

Vasúti pályadiagnosztikai információk feldolgozása az R programcsomaggal

A szerző a vasúti pályadiagnosztika által szolgáltatott mérési regisztrátumok feldolgozásának néhány újabb módszerét tárgyalja. A vertikális irányú geometriai és dinamikus pályagerjesztést reprezentáló analóg jel, egy német fővonalú pályáról, nagysebességű mérőkocsival felvett mérésből származik. Elvégzi az így nyert sztochasztikus idősor statisztikus feldolgozását mind idő-, mind pedig frekvenciatartományban.

DOI 10.24228/KTSZ.2019.2.3

Farkas András

Óbudai Egyetem

e-mail: farkas.andras@kgk.uni-obuda.hu

1. BEVEZETÉS

Szakmai körökben jól ismert, hogy a személy- és a teherszállítási forgalom erőteljes növekedése jelentősen hozzájárul a vasúti pályák állapotának leromlásához. A vasúti kerékpárok és a sín közötti érintkezésnél ébredő vertikális irányú dinamikus erőhatások a legfőbb előidézői az általában gerjesztett rezgéseknek és környezeti zajhatásoknak. Ezeket a nemkívánatos jelenségeket az olyan szabálytalan eltérések okozzák, mint például a pálya geometriai deformációi (fekszint, süppedés, siktorzulás), a sínszálak torzulásai (pl. a sín hullámos kopása), valamint folytonossági hiányok (pl. kitérők keresztelési középrésze). Megemlíthetők a pályamerevség inhomogenitásai is (átmeneti zónák, vaksüppedéses keresztaljak) és/vagy a kerekek körköröségi torzulásai (kerékkopás, kerék deformáció, poligon kerék, stb.). A dinamikus gerjesztést előidéző hatásokat főleg a pályageometria térbeli változásainak, a pályaeigenetlenségeknek tulajdonítjuk. Ezek nemcsak a teljes pályaszerkezetre, hanem – a forgóváz felfüggesztésének módjától és a rugó-

zatlan tömeg nagyságától függően – a jármű kocsiszekrényére is hatnak. A talajon tovaterjedő, érzékelhető rezgések tartománya néhány Hz-től 80 Hz-ig terjed, amíg a zajfrekvenciák a 30-250 Hz frekvenciatartományban karakterisztikusak [1].

A vasúti járművek által keltett rezgések létrejöttében a haladó jármű kvázistatikus gerjesztésének statikus komponensei (kerékterhelés, tengelytávok, járműsebesség) és a dinamikus gerjesztést kiváltó okok, mint például a kerék és a sín szabályosságának a torzulásai, továbbá a pályaeigenetlenségek és a pálya alátámasztási merevségének az inhomogenitása, egyaránt felelősek. A különböző, ismert v járműsebességekhez tartozó pálya/kerék kölcsönhatás periodikus λ irreguláris hullámhosszai és adott f térfrekvenciák által okozott dinamikus gerjesztés közötti összefüggéseket vizsgálta Thomson [2]. Méréssorozatai alapján megállapította, hogy csak egy rendkívül szűk hullámhossztartományban (0.67-0.69 m) van egybeesés a talajban gerjesztett rezgések és a zajhatások hullámhosszai között. A nagyobb

hullámhosszak (1.3-21 m, amelyekhez 4-63 Hz frekvenciasáv és 40-300 km/h sebességtartomány tartozik) a gerjesztett dinamikus rezgéseket, a kisebb hullámhosszak (0.044-0.35 m, amelyekhez 31-250 Hz frekvenciasáv tartozik a 40-300 km/h közötti sebességtartományban) a környezeti zajokat okozzák.

Az EU-ban érvényes EN 13848 szabvány három hullámhossz intervallumot rögzít a vasúti pályák minőségi kiértékelésével kapcsolatban:

- D1: 3–25 m
- D2: 25–70 m
- D3: 70–150 m

A rövidebb hullámhosszak érzékelésére újabban javasolják a D1 tartományának kiterjesztését legalább 0.5-1 m-ig. Ebben a tartományban aluláteresztő szűrőkkel történhet a mintavételezés. A rezgési szintek rendszeres ellenőrzése a vasutak egyik alapvető feladata, amelynek feltétele megfelelő eszközök (mérőkocsik és számítógéppel támogatott kiértékelő rendszerek) megléte és alkalmazása. A feltárt pályahibák mielőbbi megszüntetése képezi a karbantartási feladatok szakszerű megtervezésének fő célját. Magyarországon a MÁV Központi Felépítményvizsgáló Kft. FMK-007-es pályaszámú felépítményi mérőkocsija előírt gyakorisággal szolgáltat mérő- és minősítőszámokat a hazai vasúti vonalhálózat vágányairól. A mérőkocsira két mérőrendszert – a járműdinamikai és a vágánygeometriai – helyeztek el. A kocsik maximálisan 200 km/h sebességű közlekedésre és egyidejű mérésre alkalmas. Sajnos azonban a jelenleg meglévő mérőrendszerek nem képesek átfogni az altalajban és a járművekben gerjesztett rezgések és a zajhatások szempontjából releváns, teljes gerjesztési frekvenciatartományt. A szokásos gyakorlat szerint a közepes és hosszú hullámhosszak mérésére a szokványos mérővonatokat használják, míg a rövidekre, terhelés nélküli gyorsulásmérő kézi toló-kocsikat vagy a jármű felépítményére szerelt lézeres rendszert alkalmaznak. Említhetők még a sinszál hullámos kopásának az elemzésére kifejlesztett egyedi készülékek is.

