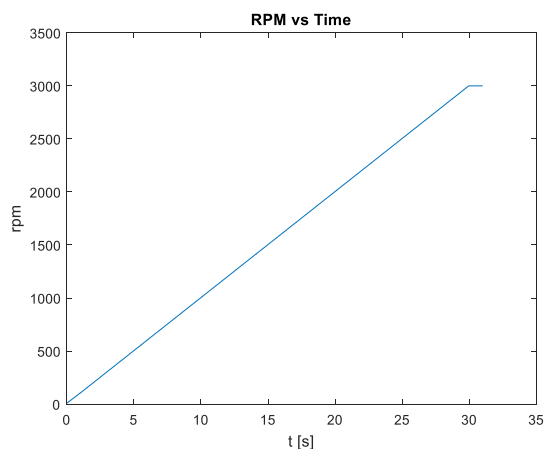
A másik fontos lépés az enkóder dekódolása. Az inkrementális jeladó adata bitenként kezelendő, ugyanakkor az adatok jellemzően nagyobb ($4 \cdot 8 = 32$ bites) egységekben vannak a bináris állományban tárolva. Emellett még fennállhat az a lehetőség is, hogy egy kereten belül több ilyen enkóderhez tartozó egység is szerepel.

Az általam vizsgált fájlok esetén az adatok jellemzően 32 bites, előjel nélküli egészként voltak tárolva, keretenként 2 darab. Ezeket az előbb ismertetett módon összefűztem egy vektorba, majd a számokat szétdaraboltam 8 bites, előjel nélküli egészekre. Végül ezeket egy lookup table segítségével 8 darab 0 vagy 1 értékű számokká konvertáltam. Ezek formátuma ugyancsak 8 bites előjel nélküli egész, hiszen ennél kisebb egységekben a MATLAB nem is tud adatot tárolni (az egy bites szám is 8 biten tárolódik), valamint a számítás sebessége szempontjából is előnyös, ha a processzor 8 bites számokkal dolgozik.

A lookup table ugyancsak a végrehajtás gyorsítását szolgálja, hiszen a többi csatornához képest 64-szer gyakrabban mintavételezett enkóder jel feldolgozása más módokon, igen időigényes lenne (kb. 50 millió enkóder bit feldolgozása szükséges).

A bináris jelből a *diff()* különbségképző függvény segítségével kiszámítottam egy olyan vektort, mely mindenhol nulla, kivéve a felfutó élek pozícióiban – hiszen a bemenet előjel nélküli egész, így a függvény kimenete is az lesz, ezáltal a lefutó éleknél -1 helyett nullát kapunk. Majd a *find()* függvénnyel pedig kinyertem a nem nulla elemek, vagyis a felfutó élek indexeit.

Ezután már számos lehetőség áll előttünk. Az egyik, hogy az enkóder felbontását ismerve, a felfutó élek közti periódusidőkből kiszámítjuk a kvázipillanatnyi fordulatszámot, majd ezt az erősen zajos jelet szűrjük valamilyen módszerrel (aluláteresztő, mozgóátlag stb.). A másik lehetőség, hogy az átlagperiódusidőből számítunk fordulatszámot. Én ezt a megoldást választottam egyszerűségéből adódóan. Az enkóder felbontásának megfelelő (a mérések során használt enkóder esetében 1024) periódus átlagolásával az enkóder pontatlanságából eredő hibákat is valamelyest csökkenteni tudjuk.



26. ábra Fordulatszám felfutás (0-3000 rpm)

A beolvasott és feldolgozott értékeket egy struktúra formájában tárolom el. A struktúra szerkezete többnyire megegyezik az ArtemiS SUITE által exportált MATLAB-bal kompatibilis formátum struktúrájával.

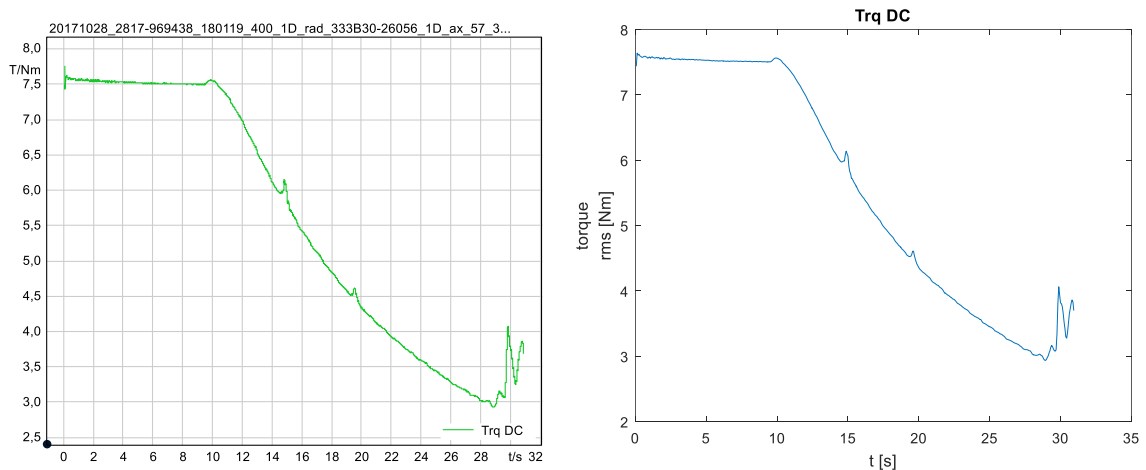
5.2. Jelfeldolgozó komponens

A kiértékelést és megjelenítést végző függvények a 3.2 fejezetben ismertetett jelfeldolgozási eljárások implementációi.

5.2.1. Jelszint (Level)

Az általam megvalósított jelszint algoritmus nem egyezik meg precízen a (5) képletben leírt számítási móddal. Az exponenciális átlagolás helyett egyszerűen csak csúszóablakos RMS számítással határozom meg az aktuális jelszint értékét. Ez a módszer hatását tekintve közel azonos a képletben megfogalmazott eljárással. Az eredményt összevetve az ArtemiS SUITE számításával, szinte megegyező ábrákat kapunk.

Ha a level értékeket a fordulatszám függvényében szeretnénk megkapni, akkor egyszerűen egy olyan ablakot kell definiálnunk melyen belül az átlagfordulatszám megegyezik a kívánt értékkel, majd erre hasonló módon kiszámítjuk az RMS értéket. Lineáris fordulatszám-felfutás esetén az időbeli és a fordulatszám-beli görbe közt nem lesz jelentős eltérés.



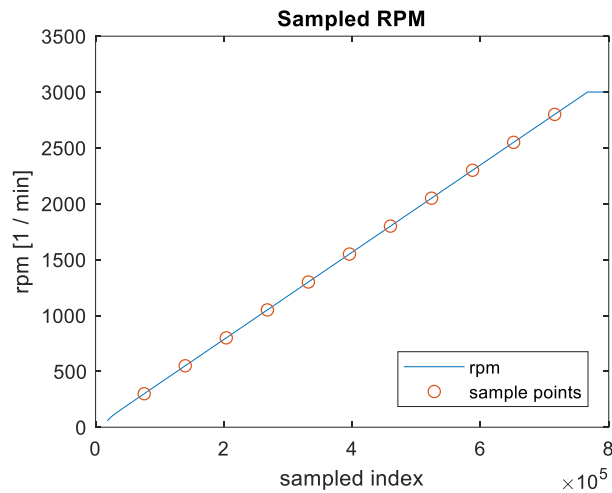
27. ábra Level vs. Time (fast)
(ArtemiS SUITE: bal, saját program: jobb)

5.2.2. Spektrogram

A spektrogram számítás során nem a beépített MATLAB függvényt használtam, mivel ez ugyan kényelmes megoldás arra, hogy megkapjuk a spektrogramot az idő

függvényében, ugyanakkor ha azt a fordulatszám mentén szeretnénk kiszámolni, akkor már nem használható.

A spektrogramot a jelszinthez hasonlóan ablakozással számítottam ki, majd az ablakok spektrumát egy mátrixban tároltam el, melyet a *surf()* vagy az *imagesc()* MATLAB függvénnyel jelenítettem meg. A fordulatszám függő Campbell-diagram kiszámítása során először „mintavételeztem” a fordulatszám jelét a kívánt felbontással, majd a mintavételezett pontok körül definiáltam ablakokat a vizsgálandó jelben.



