

NEM STACIONÁRIUS JELEK ÁBRÁZOLÁSI LEHETŐSÉGEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

COMPARISON OF REPRESENTATIONAL POSSIBILITIES OF NON-STATIONARY SIGNALS

Dr. Csík Norbert ⁰⁰⁰⁰⁻⁰⁰⁰²⁻⁹⁴⁵⁶⁻³⁴³¹ 1*

¹ Informatika Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2023.2.CSC.025>

Kulcsszavak:

Nem ergodikus
Jel
Reprezentáció
Fourier
Hisztogram
Módusz

Keywords:

Non-ergodic
Signal
Representation
Histogram
Modus

Cikktörténet:

Beérkezett
Átdolgozva
Elfogadva

Összefoglalás

A nem stacionárius jelek statisztikai jellemzői változnak az idővel, emiatt azok vizsgálatában a klasszikus módszerek helyett olyan eljárások terjedtek el, melyek a paraméterter változását szemléletes ábrák segítségével képesek megjeleníteni. Három olyan módszert mutatunk be, illetve hasonlítunk össze, melyek ezen jelformák jelentősen eltérő jellegzetességeire képesek fókuszálni és azokat akár kétdimenziós képen megjeleníteni.

Abstract

The statistical characteristics of non-stationary signals also change in time, and therefore, instead of classical methods, procedures have been developed to visualize the parameter space and its evolution in visual plots. We present and compare three methods that can focus on the significantly different characteristics of these waveforms and display them in a two-dimensional image.

1. Bevezetés

A stacionárius jelek olyan jellegzetességekkel rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik számunkra, hogy a jellemzőiket az időben állandó minőségként leírjuk. Statisztikáik jól meghatározottak, jellemzően azok átlaga és szórása időben konstans. Ezzel szemben a nem stacionárius jelek tulajdonságai az idővel változhatnak, a statisztikai jellemzőik nem állandóak és időbeli változásokat mutathatnak melyek akár önmagukban is tartalmazhatnak sztochasztikus vonásokat [1,2].

A nem stacionárius jelek megtalálhatók például a pénzügyi piacokon, részvényárakban, biológiai és mechanikai eredetű mintákban [3,4], statisztikai mintázatuk nem állandó, idővel változhat. Az ilyen jelek elemzése és modellezése sokkal bonyolultabb, mivel nem lehet megbízhatóan előre jelezni a változásokat sem pedig azok trendjét, minőségét.

Elemzésükre és tulajdonságainak ábrázolására számos matematikai módszer létezik [5,6], melyek általában a feltárt folyamatparaméterek több dimenziós vizualizációját és vizsgálatát teszik lehetővé, tipikusan megtartva az időt, mint lényeges dimenziót. Jelen munkában három egyszerű, lényegileg eltérő, elterjedt ábrázolási módot mutatunk be és hasonlítunk össze, melyek alkalmasak lehetnek időben változó kétdimenziós paraméterter áttekinthető generálására, megjelenítésére.

A bemutatásra kerülő eljárásokat egy kutatás későbbi fázisában nagy teherbírású emelőgépek indítási tranzienseiben bekövetkező hosszú távú trendek vizsgálatára szeretnénk felhasználni az

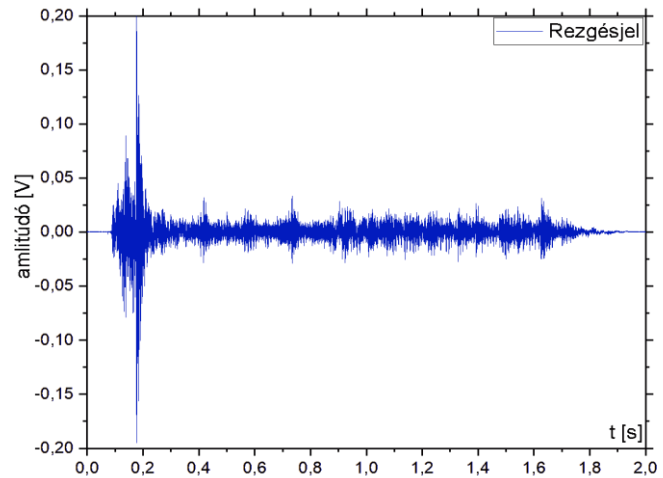
* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: csik.norbert@nje.hu

életciklus alatti degradáció hatásainak szempontjából. A módszereket egy ilyen indítási mintázat alapján vesszük sorra.