Ami a pályarendszer vertikális irányú rezonancia frekvenciáit illeti, a megengedett maxi-

mális terhelésű szerelvények haladása esetén, három jellegzetes tartományt lehet megkülönböztetni. Az első ilyen frekvenciaintervallum 40 és 140 Hz között van, a második 100 és 400 Hz, a harmadik pedig 250 és 1500 Hz közötti [3]. Az alacsony frekvenciájú lengések (0-40 Hz) az alépítmény (ágyazat, zúzalék), a közepes frekvenciájú lengések a síneket kivéve a felépítmény elemeit (keresztalj, sínleerősítések, aljlapucskok), a magas frekvenciájú lengések a vágányokat és a sínleerősítéseket egyaránt károsíthatják.

A vasúti jármű kocsiszekrényének dinamikai tulajdonságai alapvetően függenek a gerjesztés amplitúdójától. A gerjesztés amplitúdója akkor növekszik, ha minél nagyobbak a hullámhosszak. Amennyiben a kívánatos módon, vagyis magasabb frekvenciákra történt a kocsiszekrény szerkezetének modális elemzése, akkor ez előnyös a jobb lengéscsillapítás szempontjából és javítja a futásminőséget a vasúti járműveknél. Ezt a modern méretezési eljárások, ún. modális érzékenység optimalizálással (a méretezés változója a keret vastagsága) oldják meg, elsősorban a rugalmas felfüggesztési paraméterek adekvát megválasztásával. Ily módon, a szerkezet megváltoztatása nélkül a függőleges irányú, hajlítási alakváltozást okozó frekvencia mintegy 11 Hz értékűre növelhető, ami jobb futásjóságot biztosít. A könnyűszerkezetes kivitelezés során azonban óvatossá kell lenni, mivel ez gyakran jelentősen csökkenti a kocsiszekrény szilárdsági paramétereit [4]. Carlbom [5] vizsgálatai szerint, alacsony modális frekvenciájú, könnyűszerkezetes kocsiszekrények a magas érzékenységi tartományban az utasok részére szinte elviselhetetlen utazási körülményeket, minőséget eredményeztek. E kutatási gyakorlati hasznosításaként kvalitatív UIC szabályokat vezettek be a járműszekrények saját frekvenciáira vonatkozóan (UIC 5664 és EN 12663). Ennek megfelelően, például Németországban az ICE előírásai szerint, az első hajlító frekvencia nem lehet alacsonyabb mint 10 Hz.

A mindenkori pályaalapotról felvett információk alapján megismerhető a meglévő pályaegyenetlenségek okozta gerjesztés hatására a haladó jármű viselkedése a pályán. Jelen ta-

nulmány a pályaegyenetlenségek által gerjesztett vertikális irányú lengésekkel (rezgésekkel) foglalkozik. Az előzőekben körvonalazott mérnöki feladatok megoldásának egyik alapfeltétele a pályagerjesztés statisztikai jellemzőit magában foglaló, a frekvenciaösszetevőket tartalmazó elmozdulás-, illetve gyorsulás-spektrumok rendelkezésre állása. E spektrumok mérési és feldolgozási módszereinek már több évtizedes múltja és gyakorlata van, de az utóbbi években egyre pontosabb eljárásokat fejlesztettek ki. A következőkben kísérletet teszünk néhány újabb módszer statisztikai hátterének megismertetésére és azok gyakorlati alkalmazásának bemutatására. A szükséges számítások elvégzése és a grafikus reprezentációk előállítását az **R** programcsomag 3.3.2 verziójával készült. Az **R** statisztikai programcsomag a felhasználók számára szabad, nyílt hozzáférésű, bárki által önkéntesen is fejleszthető, rendkívül gazdag kínálatú szoftvertár. A csomag forráskódja a <http://www.r-project.org> címen található és különböző operációs rendszerek alatt is fut.

2. A VASÚTI PÁLYA MÉRÉSI REGISZTRÁTUMA ÉS VIZSGÁLATA IDŐTARTOMÁNYBAN

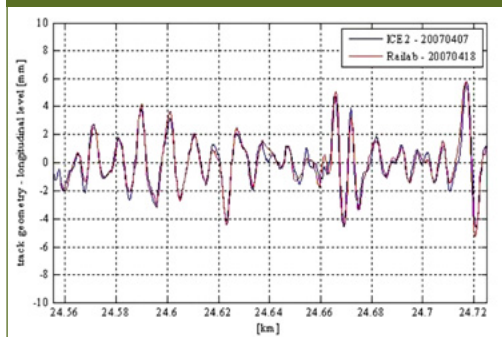
A rendszeres pályafelügyelet, azaz a meghatározott időközönként elvégzett pályadiagnosztikai mérések, megfelelő információkat szolgáltatnak a vasúti pálya geometriai minőségéről és dinamikai állapotáról. Ez lehetővé teszi a pályahibák feltárását, illetve előrejelzését, visszaigazolva a megtörtént beavatkozások kellő színvonalú végrehajtását, és elősegíti a jövőbeni pályaállapot karbantartási műveleteinek tervezését. Ezen túlmenően, fontos információkat szolgáltat az alépítményre és a járművekre átadódó dinamikus pályagerjesztés műszaki és statisztikus jellemzőiről.