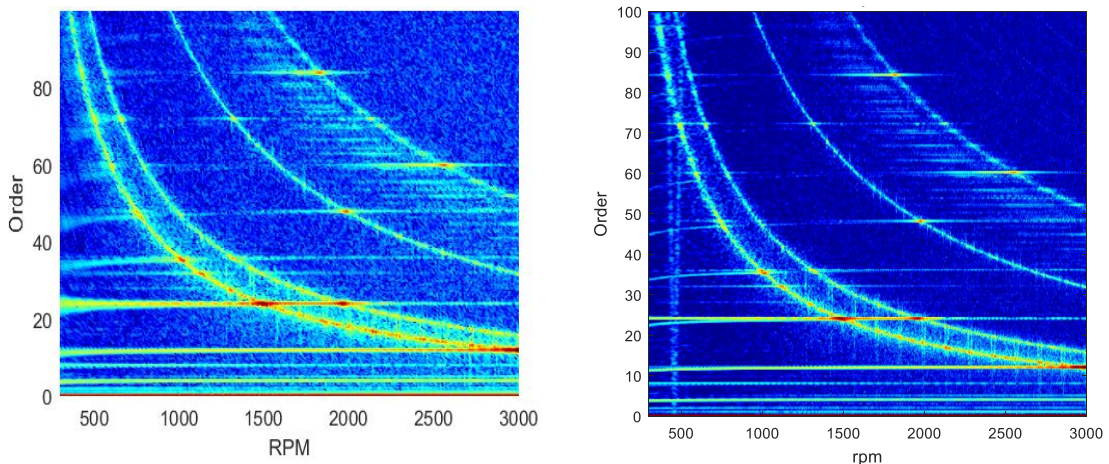
28. ábra Mintavételezett rpm felfutás

5.2.3. Order spektrum (RPM sync)

A korábban ismertetett módszerek közül mind a kettőt implementáltam. A változó méretű DFT algoritmus megvalósítása során követtem a definíció szerinti ablakméret kiszámításának módját, mely ablakokat a kívánt rpm mintavételi pontok körül vettem fel.

Az rpm függő újramintavételezést az enkóder jel segítségével oldottam meg. Az enkóder jel felfutó élei azonos szögelforduláshoz tartoznak, így ezek meghatározzák, hogy mely időpillanatokban kell a jel értékét interpolációval meghatározni. Az ily módon újramintavételezett jelen elvégzett DFT közvetlenül order spektrumot eredményez, melynek felbontását az enkóder felbontása, illetve az ablakméret közösen fogják meghatározni.

A két algoritmus által meghatározott order spektrum látható az alábbi ábrán. A kettő közti legszembevetőbb különbség alacsony fordulatszámon látható, ahol a változó ablakhosszúságú DFT spektrogramja „elkenődik”.



29. ábra Spektrogram
(változó méretű DFT: bal, pozíciófüggő újramintavételezés: jobb)

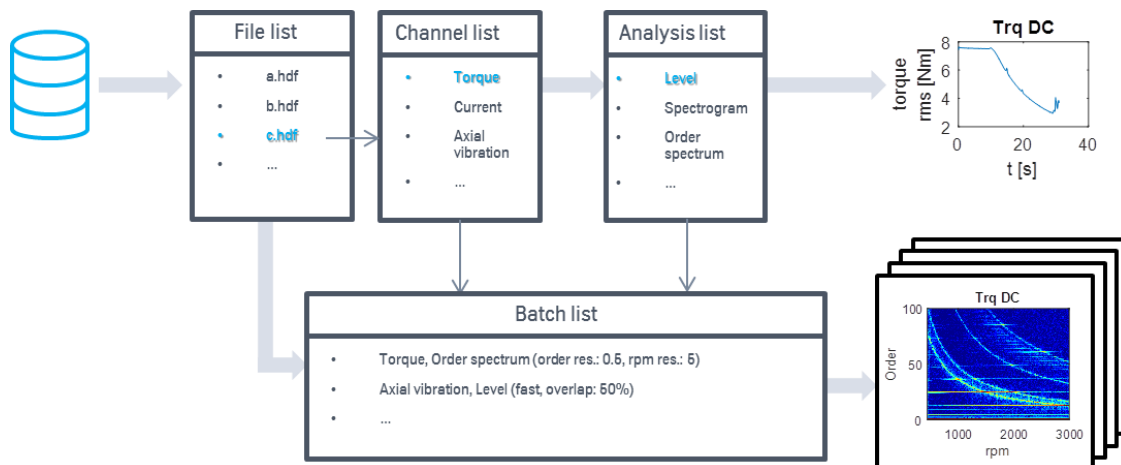
5.2.4. Order cut, Averaged order

E két diagram az order spektrum mátrixának felhasználásával egészen könnyedén megvalósítható. Az order cut-hoz egyszerűen csak ki kell indexelni a mátrix megfelelő sorát, az Averaged order esetében pedig soronként kell átlagot számítani. Az order, illetve rpm felbontásokat természetesen az order spektrum számításánál kell specifikálni.

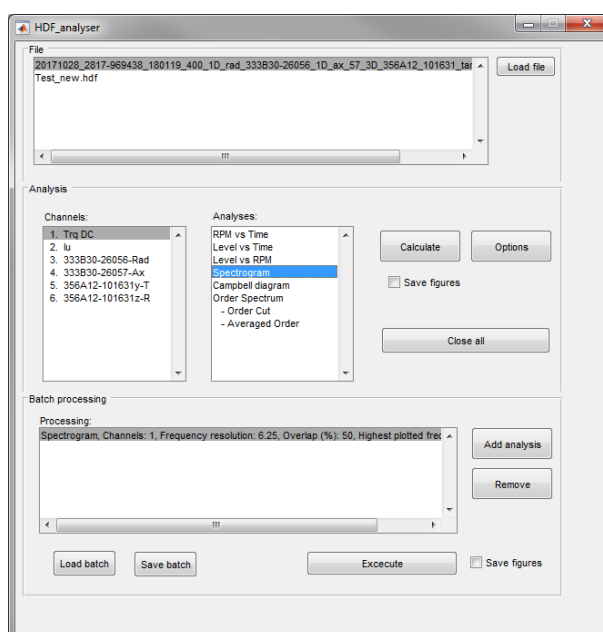
5.3. GUI felépítése

Annak érdekében, hogy a megvalósított függvények könnyen használhatók legyenek egy grafikus felhasználói felületbe (GUI) integráltam őket. Ehhez a MATLAB-on belüli GUIDE keretrendszert használtam fel, mely támogatja a grafikus interfészek fejlesztését. Segítségével előre elkészített komponenseket válogathatunk össze az alkalmazásunk számára. Az interakció ezekkel az elemekkel *callback* függvények formájában történik, melyeket a futtató környezet automatikusan hív meg. A *callback* függvényeknek általában két fő argumentumuk van:

- * *hObject*:
A GUIDE keretrendszerben minden komponenshez tartozik egy objektum, melyen keresztül elérhetjük, módosíthatjuk azt. Ezt a célt szolgálja a *hObject*.
- * *handles*:
Olyan struktúra, melynek segítségével a programunk egyes részei és a *callback* függvények kommunikálni tudnak egymással. Tárolhatunk benne globális változókat, paramétereket, vagy a felhasználó által definiált egyéb elemeket.



30. ábra Az elkészült program blokkdiagramja



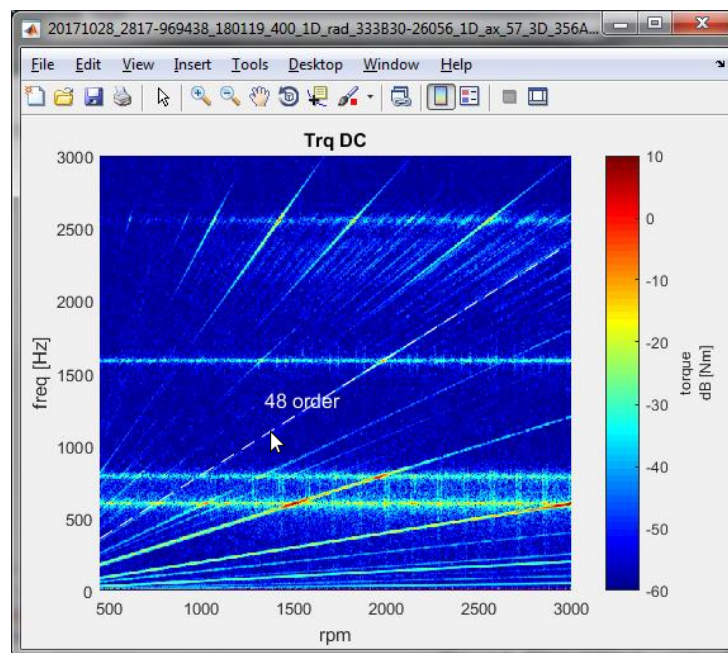
31. ábra Az elkészült GUI képernyőképe

Mint az az ábrán látható, a program bemenete a mérőrendszer *.hdf* kiterjesztésű állománya, melyet egy beépített elem, a fájlválasztó felugró ablak segítségével tudunk kiválasztani. Ezt követően megtörténik a fájl – vagy akár egyszerre több kiválasztott fájl – automatikus beolvasása, melynek végrehajtását egy *progress bar* szimbolizálja. A sikeres beolvasást követően a fájl tartalma (metaadat, csatornák jele stb.) a *handles* struktúrában kerül eltárolásra, valamint a neve megjelenik az elérhető fájlok listájában. Ha kiválasztunk egy fájlt, a csatornalista frissül és lehetőségünk nyílik meghatározni, hogy mely csatornákra szeretnénk mely analízist elvégezni. Ezek természetesen a korábban ismertetett jelfeldolgozási módszerek implementációi. Az egyes analízisek beállított paraméterei is a *handles* struktúrában vannak tárolva, melyeket az *Options* menüpont alatt tudunk módosítani.