2. Módszerek

Egy időfüggő, részben sztochasztikus jellegzetességekkel bíró jelet a következő jellemzők segítségével szokás a legtöbbször vizsgálni: a Fourier-frekvenciatér komponenseinek vagy komponenscsoportjainak tartalmazási hányada, rész- vagy teljes amplitúdóspektrum; ezen komponensek vagy komponenscsoportok fázisinformációi, fáziszaja; valamint, az időtartományban a jel amplitúdó-eloszlása, hisztogramja.

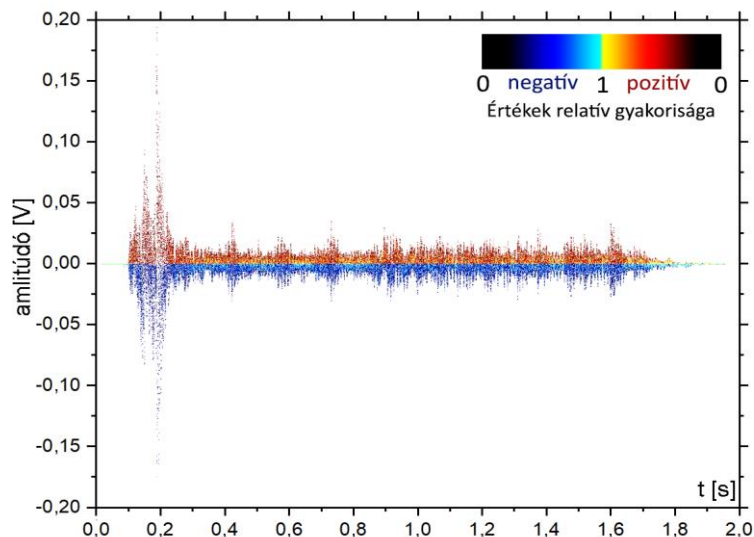
A módszerek képességeit ugyanazon indítási jelen mutatjuk be, mely egy csápos emelőgép burkolati testrezgéseként mértünk (1. ábra). Az algoritmusokat C++ nyelven, CodeBlocks fejlesztőkörnyezetben implementáltuk, melyek az egyszerűség kedvéért kép formátumba mentik a reprezentációkat.



1. ábra. Emelő testrezgése, mint próbajel

2.1. Időfüggő amplitúdó-hisztogram - Time-Dependent Amplitude Histogram, TDAH

Az egyik legegyszerűbb és legkézenfekvőbb vizsgálat annak tanulmányozása, hogy a jelet alkotó értékek gyakorisága egy, a minta hossza mentén eltoltt időablakban hogyan változik. A módszer különlegessége, hogy a sztochasztikus komponensek eloszlásának olyan ábrázolására is képes, melyre a bonyolultabb módszerekből nemigen tudunk következtetni – például az egyenletes és a normális eloszlású fehérzajt azok Fourier-spektruma nem szignifikánsan különbözteti meg, míg az amplitúdó hisztogram teljesen egyértelmű képet ad erről [7].