A szerző – a szükséges technikai lehetőségek hiányában (például A/D konverter) – a DB-nál (Deutsche Bahn) üzemszerűen használt mérési rendszer által szolgáltatott információkat használta. Ezt a rendszert a függőleges és vízszintes irányú gyorsulások mérésére és regisztrálására alakították ki. Az inerciális gyorsulásmérő szenzorokat a felépítményi

mérőkocsi mellső forgóvázának hátsó hajtott tengelyére, a forgóvázkeretekre és a kocsiszekerény belsejében az ülések alá szerelték fel. A tengelyterhelés 12 tonna, a maximális haladási sebesség 250 km/h. Az érdeklődő olvasó a mérőrendszerről további részleteket talál a [6] irodalomban.

A tényleges számítások elvégzéséhez szükséges kiinduló információk a RIVAS dokumentált kutatási jelentéséből származnak [7, p. 17]. A felhasznált eredeti mérési regisztrátumot az 1. ábra mutatja be, amely a német vasutak egyik fővonalai pályájáról származik. Ezt a vertikális irányú pályagerjesztést reprezentáló $z(t)$ elmozdulásjelet (fekszint hiba), az idő függvényében mért $\ddot{z}(t)$ gyorsulásjel egymás utáni kétszeres integrálásával nyerték. A mérőkocsi felvételtelkori egyenes sebessége 200 km/h, a vízszintes, egyenes vonalú pályaszakasz hossza 160 m (24.56–24.72 km pályaszelvény). Megjegyzendő, hogy különösen rosszabb minőségű pályák esetén, ennél hosszabb regisztrátumokat célszerű felhasználni.

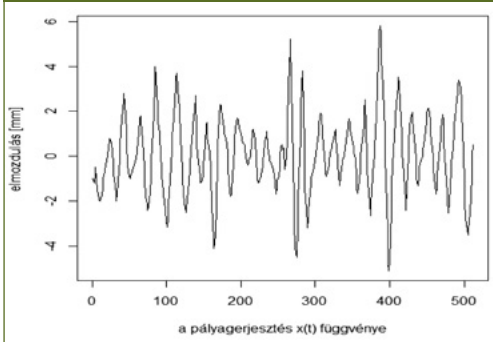
1. ábra: A német fővonalai vasúti pálya eredeti mérési regisztrátuma (analóg jel) [7, p. 17] vágánygeometria - fekszinthiba (süppedés) (track geometry - longitudinal level)



A jelfeldolgozás folyamán, az $x(t)$ időfüggő, folytonos analóg jelet digitalizálással, időfüggő diszkrét jelsorozattá alakítjuk át diszkrétizálási és kvantálási műveletekkel. A véges mintasorozat a jel egyenlő időközökben felvett numerikus értékeit tartalmazza.

A soron következő számítások és grafikus ábrázolások során az **R** programcsomag **tseries**, **forecast** és **astsa** programjait használtam. A digitalizált, sztochasztikus idősort a 2. ábra mutatja.

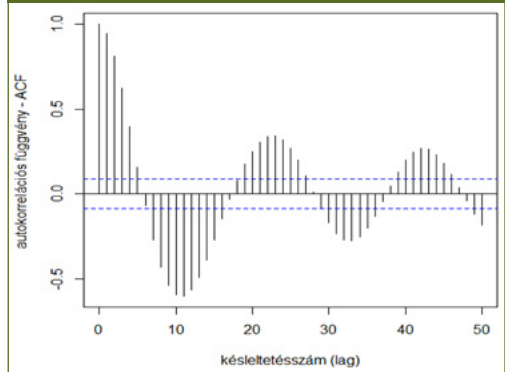
2. ábra: A sztochasztikus jel (elmozdulás) digitalizált idősora



A diszkrétizált, sztochasztikus idősor mintaelemeinek a száma: $2^9 = 512$, célszerűen a 2 egészértékű hatványaként választottam, ami a későbbiekben bemutatott frekvenciatartománybeli vizsgálatok során az FFT (gyors Fourier-transzformáció) számítási hatékonysága miatt célszerű. Az 1 m-re eső mintaelemek száma: $512/160 = 3.2$ adat, azaz a vasúti pálya minden 0.3125 m-re jut egy mérési adat. Mivel a 200 km/h állandó sebességgel haladó jármű a 160 m hosszúságú pályaszakaszt 2.88 sec alatt tette meg, a mintavételi frekvencia: $f_s = 512/2.88 = 177.777/\text{sec}$, azaz 177.78 Hz. Az ún. alul-mintavételezés (aliasing) kiküszöbölése érdekében a mintavételezett jelben lévő még értékelhető maximális frekvencia, azaz a minta határfrekvenciája a Nyquist frekvencia: $f_N = 1/2 \cdot f_s = 88.888$ Hz. A mintavételi periódus (intervallum): $\Delta t = 1/f_s = 0.00562$ sec. A mintavételi frekvenciához tartozó hullámhossz: $\lambda = v/f_s = 55.555/177.777 = 0.3125$ m. Ez a legkisebb hullámhossz, amit esetünkben, a jel analízise során még érzékelnünk tudunk. A pályagerjesztés jellegetes, csak lassan lecsengő, autokorrelációs függvényét mutatja be a 3. ábra (korrelogram), ahol 50-es a késleltetésszám.