A standard mérések és kiértékelések esetén gyakran előfordul, hogy ugyanazokat műveleteket kell elvégezni sok-sok fájlban. Ennek megkönnyítésére implementáltam a *batch* funkciót. Kiválasztható, hogy mely sorszámú csatornára mely analízist szeretnénk végrehajtani (a megfelelő beállításokkal), majd ezt a kombinációt hozzáadhatjuk a *batch* listához. Ezt követően persze még további elemeket adhatunk hozzá, vagy törölhetünk a *batch* listából, majd ha elégedettek vagyunk azt akár el is tudjuk menteni, hogy későbbi felhasználásnál egyszerűen tudjuk importálni. Végrehajtáskor egyszerűen ki kell jelölnünk azokat a fájlokat, melyeket fel szeretnénk dolgozni, majd az *Execute* gombra kattintva elindíthatjuk a folyamatot.

A kimeneti formátumot is tetszőlegesen módosíthatjuk. Alapértelmezésben a diagramokat MATLAB ábrák formájában láthatjuk, de ha ki van jelölve a *Save figures* lehetőség, akkor ezeket a program a specifikált formátumban el is menti a kívánt helyre. A diagramok feliratozása (a csatorna neve, mért fizikai mennyiség, annak mértékegysége stb.) a metaadatokat felhasználva automatikusan történik.

További kényelmi funkció került implementálásra a fordulatszám függvényében ábrázolt spektrogram (Campbell-diagram) esetében. Ez egy igen gyakran használt diagram forma, ugyanakkor nehézkesé teszi az orderek követését. Ezt orvosolandó egy dinamikus order követőt hoztam létre, mely az egér pozíciónak megfelelő ordert kirajzolja a spektrumon.



32. ábra Order tracking funkció

5.4. Elkészült program értékelése

Az általam elkészített program alapvetően teljesíti a vele szemben támasztott elvárásokat. Megvalósítja a leggyakrabban használt jelfeldolgozási módszereket, illetve teszi ezt egy jól használható rendezett GUI formájában. Funkcionalitásában hasonló a cég által jelen pillanatban is használt szoftverhez, így a megtanulása nem okoz túl nagy gondot a dolgozók számára.

A program tesztelése során a kiszámított diagramokat az ArtemiS SUITE, illetve az ArtemiS Classic szoftverek által számítottal vettem össze. A diagramok értékre és jellegre megegyeztek.

A fejlesztésnek természetesen csak a csillagos ég szab határt, mindig akad újabb funkció melyet implementálni lehetne. Az egyik ilyen fontosabb funkció az automatikus mérési dokumentum generálás, melynek segítségével a kötegben feldolgozott fájlokhoz, a beállításoknak megfelelő struktúrájú kiértékelést lehetne létrehozni. A megvalósítást egyelőre az gátolta, hogy a 3 dimenziós diagramok (spektrogramok) exportálása *.pdf* formátumban nem működött tökéletesen. A megoldást valószínűleg az fogja jelenteni, hogy generált ábrákból és eredményekből először egy LaTeX sablont hozunk létre, majd abból generálunk egy másik szoftver segítségével PDF fájlt.

A HEAD szoftverek bővebb funkcionalitással rendelkeznek, ugyanakkor a saját fejlesztésű szoftverek előnye, hogy ismerjük a belső működésüket, és az egyes lépéseket, algoritmusokat rugalmasan tudjuk kezelni és szükség szerint módosítani. Erre jó példa, mely a fejlesztés során valóban előjött, a fordulatszám problémája. Az általam számolt fordulatszám értékeket összevettem az ArtemiS SUITE és ennek egy hasonló verziója az ArtemiS Classic szoftverek által számolt értékekkel, és azt tapasztaltam, hogy a két szoftver ugyanabból az enkóder jelből eltérő rpm értékeket számol. A HEAD support csapatának felvetve a problémát azt a választ kaptam, hogy valóban, ismerik a problémát, ha pontos rpm értékeket szeretnék számolni, használjam a Classic verziót. Hozzáteszem az általam számolt fordulatszám, melyet enkóder periódusból kézzel is kiszámoltam, a SUITE számításaival egyezett meg.

6. Mérési eredmények elemzése

A munka másik nagy részét a mérési eredmények összevetése és az esetleges ok-okozati viszonyok feltárása tette ki. A cég rengeteg mérést végzett különböző paraméterű motorokkal, mely mérések közt a korreláció keresésével lehetőség nyílik fényt deríteni az eddig ismeretlen összefüggésekre.

6.1. Vizsgálati módszertan

A cégnél végzett mérések különböző strukturális szinten történtek:

* *Motor szint:*

A korábban ismertetett standard eljárásnak megfelelően, különálló elemként, inverterrel meghajtva, mérőpadon, a motort nyomatékának és a házrezgés (NVH) mérését jelenti. Emellett a motor vizsgálatára egy további speciális mérési elrendezésben, meghajtás nélküli *cogging* mérést is készítettek (a motor tengelyét megforgatva a forgatáshoz szükséges nyomaték hullámosságának vizsgálata).

* *Powerpack (PP) szint:*

A motor és a vezérlés (ECU) együttese. Hasonlóan mérőpadon mérve, a nyomaték és házrezgés (NVH) rögzítésével.

* *Rendszer szint:*

A komplett kormányrendszer vizsgálata, ECU-val vezérelve. Az egyik jellemző paraméter a felharmonikus tartalomból számított objektív mérőszám, a másik pedig egy szubjektív értékelés, 1-5-ig terjedő skálán.

A nyomaték és a házrezgés adatok természetesen nem nyersen kerültek összehasonlításra, hanem a megfelelő számú orderek (jellemzően a 6., 9., 18., 36.) amplitúdója, valamint az átlag érték került rögzítésre.

Az egyes motorok különböző szinteken végzett mérési eredményeit egy nagy táblázat foglalja össze. Sajnos nem minden motor esetében áll rendelkezésre minden egyes szinten végzett mérés. Összesen körülbelül 60 különböző motor eredményeit vettem össze a vizsgálatok során, melyek mindegyike valamilyen eltérő paraméterrel rendelkezik. Ezek közül a paraméterek közül néhányat kiemelve:

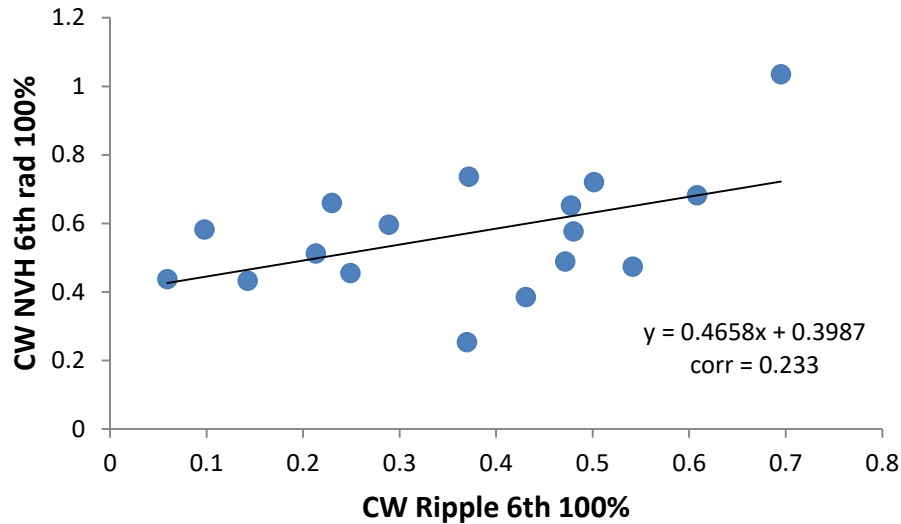
- * motor állórész gyűrűvel: merevséget növeli
- * hőkezelt, laminált állórész: rugalmasságot növeli
- * eltolt forgórész mágnesek: csökkentik a *cogging*, *ripple* értékét (általánosan csökken a nyomaték)
- * különböző forgórész mágnes hossz

- * különböző forgórész mágnes rádiusz
- * különböző állórész fogszélesség
- * lézerrel kivágott állórész
- * ...

A korreláció elemzés során az alapvető cél az volt, hogy megvizsgáljam a *cogging* – nyomaték hullámosság – házrezgés kapcsolatot. Az előzetes elképzelés szerint a *cogging* megjelenik a nyomaték hullámosságban, mely a motor működése során a házrezgés harmonikusait eredményezi.

A vizsgálat során kiválasztottam egy adott strukturális szinthez tartozó jellemzőt, majd ezt összevettem egy másik, vagy ugyanazon szinthez tartozó jellemzővel. Például nézzük a lenti táblázatot, mely a valós, vizsgált táblázatnak egy apró részletét tartalmazza. Ebben az esetben ugyanazon a szinten vizsgáltam meg a *ripple* és a házrezgés 6. harmonikusát.