2. ábra. A próbajel ábrázolása az időfüggő amplitúdó-hisztogram segítségével

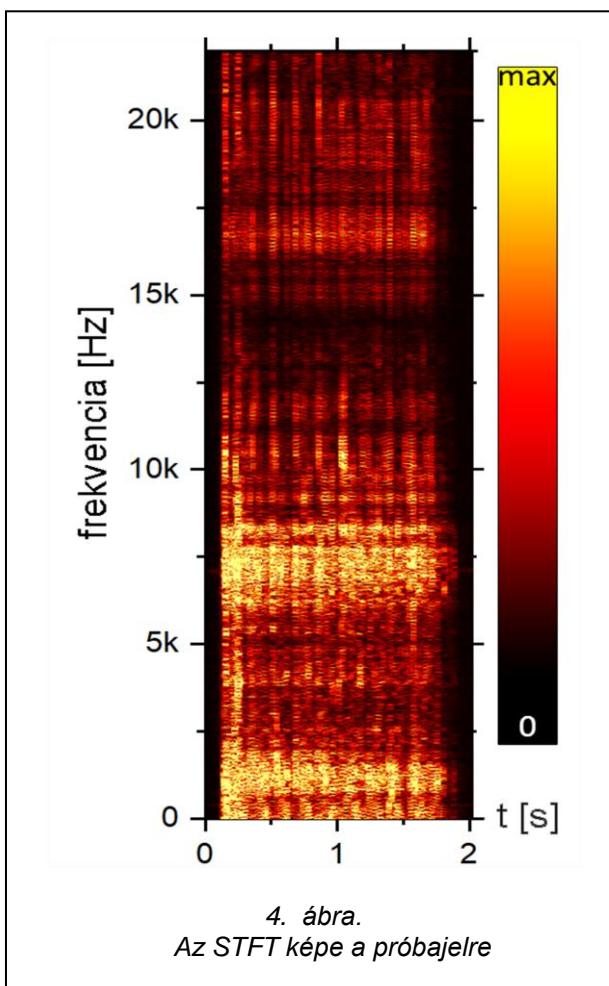
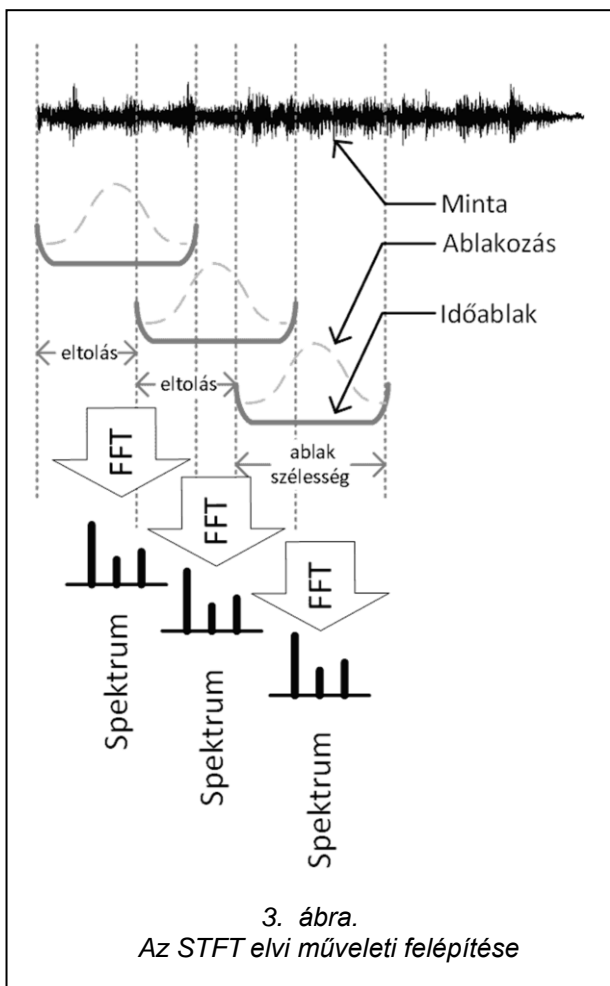
A 2. ábrán a próbajel amplitúdó-eloszlásának fejlődését ábrázoltuk 100 adatpontot tartalmazó időablak pontonként eltolása mentén. Vízszintesen az időtengely található, függőlegesen a relatív gyakoriság van skálázva pozitív értékekre 0..1 (piros-sárga), negatív értékekre 0..1 (kék-cyán) színezéssel. Megfigyelhető, hogy az indítási tranzienst két erősebb amplitúdóeloszlással indul, ami az emelőgép szerkezetének ismeretében a lánc rántásával megjelenő rezgésre utalhat, mely a

megfeszülés után gyorsan el is tűnik. A jel maradék része zaj természetű, nagyrészt normális eloszlású fehérzaj – erre utalnak a vízszinteshez közeli sárga és cían régiók, melyek a kis amplitúdók arányaiban nagyobb előfordulását jelzik.