Az egyik leggyakrabban használt formális statisztikai próba a Ljung-Box teszt, amely

3. ábra: A pályagerjesztés autokorrelációs függvénye (korrelogram)



azt vizsgálja, hogy vajon egy idősor bármelyik autokorrelációs csoportja zérustól különböző, azaz a hibák autokorreláltak-e? Ennél a próbánál, egy szignifikáns p-érték elveti a nullhipotézist, azaz hogy az idősor nem autokorrelált:

Ljung-Box próba

adatok: pályaeigenetlenségek idősora
X-négyzet = 2964.3, df = 50, p-érték < 2.2e-16

Tehát a teszt szignifikáns, azaz az adatok erősen autokorreláltak az 1–50 késleltetésszámokra, amint ez a 3. ábra alapján is egyértelműen kiderül (a függvényértékek túllépik a konfidenciahatárokat).

A későbbiekben származtatott statisztikai tulajdonságok érvényessége szempontjából követelmény, hogy a statisztikai jellemzők legyenek a mintavételi időponttól függetlenek. Ez az idő-invariancia megkívánja, hogy a folyamat eloszlásfüggvénye ne függjön a t_i időponttól, azaz legyen elsőrendűen stationárius, de legalább csak a $t_k - t_i$ időkülönbségtől függjön, azaz legyen gyengén, ill. másodrendűen stationárius. Egy $x(t)$ sztochasztikus folyamat akkor stationárius, ha az $x(t)$, $(t \in [t_1; t_2] \subset T)$ eloszlása független a $[t_1; t_2]$ kiválasztásától. A 2. ábra idősorának vizuális elemzése már valószínűsíti, hogy a folyamat stationárius, mivel középértéke (átlaga) és varianciája – utóbbi legalábbis közelítőleg – időben állandónak

tűnik. A sztochasztikus folyamat kismértékű heteroszkedaszticitást azonban bizonyosan tartalmaz.

A 2. ábrán látható idősor stacionaritására vonatkozó statisztikai próbákat a következőkben tárgyalom. Egy sztochasztikus folyamat stacionaritásának tesztelésére három próbacsaládot is kidolgoztak. A sztochasztikus folyamatban az egységgyök meglétét tesztelhetjük a kiterjesztett Dickey-Fuller (ADF), illetve a Phillips-Perron (PP) statisztika alapján. Ha a folyamat leírható véletlen bolyongásként, akkor az ún. Dickey-Fuller többszörös regressziós egyenletben a $H_0: \rho-1=0$ feltevés ellenőrzése az egységgyök meglétét teszteli. Amennyiben a nullhipotézist elvetjük, az idősor stacionáriusnak tekinthető. A PP teszt lényegében egy, a késleltetési autokorrelációval szemben robusztussá tett Dickey-Fuller statisztika, amely felhasználja a Newey-West [8] heteroszkedaszticitás- és autokorreláció-konzisztens kovariancia mátrix becslést. A KPSS teszt (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) során az idősort komponensekre bontjuk, oly módon, hogy a folyamat egy fehér zajt, egy determinisztikus trendet és egy stacionárius hibát tartalmazzon. A $H_0: \sigma^2=0$, azaz a fehér zaj varianciája zérus, továbbá a $\beta=0$, azaz nincsen determinisztikus trend, kiinduló hipotézisek tesztelésére az ún. KPSS próba-függvényt használjuk. A próba null-hipotézisének elfogadása azt jelenti, hogy az idősor stacionárius. Fontos megjegyezni, hogy amíg a KPSS teszt esetén a nullhipotézis elvetése az egységgyök meglétét, vagyis a stacionaritás hiányát jelenti, addig az ADF próbánál és a Phillips-Perron tesztnél a null-hipotézis elvetése a stacionaritás meglétére utal. A három próba futtatásának eredményei a következők, amik egyértelműen igazolják, hogy a vizsgált folyamatunk stacionárius folyamat:

Kiterjesztett (Augmented)
Dickey-Fuller próba

adatok: pályaegyenletlenségek idősora
Dickey-Fuller = -8.7286 ,
Késleltetési hossz
(Lag order) = 7, p-érték = 0.01
alternatív hipotézis: stacionárius

Phillips-Perron Egységgyök (Unit Root) próba

adatok: pályaegyenletlenségek idősora
Dickey-Fuller $Z(\alpha) = -92.886$,
Csonkított késleltetés = 6, p-érték = 0.01
alternatív hipotézis: stacionárius

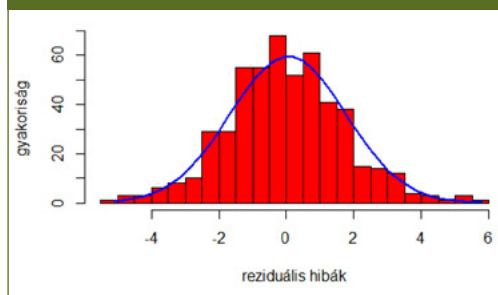
KPSS Stacionaritási Szint próba
(Level Stationarity)

adatok: pályaegyenletlenségek idősora
KPSS Level = 0.086948,
Csonkított késleltetés = 5, p-érték = 0.1

Az alkalmazható matematikai módszerek másik szükséges feltétele a folyamat ergodicitása. Ez azt jelenti, hogy a folyamat realizációiból ugyanazon t időpillanatban képzett csoportátlagnak meg kell egyeznie egy-egy T hosszúságú realizáció időbeli középértékével. Miután a folyamat csak egyetlen realizációja áll rendelkezésre, ezt nem lehet ellenőrizni, de hivatkozva a szakirodalom utalásaira az ergodikusnak tekinthető [9].