Motor típus	Motor szint	Motor szint (NVH)
	100% load	100% load
	ripple 6th [Ncm]	radial 6th [m/s ²]
846425 C 100131 05 170119	0.229902	0.66007
846425_PT_044_170914_0007	0.43082	0.38543
846425_PT_044_170914_0010	0.36959	0.25301
⋮	⋮	⋮
963190_PT_001_171117_001	0.14241	0.43279



33. ábra A ripple és házrezgés 6. harmonikusa közti korreláció

Minden ilyen lehetséges érték-kombináció korrelációját kiszámítottam azon motor és strukturális szint esetén, ahol volt mérési eredmény. Ezek közül azokat az eseteket listáztam ki egy MATLAB script segítségével, ahol a korrelációs együttható meghaladt egy bizonyos küszöbértéket. Természetesen a korreláció megléte nem jelent feltétlenül kauzalitást, így a korrelációt mutató néhány esetet részletesen megvizsgáltuk.

A korreláció számításához a MATLAB `corrcoef()` függvényét használtam fel, ami a Pearson-féle korrelációs együttható számítását implementálja:

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (6)$$

Ahol A, B a vizsgált adatsorok (a fenti táblázat két oszlopa), μ_A, μ_B ezek (tapasztalati) várható értéke, σ_A, σ_B pedig a szórásuk.

6.2. Mérés eredményei

A egyes komponensek és szintek közti korrelációs számításaim eredményeiből azt a következtetést vontam le, hogy a ripple és a házrezgések között nincs egyértelmű kapcsolat.

Emellett néhány érdekesebb jelenségre, mely a vizsgálatok során előkerült, a cég munkatársainak segítségével, az ő tapasztalatukat és szakértelmüket felhasználva sikerült magyarázatot találni. Ezeket a megfigyeléseket egy táblázatba foglalták, melyben ki vannak emelve az érdekesebb összefüggések. Ez a táblázat a függelékben megtalálható.

A motor és PP (*Power Pack*) méréseket összevetve azt találtam, hogy a 6. harmonikus csak a ECU-val vezérelt mérések esetén van jelen, így azt joggal feltételezhetjük, hogy ezt a vezérlés eredményezi. Emellett a PP mérések esetén eltérés tapasztalható a két forgási irány között is, ami szintén a meghajtás algoritmusának aszimmetriájából ered.

A motorokat az előírt terhelés 50 %-án vizsgálva, a PP nyomaték és házrezgés mérései korrelálnak a végső rendszer objektív és szubjektív zajával. Ez valószínűleg a kormányrendszer szerkezetéből ered, melyben a nyomaték hullámossága az áttételeken és mechanikus kapcsolatokon zajt eredményez. Ugyanakkor 100 %-os terhelés mellett a korreláció már meglepően kisebb.

A legszembetűnőbb tény azonban a korreláció hiánya, de mi lehet ennek az oka?

Egyrészt a zajrezgés mérések során, a vizsgált eszközök között esetenként 10 dB-nél kisebb különbségeket szeretnénk detektálni, mely tűrés mellett a mérések szórása igen nagyak tekinthető.

Másrészt fontos a mérés megismételhetőségének a kérdése is. Ez azt vizsgálja, hogy adott mérőrendszer segítségével mennyire pontosan (várhatóérték) és precízen (szórás) tudjuk a kísérleteket elvégezni. A legapróbb különbségek is okozhatnak eltéréseket a mérések között, mint például a felfogatás minősége, egytengelyűségi hiba, hőmérséklet. Ezeket természetesen igyekeznek a mérési előírásoknak megfelelő tűrésértékeken belül tartani a mérések során.

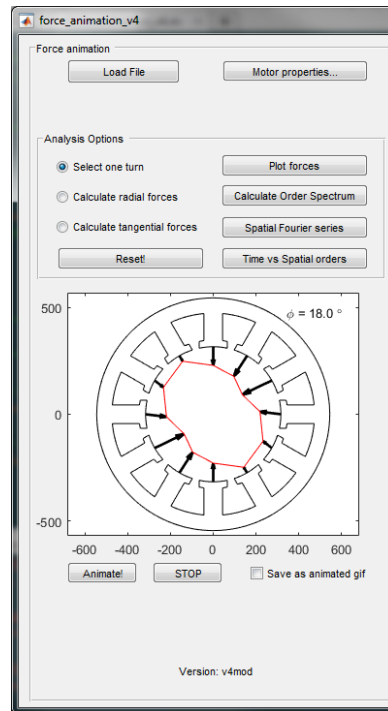
Továbbá számításba kell venni a mérések reprodukálhatóságát is – mely ugyanazon mérés más mérőrendszeren való végrehajtását jelenti –, hiszen a mérések egy részét a budai, másik részét az eszcheni központ végezte. Ezek a tényezők még tovább növelhetik a mért mennyiségek szórását.

Az egyik alapfeltevésünk – ha úgy tetszik, a null hipotézis – is tévesnek bizonyult, mely szerint a nyomaték hullámosság és a házrezgések között korreláció van. A 2018-as CoilTech konferencián előadó EOMYS is azt a következtetést vonta le, hogy az NVH mérések (házrezgés) nincsenek kapcsolatban a *ripple* harmonikusával [10]. Ezt a következtetést különböző (elektromágneses, strukturális, rezgésakusztikai) végeeselemes szimulációk eredményéből állapították meg (nem fordítva, a bizonytalan rezgésmérések eredményéből).

6.3. A házrezgések oka

A motorok házrezgésének oka tehát nem a nyomaték hullámosságában keresendő. A kialakult zajrezgések vizsgálata helyett inkább nézzük meg, hogy mely erőhatások lehetnek azok, melyek a motor házában mért rezgéseket okozhatják. Ezzel a témával a nyári gyakorlatom folyamán foglalkoztam részletesen, de az itt elért eredményeket a diplomamunka szempontjából fontosnak tartom röviden megemlíteni.

A cég motor csoportjában dolgozó, gépész kollégák képesek a motorok modellezésére és azok elektromágneses viselkedésének szimulációjára. A *Flux* véges elemes szoftver segítségével, a tengely forgási szögének függvényében meghatározták az egyes fogakra ható radiális és tangenciális irányú erőket (az axiális irányra merőleges síkban). Ezeket a MATLAB segítségével beolvastam, és kirajzoltam az állórész keresztmetszetének körvonalával együtt. Ha a kirajzolást minden szögelfordulási pozícióban frissítjük, egy szép animációt kapunk.



34. ábra Force animation plug-in továbbfejlesztett változata

A erővektorok csúcsait összekötő piros poligon az állórész (és a ház) deformációját reprezentálja, melytől azt várnánk, hogy viselkedésében hasonlít a házon mért gyorsulásértékekhez.

Az erőket egy mátrixban tároltam el, melynek szerkezete az alábbi:

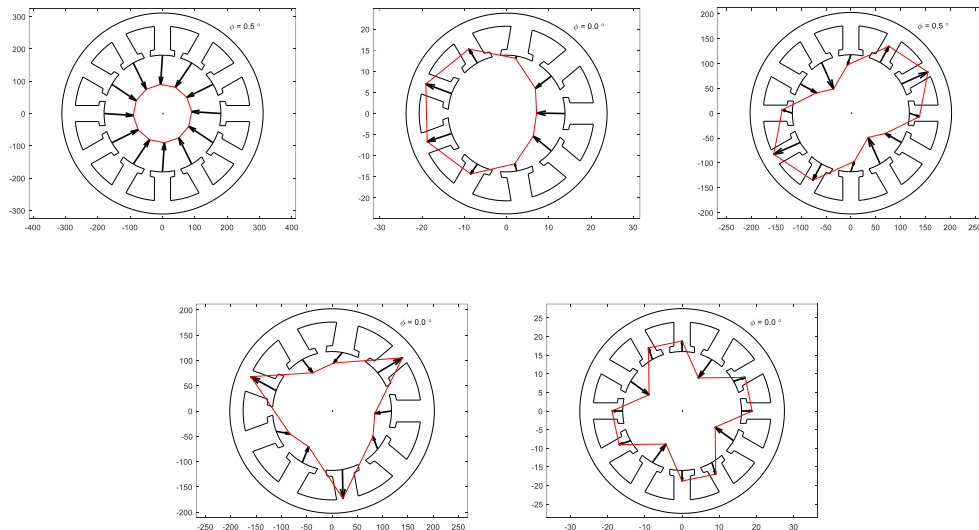
$$\begin{bmatrix} F_1(\varphi_1) & F_2(\varphi_1) & \dots & F_N(\varphi_1) \\ F_1(\varphi_2) & F_2(\varphi_2) & \dots & F_N(\varphi_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_1(\varphi_m) & F_2(\varphi_m) & \dots & F_N(\varphi_m) \end{bmatrix} \quad (7)$$

ahol N a fogak száma, φ pedig a forgórész elfordulásának szöge. Tehát mindegyik oszlop egy adott térbeli pozícióban levő foghoz tartozó erő változását írja le a szögelfordulás függvényében (az erőket komplex számok reprezentálják).