2.2. „Short Time FFT” - Short Time Fast Fourier Transformation (STFT)

A Fourier-transzformáció a jelet, mint végtelen dimenziós vektort a szintén végtelen dimenziós szinuszoid jelek terébe vetíti és azok segítségével írja fel – egyfajta bázistranszformáció alkalmazásával. Ennek során a jelet az egy dimenziós időtartományból az egyes frekvenciakomponenseket jellemző speciális kétdimenziós komplex térbe képezi le, melynek egyik dimenziója frekvencia, a másik pedig fázis értelmű. Folytonos alakján a műveletek elvégzése körülményes, emiatt diszkrétizált és bizonyos megkötések mentén előállítható gyorsított verziója elterjedtebb a digitális jelfeldolgozásban (DFT, FFT).

A frekvenciatér információt szolgáltat a jelben megtalálható szinuszos komponensek tartalmazási hányadáról és fázisáról is, ám a legtöbbször spektrum alatt csak az amplitúdóspektrumot értjük annak gyakori használata kapcsán. Elterjedt még a teljesítménysűrűség-spektrum is – mely a komponensek teljesítményhányadát fejezik ki a jelben (a jelek komplex frekvenciatér reprezentációjának ábrázolására egyébként tíznél is több spektrumfogalom létezik). A jellegváltozások frekvenciatérbeli követéséhez a folyamatot egy alkalmas méretű időablakban vizsgáljuk, amit átlapolva csúsztatunk végig a mintán, minden lépésben egy lokális spektrumot generálva [9]. A keletkező spektrumsorozaton a tulajdonságok időbeni evolúcióját követhetjük nyomon (3-4. ábra).



A 4. ábra spektrogramjának vízszintes tengelye az idő, függőleges a frekvencia (1 pixel közelítőleg 21 Hz). Az STFT jellege és felbontása is függ az időablak szélességétől, az átfedés mértékétől, az ideális választás általában a probléma ismeretében történik. Az ábrán jelentősebb komponensek 10-12 kHz, jelentősebb mennyiségben pedig 8 kHz alatt jelennek meg. Érdekes még az

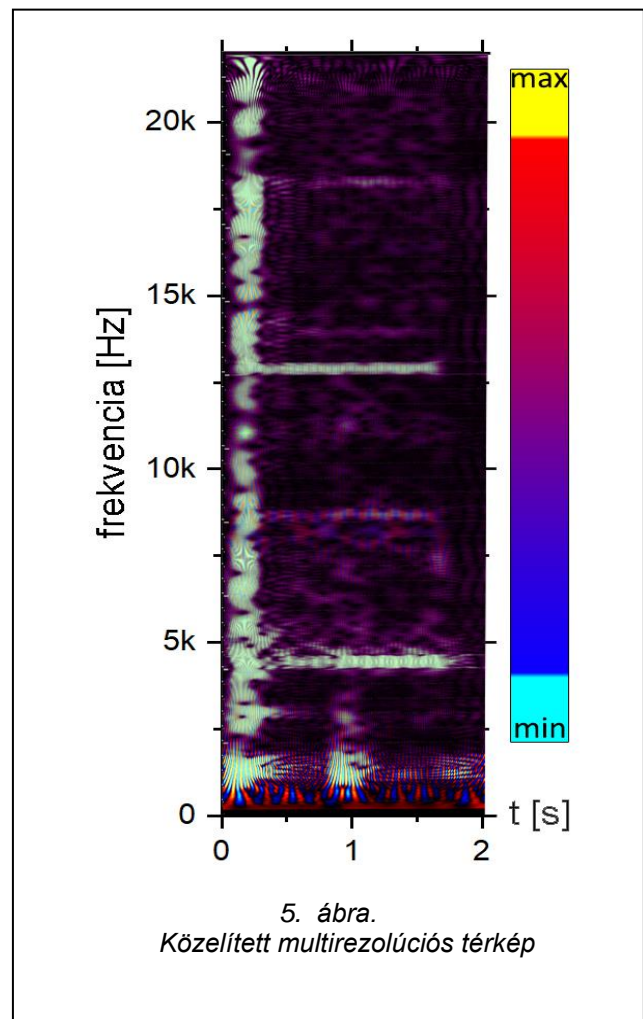
alacsony frekvenciás régióban feltűnő közel periodikusan (közel 0.15 s-onként) mutatkozó frekvenciasáv, melyet a felharmonikusok között a magasabb frekvenciás régióban is megfigyelhetünk – ez utalhat lokális bemaródásra, kopásra, vagy a csapágy enyhe megszorulásaira is).