Most megvizsgáljuk, hogy az 1. ábra szerinti $x(t)$ folyamat vajon egy zérus várható értékű, konstans varianciájú, normális eloszlású sztochasztikus folyamatot reprezentál-e? A reziduális hibák hisztogramja a 4. ábra. Itt látható, hogy a folyamat egy majdnem tökéletes Gauss-folyamatnak tekinthető, szinte olyan, mintha ez a reprezentáció az elméleti normális eloszlás sűrűségfüggvényéből származna. A számítások alapján a minta átlaga: 0.0479, a minta varianciája pedig: 2.9405.

4. ábra: A folyamat reziduális hibáinak empirikus sűrűségfüggvénye (hisztogram)



Az ARIMA (AutoRegresszív Integrált Mozgó Átlagolás) típusú modellek az idősor zavaró hatásait leíró véletlen változók explicit kezelésére magukba foglalnak egy olyan statisztikai modellt, amely nem zérus értékű autokorrelációt is megenged. Az ARIMA modelleket stacionárius idősorokra dolgozták ki. A mindenkori állapotot a korábbi állapotokkal és különböző késleltetésű véletlen komponensekkel együttesen ragadják meg, így a véletlennek aktív szerepet biztosítanak. Az ARIMA (p, d, q) egy három paraméteres modell, amely az idősor jelenlegi értékét a saját előző értékeinek, továbbá a jelenlegi, illetve a múltbeli véletlen változók függvényében fejezi ki:

$$y_t = \theta_1 y_{t-1} + \dots + \theta_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \phi_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \phi_q \varepsilon_{t-q}, \quad (1)$$

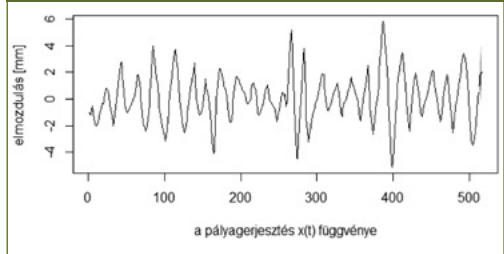
ahol p az autoregresszív tagok száma és q a késleltetett mozgó átlagolású tagok száma. Esetünkben $d=0$, mivel a differenciák módszerét nem kell alkalmazni az idősorra, hiszen az idősor már eredendően egy stacionárius folyamat, amit a statisztikai próbákkal igazoltam. Az **R** programcsomagban van egy beépített funkció, amely – optimalizálással – automatikusan kiválasztja a paraméterek rendszámát. Ennek alapján, az elmozdulásjelet (a pályaegyenetlenségeket) legjobban közelítő ARIMA modell az alábbi:

Idősor: pályaegyenetlenségek
 ARIMA(3,0,1) modell zérus várható értékkel
 Koefficiensek:
 ar1 ar2 ar3 má1
 2.1783 -1.5452 0.3141 -0.6752
 Standard hiba: 0.2001 0.3521 0.1720 0.1782
 Becsült szigma²= 0.1121:
 log likelihood=-166.48
 AIC=342.96 AICc=343.08 BIC=364.15

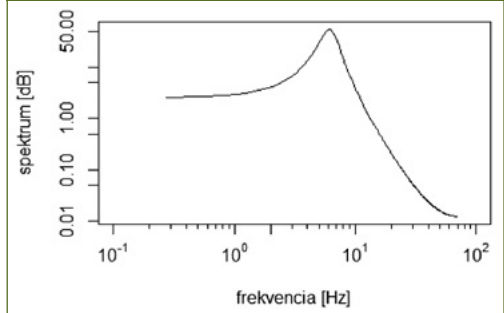
A paraméteres identifikálással előállított sztochasztikus folyamatot az 5. ábra mutatja be.

Az időtartománybeli vizsgálatok utolsó lépésekként, a pályagerjesztés paraméteresen becsült elmozdulásspektrumát a 6. ábra tartalmazza, ahol a frekvenciaösszetevőket logaritmikus decibel skála tartalmazza (arány [dB] = $10 \log_{10}$ (jel amplitúdója/referencia amplitúdója)).

5. ábra: Az ARIMA (3,0,1) modellel generált stacionárius folyamat



6. ábra: A pályagerjesztés paraméteres becsléssel előállított spektrális sűrűségfüggvénye



3. A VASÚTI PÁLYAGERJESZTÉS VIZSGÁLATA A FREKVENCIATARTOMÁNYBAN

3.1. A spektrális sűrűségfüggvény becslésének újabb módszerei; a probléma elméleti áttekintése

Ismert, hogy a lengő rendszerek átviteli tulajdonságai frekvenciafüggőek, ezért célszerű a diszkrétizált pályaegyenetlenség függvény további vizsgálatait frekvenciartományban elvégezni. A folyamatok frekvenciaösszetevőik szerinti jellemzésére a spektrális sűrűségfüggvény, a PSD (power spectral density) a legalkalmasabb statisztika, mivel a jel változásának a sebessége a jel spektrumával van szoros összefüggésben. Egy időfüggő mintasorozat frekvenciák szerinti dekompozíciója már régóta ismert módszer. A tanulmány néhány újabb eljárást mutat be, ami a spektrum (esetünkben a pályagerjesztés elmozdulásspektruma) pontosabb meghatározását teszi lehetővé.