Az erők spektrális tartalmának elemzésekor több lehetőségünk is van. Egyrészt megvizsgálhatjuk, hogy egy adott fog esetén hogyan változik az erő nagysága és iránya. Ha elképzeljük, hogy a szenzort a vizsgált fog közepén helyeztük el, akkor ezen erőknek

kapcsolatban kell állniuk a házon mért rezgésekkel. A spektrális tartalmat megkaphatjuk az egyes oszlopok Fourier-transzformációjaként.

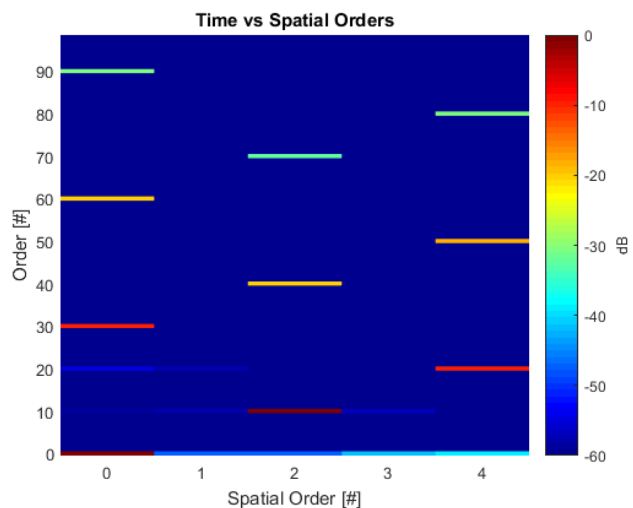
Viszont a ház deformációjában nem csak egyetlen fogra ható erők játszanak szerepet, hanem az összes együtt. A deformáció alakjának meghatározásához kiszámíthatjuk az erők Fourier-transzformáltját a térbeli pozíció függvényében is, tehát a mátrix egyes soraira. Az így kapott térbeli harmonikusok különböző deformációs mintáknak felelnek meg.



35. ábra Különböző térbeli harmonikusok (0-4. harmonikus)

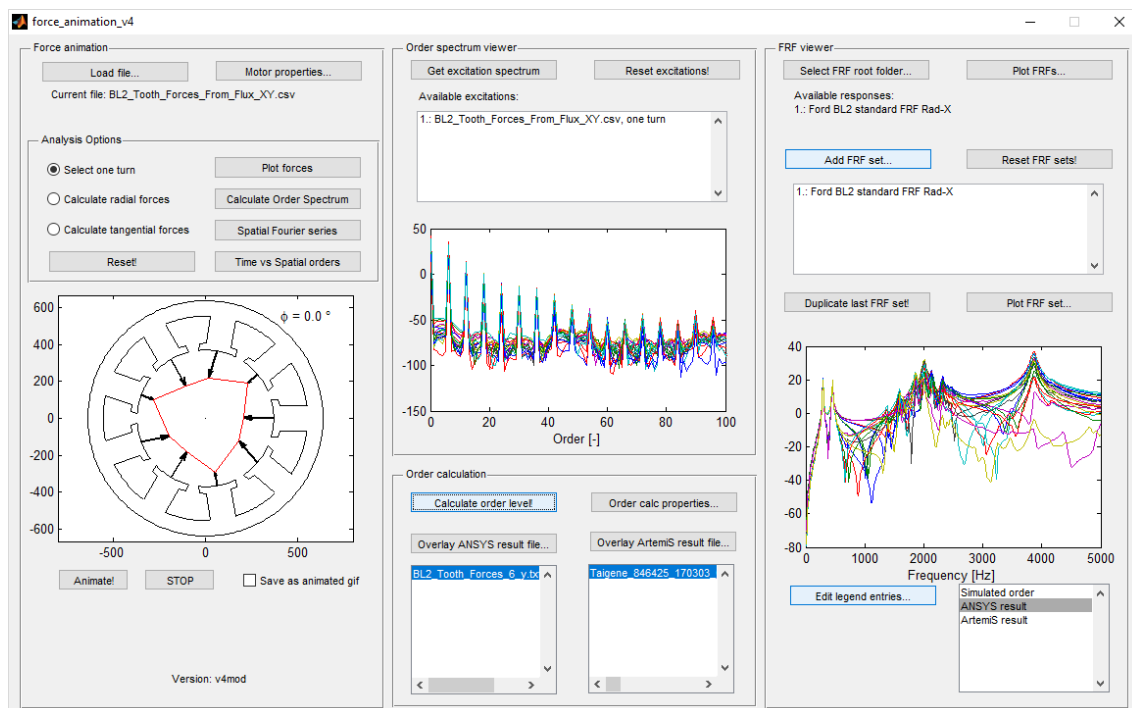
Mint ahogy az az ábrákon látszik egy adott fog – pólus kombináció esetén nem jelentkezik minden egyes módus.

Továbbá, ha a mátrixon mind a kettő irányban (oszloponként, soronként) végrehatjuk a Fourier-transzformációt, akkor egy 2 dimenziós spektrumot kapunk, mely megmutatja, hogy a harmonikusok a tér és a forgásszög függvényében, hogyan viszonyulnak egymáshoz.

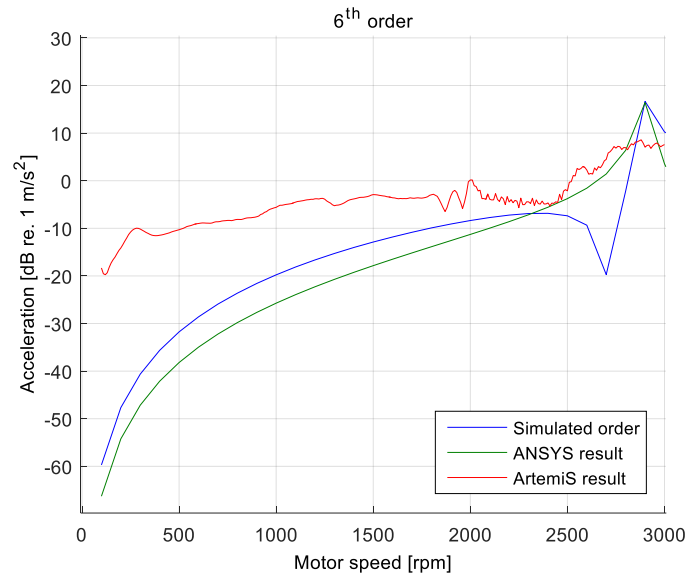


36. ábra Két dimenziós (forgási szög, térbeli pozíció) DFT

Ha strukturális analízis segítségével meg tudjuk határozni az erők és házrezgések közti átviteli függvényeket, akkor a szimuláció segítségével közvetlenül számolhatók a házrezgés értékek. Természetesen így már lehetőségünk adódik arra is, hogy a különböző harmonikusok hatását külön-külön vizsgáljuk.



37. ábra Átviteli függvény számítással kibővített force animation plug-in

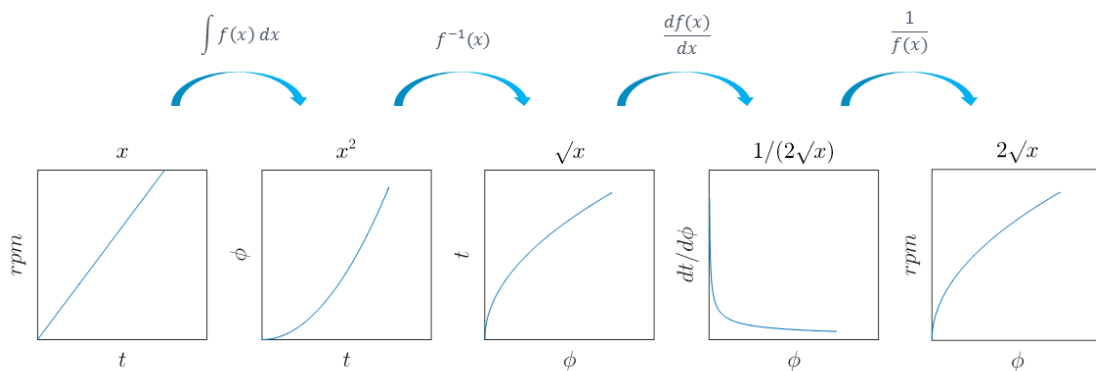


38. ábra Szimulált és mért order összevetése

7. Javaslatétel a mérési eljárás módosítására

A jelfeldolgozási módszerek vizsgálata során merült fel az az ötlet, hogy a lineáris helyett valamilyen más jellegű fordulatszám-felfutást alkalmazzunk a mérések során. Ez alapvetően a 3.2.2 fejezetben bemutatott változó ablakméret okozta problémára kereste a megoldást. Megismételve a korábbiakat, ez ugyebár azt jelenti, hogy a lineáris felfutás esetén, a különböző hosszú időintervallumhoz tartozó ablakokon belül, eltérő mértékben változik a fordulatszám, mely a spektrum „elkenődését” okozza. Ha meg tudunk határozni egy olyan felfutást, mely esetén a változó méret ellenére is ugyanannyit változik a fordulatszám az egyes ablakokon belül, akkor egy pontosabb, konzisztensebb spektrum kiszámítására lesz lehetőségünk.