2.3. Multirezolúciós térkép (Wavelet Multiresolution Analysis - MRA)

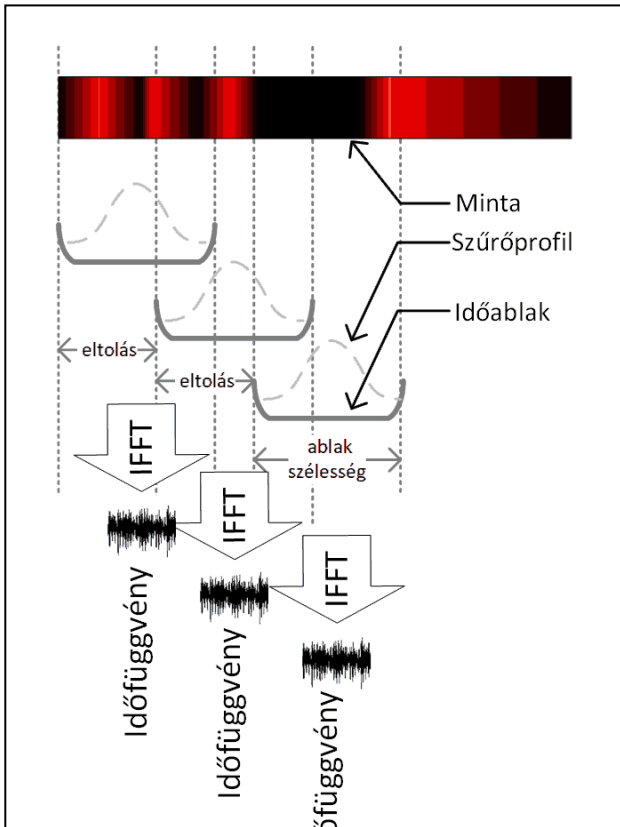
Az ezredforduló népszerű jelfeldolgozási eszközöként jelent meg a Wavelet-transzformáció (WT), mely skálázható, időben lokalizált tulajdonságokat képes felfedni speciális feltételeknek megfelelő bázisfüggvények segítségével. Az eljárásnak, csakúgy, mint a Fourier-transzformációnak létezik folytonos és diszkrét alakja is. Érdekes tulajdonsága a multirezolúciós felbontás lehetősége, mely során a részeredmények hasonlóak ahhoz, mintha egy adott lépésben a korábbi eredményeket a frekvenciatérben alul- és felülvágó szűrők segítségével két újabb frekvenciasávra bontanánk egyfajta összetett, hierarchikus szűrőrendszert hozva létre (természetesen a szűrési profil függ az alkalmazott bázisfüggvényről). Az MRA rendszerint tartalmazza az eredeti jelet és annak különböző mértékben és rendben szűrt verzióit, jellegzetes skála és eltolás alapú kétdimenziós térképet alkotva. Az eljárás az amplitúdó nagysága mellett megvilágítja a fázistér idő- és frekvenciafüggését is [8,9].