Egy (legalább másodrendben) stacionárius, sztochasztikus $x(t)$ jelnek az $S_x(f)$ spektrális sűrűségfüggvénye a jel egységnyi sáv szélességre eső varianciáját adja meg. Az $S_x(f) df$ jel energiaszintje, egy df szélességű keskenysávú szűrőn való áteresztése után, centrálisan az f frekvenciára központosítva. A feladat a véges hosszúságú jel spektrális sűrűségfüggvényének a becslése. Az időtartományból a frekvenciatartományba történő áttérés kiindulópontja a diszkrét Fourier-transzformáció végrehajtásával meghatározható periodogram:

$$\hat{S}_x(k\Delta f) = \frac{1}{T} \left| \sum_{j=0}^{N-1} x_j \exp \frac{2\pi i j k}{N} \right|^2, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2}, \quad (2)$$

ahol T az N mintaelemet tartalmazó x_j mintasorozat hossza és $\Delta f = 1/T$. Jól ismert, hogy ezek a becslések nem kielégítőek, a varianciájuk nagy, sok bizonytalanságot tartalmaznak, és általában nem az eredeti jel valódi spektrumát határozzák meg. Ezen túlmenően fellép a spektrumszivárgás, más szóval az átfolyás jelensége (leakage), azaz a csúcsoknál a spektrum egy széles frekvenciatartományban szétterjed, ami amplitúdó pontossági hibát okozva elfedheti a szomszédos frekvenciacsúcsokat is. Alapvető cél a mintavételezett jel spektrális karakterisztikájának javítása, a jelsorozat véges voltából bekövetkező korlátok áthidalása, elsősorban a spektrális szóródás redukálása. Erre a problémára leginkább simító ablakozási technikát (tapering) szokás alkalmazni, ami a gyakorlatban azt jelenti, hogy az $x(t)$ jelet megszorozzuk egy gondosan megválasztott $\phi(t)$ ablakfüggvénnyel mielőtt végrehajtanánk a numerikus Fourier-transzformációt. Az így nyert spektrum a periodogram $|\Phi(f)|^2$ által generált konvolúciója, ahol a $\Phi(f)$ a $\phi(t)$ Fourier-transzformáltja. A szakirodalom tele van különféle ablakfüggvények ajánlásával, de általánosan elfogadott tény, hogy az energiaszivárgás megszüntetésének leghatékonyabb (optimális) módja a Slepian által javasolt forgási ellipszoid függvény (prolate spheroidal function) alkalmazása [10].

Az ablakozási technika azonban semmivel sem járul hozzá ahhoz, hogy a periodogrammal történő becslés varianciáját csökkentjük. A

megfigyelések várható értékének becslésére különféle átlagolási módszereket alkalmazhatunk. Az egyik legnépszerűbb eljárás Welch módszere [11]. E módszer hátránya viszont, hogy az idősor megrövidítése miatt az alacsony frekvenciájú jelek elvesznek a sok átlagolás következtében, továbbá, a varianciacsökkentés és a felbontás mértéke valamennyi frekvenciára azonos kell legyen.

Szakirodalmi evidenciák alapján a leghatásosabb technika a többszörös ablakozás módszere (multitapering), amellyel a spektrális torzítás (bias) és a variancia szimultán módon csökkenthető. Thomson [12] megmutatta, hogy ha egy T hosszúságú mintasorozatra olyan, ortogonális ϕ_k függvényekkel ablakozunk, amelyek kielégítik az alábbi integrálegenletet

$$\int_0^T \prod_{k=1}^M \phi_k(t) dt = 0, \quad (3)$$

akkor hatékonyan átlagolható, statisztikailag független periodogramok halmazát kapjuk. Ilyen ortogonális függvények például a boxcar függvények (négyszögfüggvény). Viszont sajnos, az így ablakozott periodogramoknál a spektrális torzítás egy másik formája jelenik meg, éspedig a görbületi torzítás (curvature bias) jelensége. Ez egy lokális hiba, amely ellaposítja a spektrum csúcsait. Ezzel a problémával Riedel és Sidorenko [13] behatóan foglalkoztak. A két szerző egy egyszerű szinuszos függvénycsaládot javasolt a konvolúció végrehajtására, amely képes a görbületi torzítás mértékét köztöltőleg minimalizálni:

$$\phi_k(t) = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin \frac{k\pi t}{T}, \quad 0 \leq t \leq T, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

Minden egyes diszkrét frekvenciánál igyekeztek meghatározni a lehető legkisebb átlagos négyzetes hibát (mean square error - MSE) eredményező ablakszámot. Az MSE, a β^2 spektrális torzítás négyzetének és a v varianciának az összege. Mindkét mennyiség

gyengíti a spektrális becslés hatásosságát. Az MSE értékére az alábbi közelítő formulát kapták [13]:

$$L = \beta^2 + v\{\hat{S}(f)\} = \frac{S''(f)^2 K^4}{576T^4} + \frac{S(f)^2}{K}, \quad (5)$$

ahol a K az átlagolandó ablakozott periodogramok száma és az $S''(f)$ a spektrális sűrűségfüggvény frekvencia szerinti második deriváltja. Egyszerű differenciálással könnyen belátható, hogy a szükséges ablakok azon száma, amely mellett az átlagos négyzetes hiba (MSE) minimális:

$$K_{\text{opt}}(f) = \left(\frac{12T^2 S(f)}{|S''(f)|} \right)^{2/5} = 2.7019 \left(\frac{T^2 S(f)}{|S''(f)|} \right)^{2/5}. \quad (6)$$

Megjegyzem, hogy a K_{opt} szimultán módon való kiszámítása – analitikus megoldás hiányában – iteratív úton történhet, kiindulva a spektrum egy kezdeti első becsléséből (pilot spectrum). A (6) egyenlet nevezőjében lévő, a spektrum $S''(f)$ második deriváltja zérussá válásának elkerülésére (mivel ebben az esetben végtelen számú ablakra lenne szükség), Barbour és Parker [14] a spektrum Taylor-sorba fejtését és a deriváltakra bizonyos egyenlőtlenségi feltételek bevezetését javasolták.