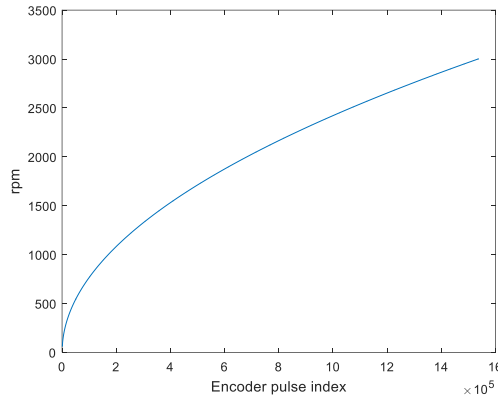
A cél tehát az, hogy a sebességtől függetlenül, egy fordulaton belül ugyanannyit változzon a fordulatszám. Mivel a fordulatszám a szögelfordulás deriváltja, így ez pontosan azt jelenti, hogy a fordulatszám megváltozása a szögelfordulás lineáris függvénye kell hogy legyen. A könnyebb megértés érdekében nézzük először, hogy mi történik a lineáris felfutás esetén.



39. ábra Lineáris felfutás különböző fizikai mennyiségekkel leírva

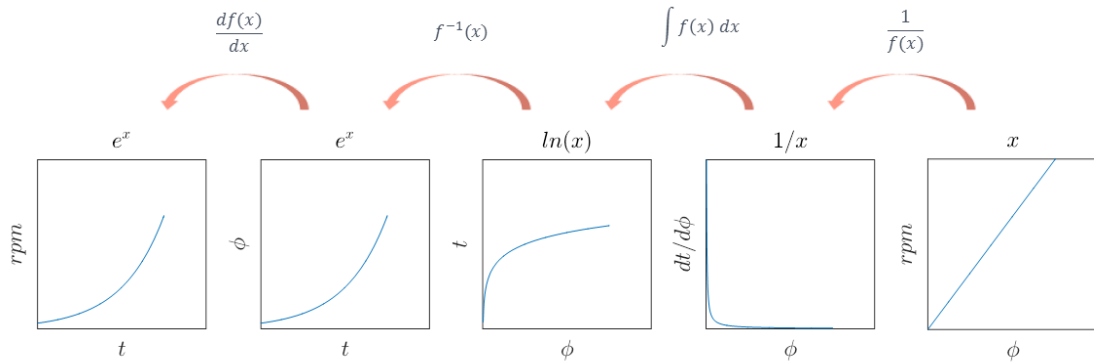
Balról jobbra haladva, az első ábrán látható, hogy a fordulatszám felfutás az idő függvényében lineáris, ezt a módszert alkalmazzák a standard mérések esetén. A szögelfordulás a fordulatszám integrálja, így a kettő közt négyzetes az összefüggés. Ha ezt invertáljuk, megkapjuk a megtett szögelfordulás alatt eltelt időt, ennek deriváltja pedig az egységnyi szögelforduláshoz tartozó időt adja meg (például ha enkóder jelére gondolunk, ez lesz a felfutó élek közti periódusidő, mely a sebesség növekedésével egyre kisebb lesz, ahogy az az ábrán is látszik). Ha ennek a reciprokát vesszük, új fordulatszámot kapunk, de ezúttal a szögelfordulás függvényében (periódusidő reciproka a forgási sebesség).

Ez megfelel a mérés során tapasztalt értékeknek, hiszen ha ábrázoljuk a kiszámított fordulatszámot az enkóder felfutó élek pozíciói mentén (ekvidisztáns szögelfordulási pozíciókban), hasonló ábrát kapunk.



40. ábra Fordulatszám a szögelfordulás függvényében (lineáris felfutás mérés)

Mi azt szeretnénk, hogy ez a diagram lineáris legyen. Ehhez a korábban elvégzett számítások inverzét kell elvégeznünk a lineáris diagramból kiindulva.

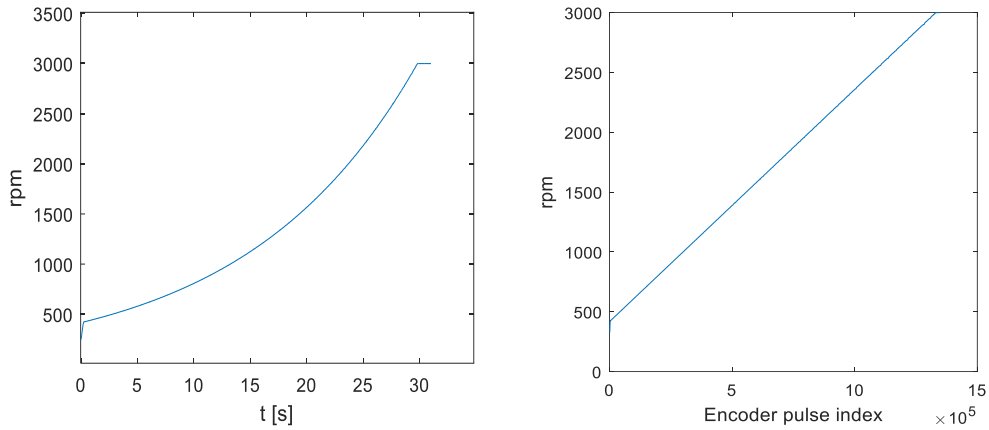


41. ábra Exponenciális felfutás különböző mennyiségekkel leírva

Ennek eredményeként azt kapjuk, hogy az elvárásokat, az exponenciális felfutás fogja teljesíteni. Az exponenciális görbe kiszámításának részletei a függelékben megtalálhatók.

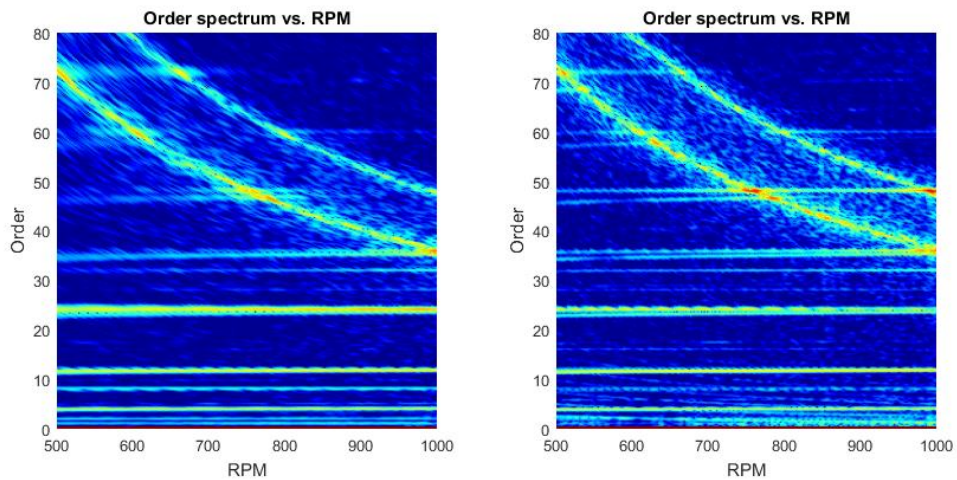
A mérés során a vezérlés számára egy CVS (Comma Separated Value) fájl formájában 10 ms felbontásban megadható, hogy az adott időpillanatban milyen fordulatszámértéket szeretnénk elérni (ezt a lineáris mérés értékeiből kellett interpolációval kiszámítanom az I_d és I_q vezérlőáramokkal együtt, de ezeket a technikai lépéseket nem részletezem).

Az exponenciális mérés dekódolt fordulatszám értékeit az előzőekhez hasonlóan a szögelfordulás függvényében ábrázoljuk, akkor a várakozásainknak megfelelő lineáris ábrát kapunk.