Sajnos az eljárás többnyire időigényes és bonyolult még diszkrét esetben is, ám a felbontás adott rendű lépése közelíthető direkt módon a spektrum frekvenciatengelyén végig csúsztatott frekvenciaablaknak megfelelő időfüggvénysorozat segítségével [5.-6. ábra].

Ebben az esetben a korrekt Wavelet-transzformációnak megfelelő normalizációs és integrálhatósági kritériumok sérülnek (lehetséges, hogy olyan bázisfüggvény sincs, amelyekkel ugyanez az eredmény adódna – hasonlóan az IIR-FIR szűrőtervezés problémájához). Az így kapható generátum ettől függetlenül közelítő jellegű betekintést enged a fázistér, a jelerősség, az idő és a frekvenciatér komplexen összefonódó világába.



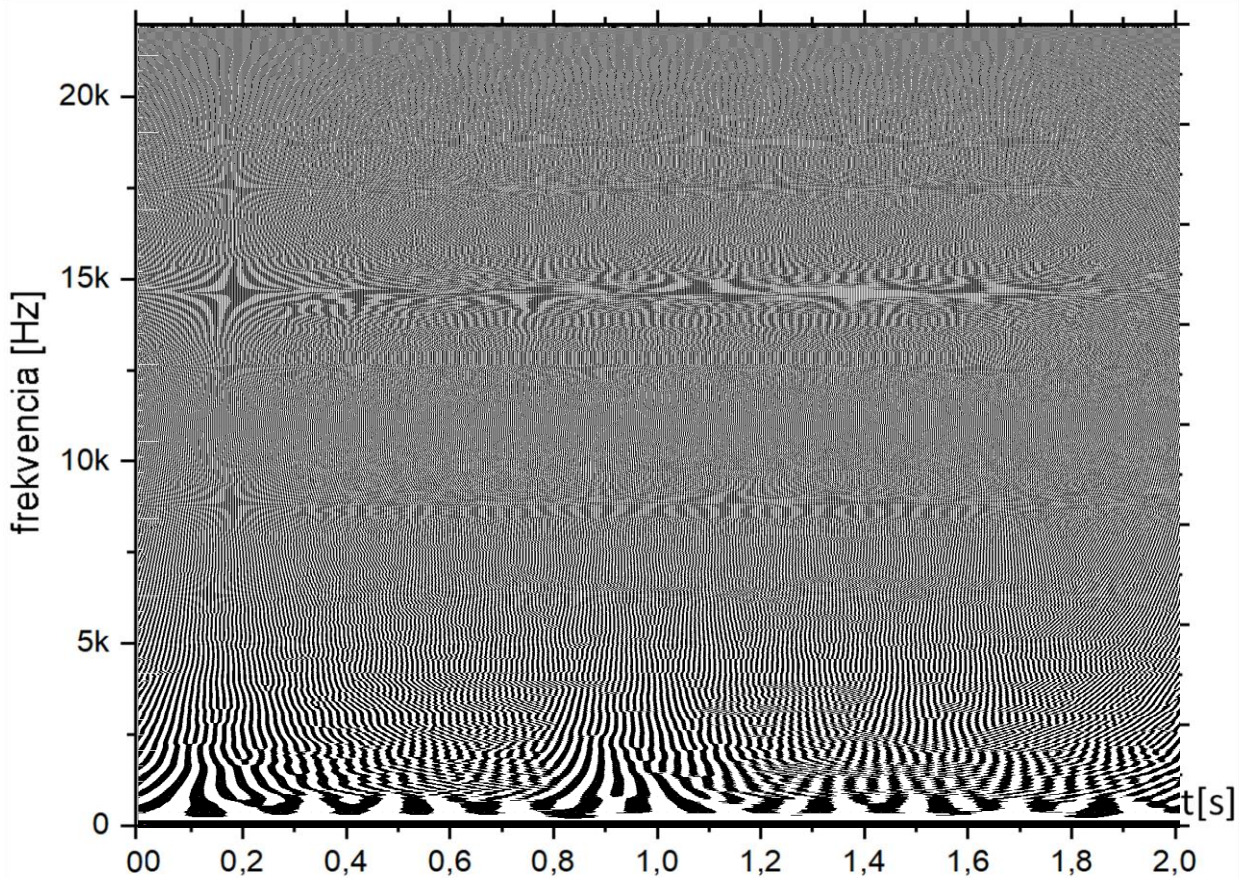
5. ábra.
Közéltett multirezolúciós térkép