A (6) egyenlet lehetővé teszi a spektrális felbontás és a variancia egyensúlyának valamennyi frekvenciánál történő automatikus beállítását, mégpedig kevert, keskeny- és szélessávú szűrés esetén is. Ezért az ilyen, a spektrum alakjához illeszkedő becslést adaptív becslésnek nevezik. A szinuszos, többszörös ablakozású módszer további előnye, hogy a teljes mintasorozatra elegendő a gyors Fourier-transzformáció (FFT) egyszeri végrehajtása. Ez a módszer képes a spektrumszivárgás mérsékelt csökkentésére is, de jóval kisebb mértékben mint a Slepian függvények.

A periodogram $|\Phi(f)|^2$ négyzetes Fourier-transzformáltja által generált konvolúciója [15] ugyan az ablakozással ellaposítja a spektrum csúcsait, viszont redukálja azt az energiát, ami egyébként a csúcstról a szomszédos

frekvenciákra folya át. Ennélfogva csorbítja a spektrális torzítás (leakage) mértékét. A (4) kifejezésben definiált szinuszos ablakozással a simító kernel függvény az alábbi alakban írható fel [13]:

$$|\Phi_k(f)|^2 = \frac{2Tk^2}{(k + 2Tf)^2} \text{sinc}(Tf - k/2)^2. \quad (7)$$

A spektrális kernel vagy simító kernel értelmezése az, hogy véges elemszámú mintából hogyan lehet nemparaméteres becsléssel megadni egy valószínűségi változó sűrűségfüggvényét. Ily módon ez egy olyan szimmetrikus függvénné válik, amelynek a központi része (első szárnya) közelítőleg $k\Delta f$ szélességű és a (6) egyenletből láthatóan elenyészik (lecseng) ezen a tartományon kívül.

A többszörös ablakozással (multitaper) elvégzett konvolúció után, a periodogramok átlagolásával nyerjük a spektrálsűrűség becslését. A periodogramok azonban érzékenyek a nagyobb k értékekre (a spektrum egyenlően felosztott kicsiny intervallumai; bucket), vagyis amelyek távolabb vannak a központi frekvenciától. Riedel és Sidorenko egy kvadratikus súlyozási sémát dolgozott ki, amely kisebb súlyszámot rendel a távolabbi, külső tagokhoz [13]:

$$\hat{S}_x(f) = \sum_{k=1}^K N_k^{-1} [K^2 - (k-1)^2] \hat{S}_k(f) = \sum_{k=1}^K \mu_k \hat{S}_k(f), \quad (8)$$

ahol $\hat{S}_k(f)$ a $\phi_k(t)$ ablakfüggvénnyel ablakozott periodogram és $N_k = K(4K-1)(K+1)/6$. A kvadratikus súlyozással az optimális ablakszám is némileg megváltozik [13]:

$$K_{\text{opt}}(f) = 480^{1/5} \left(\frac{T^2 S(f)}{|S''(f)|} \right)^{2/5} = 3.4375 \left(\frac{T^2 S(f)}{|S''(f)|} \right)^{2/5}. \quad (9)$$

A teljes összegre vonatkozó effektív spektrális kernel az alábbi súlyozott átlag formájában adódik [13]:

$$U_k(f) = \sum_{k=1}^K \mu_k |\Phi_k(f)|^2. \quad (10)$$

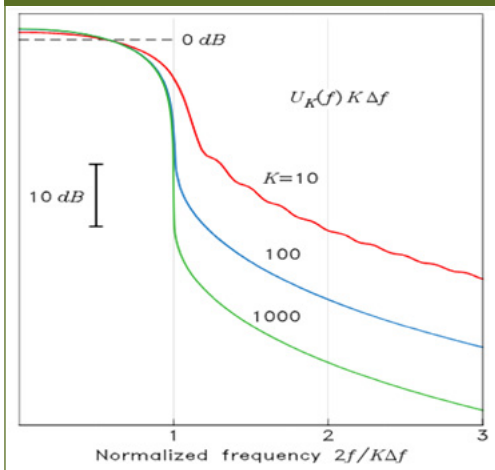
A (10) alatti függvényt a Barbour és Parker nyomán [14] készült 7. ábrán szemléltetem. Ebben jól érzékelhető, hogy az $U_k(f)$ kernel szélessége $K\Delta f$, ami nem más mint a becslés spektrális felbontása. Az is megfigyelhető, hogy a spektrális energia központi sávon kívül eső azon része, amely a spektrális szóródáshoz hozzájárul, az ablakok számának növelésével csökkenő tendenciát mutat.