42. ábra Fordulatszám az idő és szögelfordulás függvényében

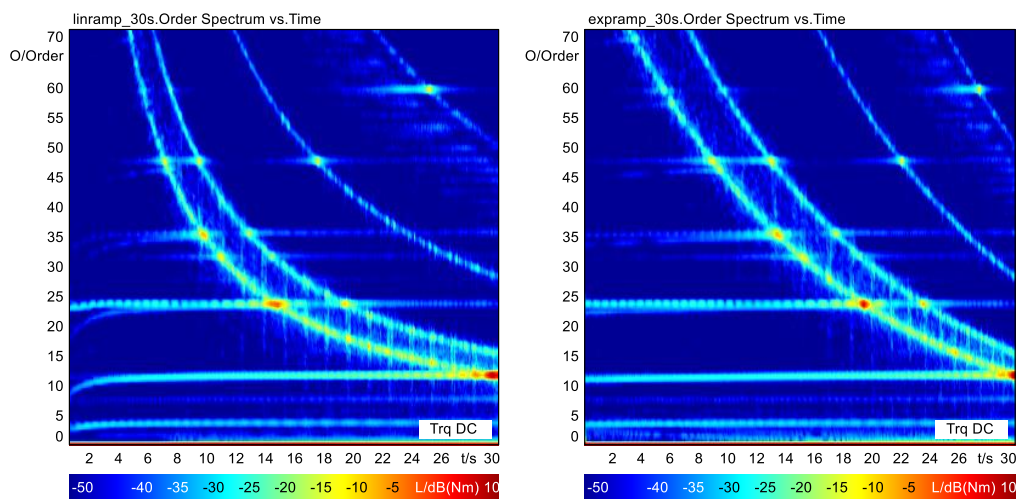
Az egész mérési módszert azért alakítottuk ki így, hogy az order spektrum számítását javítsuk. Amint ez az alábbi ábrán látható a két felfutás között jelentős különbség van alacsony frekvenciákon, az orderek jobban elkülöníthetők, kontrasztosabban megjelennek.



43. ábra Lineáris (bal) és exponenciális (jobb) felfutás order spektruma

Emellett exponenciális mérés alkalmazása esetén a diagram pontossága a fordulatszámtól független lesz, így a például az order cut és averaged order diagramok kevésbé torzulnak a spektrum elkenődése miatt.

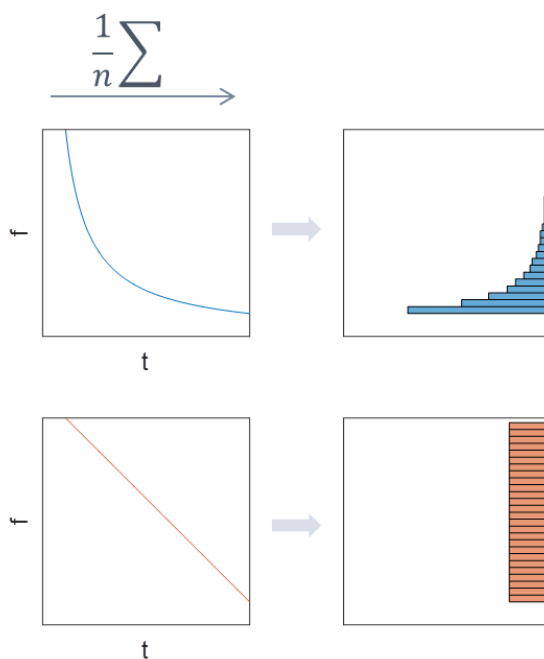
Vizsgáljuk meg a két felfutás order spektrumát az idő függvényében!



44. ábra Lineáris és exponenciális felfutás order spektruma az idő függvényében (ArtemiS SUITE által generált ábrák)

A két ábrán látható különböző rpm menetek következtében a rezonanciafrekvenciákhoz tartozó görbék is eltérőek lesznek. A rezonanciafrekvenciát nem diszkrét értéként kell kezelni, inkább egy intervallumként, melyen belül megnő az adott komponens erősítése. Ez viszont azt eredményezi, hogy a görbe meredekségétől függően az egyes orderek eltérő időtartamot töltenek a rezonanciafrekvenciák közelében, és aszimmetrikus lesz az erősítésük, mely eltorzítja a mérési eredményeket.

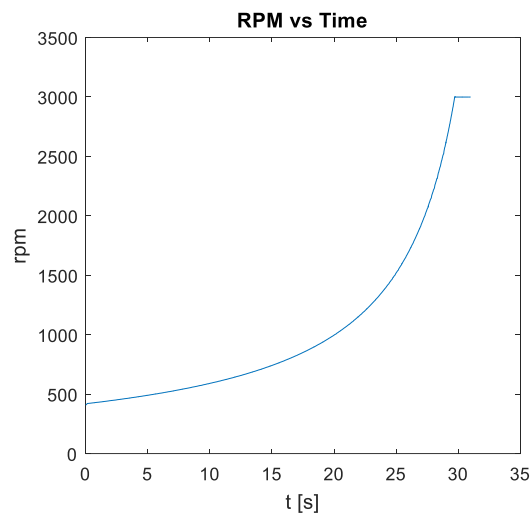
Ez a jelenség többek közt az átlagos order számításánál okoz problémát. Ha a fenti diagramon átlagoljuk az egyes orderek értékét az időtengely mentén, akkor a rezonanciafrekvenciából származó értékeket is beleszámítjuk az átlagba.



45. ábra Rezonanciafrekvencia hatása az átlagra

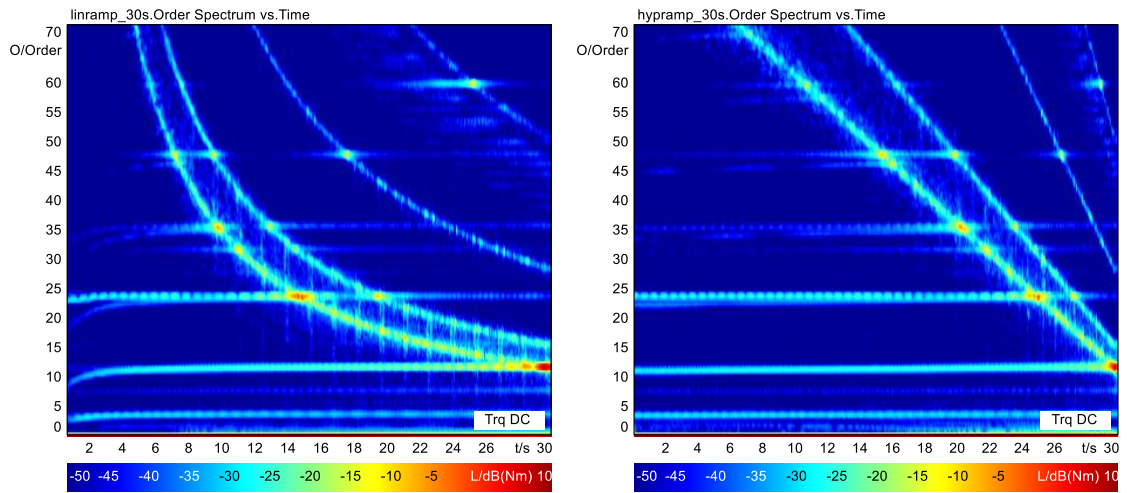
A fenti ábra alapján láthatjuk, hogy ha a lecsengés hiperbolikus, akkor az alacsony meredekségű részek nagyobb súllyal szerepelnek az átlagban. Ha azt szeretnénk, hogy az átlagszámítást a rezonanciafrekvenciák ne torzítsák el, akkor úgy kell alakítani a mérést, hogy azok állandó meredekségű, lineáris görbeként jelenjenek meg az order spektrumon.

Láttuk, hogy ha az rpm menet lineáris, akkor az idő függvényében ábrázolt order spektrumon a rezonancia frekvenciák – a fenti ábrának megfelelően – $1/x$ alakú görbék lesznek, vagyis a két mennyiség között fordított arányosság áll fenn. Így ha lineáris frekvenciagörbét szeretnénk kapni, akkor hiperbolikus felfutással kell a mérést elvégezni. A hiperbolikus rpm felfutást leíró egyenlet a függelékben megtalálható.



46. ábra A hiperbolikus felfutás görbéje

A két különböző – lineáris és hiperbolikus felfutással végzett – mérés spektrogramja látható az alábbi ábrán. A hiperbolikus felfutás esetén a vártak megfelelően lineárisak lesznek a rezonanciafrekvenciákhoz tartozó görbék.



47. ábra A különböző felfutásokhoz tartozó order spektrumok az idő függvényében

Ily módon, a hiperbolikus felfutás használatával a rezonanciafrekvenciák torzítása kiküszöbölhető.

8. Összefoglaló

A munkám során megvizsgáltam a kormányzársásegítő rendszerekben alkalmazott szervomotorok felépítését, működési elvét, illetve az egyes motor-paraméterek hatását a nyomaték hullámosságra. Azt tapasztaltam, hogy számos motorhiba okozhat *ripple* harmonikust, mint például a tengely excentricitása, az állórész ovalitása vagy a táplálás hibája. Ezek mellett még a tökéletes motoroknál is jelentkezik harmonikus tartalom, mely egyszerűen a felépítésnek és a működési elvnek köszönhető.

Ezt követően bemutattam a mérések kiértékelésére leggyakrabban használt jelfeldolgozási módszereket. Részletesen taglaltam az algoritmusok elméletét, illetve azok gyengeségeit is, mint például a spektrum-elkenődés jelenségét. Ezen jelfeldolgozási módszereket egy MATLAB program formájában implementáltam, melyhez készítettem egy jól használható, grafikus felhasználói interfészt is. Az alkalmazás a cégnél most is használatban levő kiértékelő szoftver kiváltását célozta meg. A programot számtalan további funkcióval fel lehet ruházni, mely az egyes specifikus felhasználások szempontjából hasznos. Az egyik ilyen az automatikus mérési dokumentum generálás, melynek segítségével az elvégzett mérésekből a program generálni tudná a cég által használt, standard mérési kiértékelést. Ez az elvégzendő munka szempontjából exportálási sablonok elkészítését, valamint több metaadat kiolvasását jelentené. Az automatikus dokumentumgenerálást jelen pillanatban a MATLAB ábra-exportálási képességei gátolják.