Az 5. ábrán az eredeti, teljes minta megfelelő átméretezésével kapható időfüggvény spektruma látható, melyből az átfedésekkel elcsúsztatott sávszűrők által szolgáltatott sávok időfüggvényeit ábráztuk vízszintesen magasságtérképént. Az ábra színezete a pozitív értékekre 0..100%-ig pirostól sárgáig változik, negatív értékekre 0..100%-ig kéktől emelkedik a ciánig, nulla felé tartva a színezet a feketeig sötétül. A 6. ábra vízszintes iránya balról jobbra ismét az idő múlásának megfelelő, míg függőlegesen a szűrt frekvenciasáv középponti frekvenciája található.

Ez az ábrázolás jelentősen eltérő reprezentációt tesz lehetővé: a kép alján az alacsony frekvenciájú (közelítőleg 1-2 kHz-es sávok) kisebb amplitúdóval jelentkeznek, mint a kép sárgásabb foltjai. Jól látható, hogy ilyen foltokat az indítási transziensben egészen magas frekvenciáig találunk, ez okozhatja a jellegzetes magas csattanó hangot a szerkezet működésénél.

Az amplitúdóspektrumra tehető következtetések mellett azonban a kép erezete a komponensek fázisiterét is felfedi. Ha a színezetét



7. ábra. Bináris rezolúciós térkép

binárisra állítjuk, azaz a pozitív értékek fehérek, a negatívak feketék legyenek, ez a mintázat a kép teljes tartományán vizsgálhatóvá válik (7. ábra).

A jel forrásaként szolgáló szerkezet működése közben minden indítási jel eltérő, részben zaj jellegű, de ugyanazon terhelés alatt főleg az alacsonyfrekvenciás sávban a tranziensek mintázatai hasonlóak lehetnek. Tervezzük megfigyelni, hogy a látható „erezet” morfológiája miként változik hosszan tartó üzem alatt a szerkezet kopásával – ugyanis várható, hogy a lánc lazulása és megfeszülése nyilvánvalóan változtat a tranziens viselkedésén és fázisjellemzőin is. Ugyancsak megvizsgáljuk ugyanannak a gépnek nagyobb terhelésű indításakor mérhető válaszait a már szervízre váró állapotot jellemző ábrákkal, valamint összevetjük majd a burkolat különböző magasságú pontjaiból származó ugyanazon folyamat jeleit. Ilyen jellegű tájékozódó méréseket már végeztünk, az emelőoszlop talapzatához közelebb inkább a magasabb frekvenciák érvényesülnek (talapzat csillapítása). A méréseket várhatóan azonban az oszlop felső részén fogjuk végezni, hogy a felszerelt eszközök ne okozzanak munkavédelem szempontjából felvethető kérdéseket – itt az alacsonyabb frekvenciájú komponensek is jól megfigyelhetők lesznek.

3. Összefoglalás

Sztochasztikus, vagy sztochasztikus komponenst tartalmazó-, gyengén stacionárius statisztikákkal rendelkező jelek vizsgálata általában körülményes, hiszen azok legtöbbször azok több dimenziós vizsgálatot és reprezentációkat igényelnek.

Jelen munkában három olyan ábrázolási, vizsgálati lehetőséget mutattunk be, melyek az adott folyamat jelentősebben eltérő paramétereinek evolúcióját képesek feltárni és szemléletessé tenni.