Számos motor mérés eredményének kiértékelésével kapcsolatot kerestem a motorok *cogging*, *ripple* és házrezgés jellemzői között. Az adatokon végzett korreláció-analízis eredményeként azt tapasztaltam, hogy az előzetes várakozások ellenére, a *ripple* és házrezgés harmonikusai között nincs egyértelmű kapcsolat. A vizsgálat ugyanakkor rámutatott egyéb, nem várt jelenségekre is (vezérlés okozta harmonikusok, irányfüggőség).

Ezt követően szimulációs számításokkal próbáltam magyarázatot találni a házrezgések okára. A fogakra ható erők térbeli harmonikusainak vizsgálatával kapcsolatot tudtam teremteni a motor házrezgései és mágneses mezők kölcsönhatásából eredő erőhatások között. Az erőhatások és a házrezgések közti átviteli függvények ismeretében az erőkből közvetlenül számíthatók a házrezgés értékek, így a szimulációs és mérési eredmények összevethetővé válnak. Jelen pillanatban az átviteli függvények számítása végeselemes strukturális modellezés alapján történik, mely nem felel meg teljes mértékben a valós viselkedésnek. A jövőre vonatkozóan az egyik fejlesztési lehetőség az, hogy a motorok állórészének átviteli függvényét móduselemzéses modellalkotással határozzuk meg. Ez leegyszerűsítve elvégezhető egy erőmérős kalapács és a mérések során is használt gyorsulásmérő szenzorok segítségével. Így előzetesen elvégezhető az erők és házrezgések közti átviteli függvények meghatározása, melyet felhasználhatunk a szimuláció során, hogy megjósoljuk a motor egyes paramétereinek hatását a teljes rendszer viselkedésére.

Véleményem szerint a jövőben kifizetőbb lehet az, ha a mérési eredményekből levont tanulságok helyett inkább a szimulációkra támaszkodunk. Segítségükkel mélyebben megérthetjük a motor működését, az egyes komponensek közti interakciókat, valamint így módon lehetőségünk van összevetni a mérési és szimulációs eredményeket is. Ez számomra a Kálmán-szűrő megfigyelőjére hasonlít: próbáljuk a modellünk paramétereit úgy hangolni, hogy a kimenete a lehető legjobban hasonlítson a valós rendszer működéséhez és ezáltal többlet információt nyerünk a rendszer működéséről.

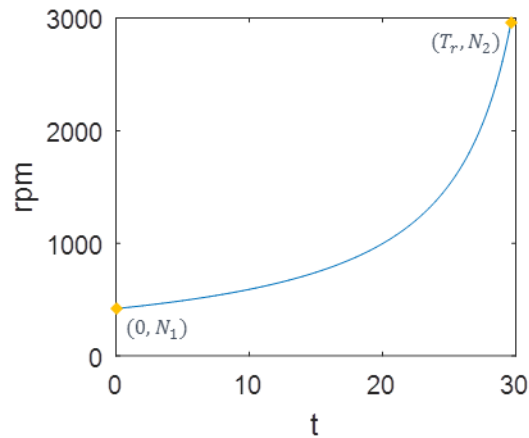
Irodalomjegyzék

- [1] *Alekszandr Gorbovszkij: 2000-ben és azután, Az én világom. Budapest, 1983.*
- [2] *Garret Keizer: The Unwanted Sound of Everything We Want, A Book About Noise. Hachette UK, 2010.*
- [3] *W Passchier-Vermeer and W F Passchier, Noise exposure and public health, Environmental Health Perspectives, Vol. 108.: 123–131, March 2000.*
- [4] *Mort Schultz: Steering, A Century of Progress. Popular Mechanics, Vol. 62, Page 59. 1985.*
- [5] *David Keeports: The warm, rich sound of valve guitar amplifiers. Physics Education, Volume 52, Number 2, March 2017 52 025010.*
- [6] *Dave Wilson: Motor Control Compendium, Texas Instruments 2010-2011.*
- [7] *Kécsán János: EPS Motor Handbook. Part 1. thyssenkrupp Presta Hungay, 2018.*
- [8] *head-acoustics.com (2018), SQquadriga II. {online}
https://www.head-acoustics.com/eng/nvh_squadriga_II.htm
(letöltve: 2018. 12. 10.).*
- [9] *directindustry.com (2018): Shaft coupling. {online}
<http://www.directindustry.com/prod/mayr/product-210-189265.html>
(letöltve: 2018.12.11.).*
- [10] *Jean LE BESNERAIS: Fast NVH simulation (presentation), CoilTech conference 2018, Pordenone, Italy.*
- [11] *HEAD acoustics, Order analysis in ArtemiS SUITE, Application Note, 08/16.*
- [12] *Noise Control Act of 1972, 42 U.S.C. § 4901.*
- [13] *Klaus Genuit: Vehicle Interior Noise - Combination of Sound, Vibration and Interactivity. Sound and Vibration. Vol. 43 , Page 8 – 13 . December, 2009.*

Függelék

A nemlineáris felfutás paramétereit:

- * N_1, N_2 – a fordulatszám kezdő- és végértéke
- * T_r – a felfutás időtartama



Exponenciális felfutás görbéje:

$$f(x) = a \cdot e^{bx}$$

$$\begin{aligned} f(0) &= N_1 \\ a \cdot e^{b \cdot 0} &= N_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(T_r) &= N_2 \\ N_1 \cdot e^{bT_r} &= N_2 \\ bT_r &= \ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \end{aligned}$$

$$a = N_1$$

$$b = \frac{1}{T_r} \ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)$$

$$f(x) = N_1 \cdot e^{\frac{1}{T_r} \ln\left(\frac{N_2}{N_1}\right)x}$$

Hiperbolikus felfutás görbéje:

$$f(x) = \frac{a}{1 - bx}$$

$$f(0) = N_1$$
$$\frac{a}{1 - b \cdot 0} = N_1$$

$$f(T_r) = N_2$$
$$\frac{N_1}{1 - bT_r} = N_2$$
$$bN_2T_r = N_2 - N_1$$

$$a = N_1$$

$$b = \frac{N_2 - N_1}{N_2T_r}$$

$$f(x) = \frac{N_1}{1 - \frac{N_2 - N_1}{N_2T_r}x}$$

Korreláció számítás, összefoglaló táblázat

	Motor	Motor NMH	PP	PP NMH	System
Motor	cog(motor)-TR(motor)				
	TR Cw/CCw(motor)				
Motor NMH	cog(motor)-HV(motor NMH) TR(motor)-HV(motor NMH)	dynTR(motor NMH)-HV(motor NMH), dynTR(motor NMH)-HV(motor NMH) (maybe 18th harmonic)			
	TR6th(motor)-dynTR6th(motor)	HV/Cw/CCw (motor)			
PP	TR6th (seems to be ECU)		TR6th Cw/CCw different value		
	TR pp (absolute value of the PPs is different because of 6th) TR 3th, 18th, 36th		TR Cw/CCw (6th, 18th, 36th)		
PP NMH	cog(motor)-HV(PP NMH) TR(motor) - HV(PP NMH) (6th, 36th)	HVtan/rad18th dynTR6th, 36th	TR(PP)-HV(PP NMH) HV/rad 50%-100% (PP NMH)	HV(PP NMH)-dyn TR(PP NMH) HV/rad 50%-100% (PP NMH)	
	TR (motor) - HV(PP NMH) 18th	HV/tan6th HVtan/rad36th dynTR 18th	TR-dynTR 18th	HV/Cw/CCw	
System	cog(motor) - objective/subjective(system) TR 18th 100%(motor) - objective, subjective(system)	dynTR6th, 18th, 36th)(MOT NMH) - objective (system)	TR pp, 6th, 18th 100% (PP) - objective/subjective(-50%)	PP HV/rad/tan 18th - sys objective/subjective(100%), axHv - no correlation with objective, dynTR - subjective (50%-100%)	
	cog 36th(motor) - subjective (system) TR pp, 18th @ 50%(motor) - objective, subjective (system) TR 36th 50%-100% (motor) - objective, subjective 36th (system)	HV/tan 18th)(MOT NMH) - objective (system) HV/tan, rad 18th (MOT NMH) - subjective (system)	TR pp, 6th, 18th 50%(PP) - objective/subjective(-50%)	HV/rad/tan 18th(PP NMH) - objective/subjective(system, only 50%) dynTR 18th (100%, PP NMH) - objective subjective(system)	objective(system)-subjective(system)

No correlation
 Some correlation -> see Correlation tabs