Az TDAH segítségével az értékészlet eloszlásának időfüggését követhetjük nyomon, az STFT spektrogramja a jelet alkotó különféle frekvenciájú jelkomponensek megjelenését, változását, eltűnését tárja elénk, az MRA pedig betekintést enged a fázistér alakulásába is.

Az áttekintett módszerek lehetőségeit prediktív karbantartás stratégiájának kidolgozásában szeretnénk felderíteni autópári emelődaruk akusztikus testrengései alapján. Alapvetően hosszú távon fejlődő nemlineáris változások megjelenésére számítunk a teljes frekvenciatartományon: a transziens kezdeti jelformájának változása alacsony frekvenciákon (lánc lazulása), zsírzás elmaradása (csikorgás) ez magasabb frekvenciákon jelentkező mintázatok, orsó élbekopása (morzsolódás) teljes tartományon szóródó komponensekkel.

A felsorolt és bemutatott ábrázolások az egyes indítások jeleit jellemzik idő- és frekvencia tartományban, ezáltal alkalmasak lehetnek ezen kétdimenziós paraméterterek, időben hosszabb távon jelentkező megváltozásainak vizsgálatára, szerkezeti kopások, anyagi degenerációból eredő elváltozások okozta rezgékép-változások követésére abban az esetben is, amikor a szerkezet rezgéképe nem tartalmaz jól kiemelhető periodikus működési frekvenciát, vagy egyéb konkretizálható frekvenciasávot.

A kutatás következő részeiben nagy várakozással tekintünk egy hosszú távú vizsgálati időszak elé, ahol ezen módszerek hatékonyságának kérdésében a kutatás fókuszába kerülő emelőgépek esetében konkrétabb kijelentéseket tehetünk.

Irodalomjegyzék

- [1] Peter Walters : An Introduction to Ergodic Theory, Springer-Verlag, 2000, ISBN: 0-387-95152-0, [G. Scholar](#)
- [2] William Parry : Topics in Ergodic Theory, Cambridge University Press, 2004, ISBN: 0-521-60490-7, [G. Books](#)
- [3] Peters O. : The ergodicity problem in economics. Nat. Phys., 2019, Vol.15, 1216-1221. DOI: [10.1038/s41567-019-0732-0](https://doi.org/10.1038/s41567-019-0732-0)
- [4] Mangalam M, Kelty-Stephen DG.: Point estimates, Simpson's paradox, and nonergodicity in biological sciences, Neurosci. Biobehav., 2021, Rev. 125, 98-107. DOI: [10.1016/j.neubiorev.2021.02.017](https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.017)
- [5] Shujian Yu, Xinge You, Weihua Ou, Xiubao Jiang, Kexin Zhao, Ziqi Zhu, Yi Mou, Xinyi Zhao: STFT-like time frequency representations of nonstationary signal with arbitrary sampling schemes, Neurocomputing, 2016, Vol. 204, 211-221. DOI: [10.1016/j.neucom.2015.08.130](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.130)
- [6] Jie Kang, Li Liu, Yu-Pei Shao, Qing-Gang Ma: Non-stationary signal decomposition approach for harmonic responses detection in operational modal analysis, 2021, Vol. 242. DOI: [10.1016/j.compstruc.2020.106377](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106377)
- [7] Steven W. Smith: Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists, 2002, ISBN: 0-750-67444-X
- [8] Arne Jensen: An animated introduction to the Discrete Wavelet Transform, Revised Lecture Notes, 2001, http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/serien/e/reports_Aalborg_Univ/R-2003-24.pdf
- [9] Boualem Boashash, Samir Ouelha: Designing high-resolution time–frequency and time–scale distributions for the analysis and classification of non-stationary signals: a tutorial review with a comparison of features performance, Digital Signal Processing, Vol. 77., p. 120-152., 2018. DOI: [10.1016/j.dsp.2017.07.015](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.07.015)