Mivel a K darab periodogramból történő becslések statisztikailag függetlenek, könnyen megmutatható, hogy a kvadratikussúlyozással a végső becslés varianciája közelítőleg az alábbi alakban írható fel:

$$v\{\hat{S}(f)\} = \frac{6S(f)^2}{5K}, \quad (11)$$

feltéve, hogy az idősor Gauss-eloszlást követ (a pályaeigenetlenségeket leíró sztochasztikus folyamat normális eloszlású), amit azonban már a 2. fejezetben beláttunk. Ekkor az aszimptotikusan torzítatlan becsléssel származtatott \hat{S} függvény egy $2K$ szabadságfokú χ^2 eloszlást reprezentál. A spektrális sűrűségfüggvény adaptív módon történő becslése jóval kisebb varianciát eredményez, mint a nem adaptív becslések.

7. ábra: Effektív spektrális kernel a (10) egyenlet alapján, [14] nyomán. Normalizált frekvencia $2f/K\Delta f$ (Normalized frequency)



Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a felhasznált mentesül a különböző beállításoktól, így például az idő-variancia és a frekvencia-variancia szorzat kijelölésétől (time-bandwidth product), ami az idő- és a frekvenciatartományok lokalizációjának az összehangolását biztosítja. Az adaptív eljárásnál automatikusan rugalmas, frekvenciafüggetlen spektrális felbontás történik, igazodva a spektrum aktuális alakjához. Az adaptív, szinuszos, többszörös ablakozással történő spektrális becslés további fontos sajátossága, hogy nagyon erős az átlagolási funkciója, hiszen nem ritka, hogy a K értéke többszáz azokban a tartományokban, amelyekben az S_x spektrális sűrűségfüggvény csúcsa lapult.

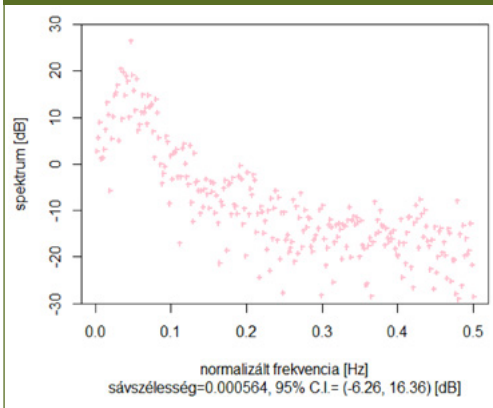
3.2. A spektrális sűrűségfüggvény nemparaméteres becslésének gyakorlata

Ebben a pontban a nemparaméteres spektrális becslés előző pontban tárgyalt néhány újabb módszerének alkalmazása látható a 2. ábrán, német fővonali vasúti pályán felvett, a pályagerjesztést reprezentáló sztochasztikus idősornak a felhasználásával. A számítások elsődrendű célja a pályagerjesztés spektrális sűrűségének a becslése (elmozdulássciklum). Figyelembeveendő, hogy csak egyetlen realizáció áll rendelkezésre, ami azt jelenti, hogy a teljes pályáról hibátlan következtetések nem vonhatók le. A nemparaméteres módszerek nem állítanak fel semmilyen feltételt arra vonatkozóan, hogy az adatokat miként generáltuk. Kiindulunk a mérőkocsival rögzített empirikus adatsorból. Az alapkérdés az, hogy a jel teljes energiatartalma hogyan oszlik el a vizsgált tartományban az egyes frekvenciákra. A stationárius, véges hosszúságú mintasorozatot egy keskeny sáv szélességű szűrőn a lényeges frekvenciasávokon át eresztjük, majd a szűrt energia kimenőjelét elosztjuk a szűrő sáv szélességével, ami a bemenő jel spektrális energiatartalmát jellemzi. A mintasorozat véges volta következtében ezeknél a módszereknél az elérhető frekvenciafelbontás az N hosszúságú ablak spektrális szélessége, ami hozzávetőlegesen $1/N$. A jelfeldolgozás során, a számítások és a

grafikus megjelenítések támogatásához, az **R** programkönyvtár **psd** programcsomagját használjuk fel [16].

Első lépésként előállítjuk az $N=512$ mintaelem pontspektrumát. Ezt azért célszerű megtenni, hogy ellenőrizzük, vajon a mintavétel, illetve a kvantálás során nem követtünk-e el súlyosabb mérési vagy leolvasási hibát, mert ez erősen torzítaná a végső spektrum alakját is. A 8. ábra alapos tanulmányozása alapján megállapítjuk, hogy az adatsor nem tartalmaz durván kiugró, extrém értékeket (outliers).

8. ábra: A pálya mintavétellel nyert fekszint hibáinak a pontspektruma



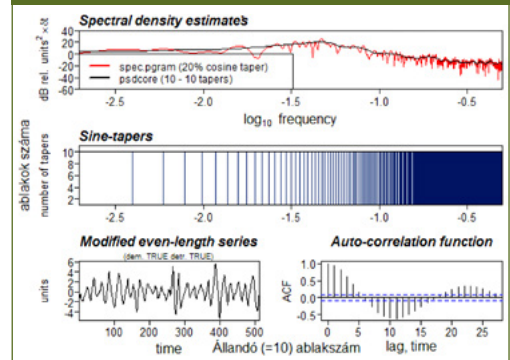
Következő lépésként a **pspectrum** és a **psdcore** programokkal összehasonlítjuk az adaptív, szinuszos, többszörös ablakozású spektrumbecslési módszerrel előállított spektrumot egy koszinuszos ablakozással meghatározott periodogrammal. A 9. ábrán, rögzített számú ablakot (10-10 ablak minden egyes frekvenciánál) alkalmaztunk, amíg a 10. ábrán, adaptív módon, változó számú ablakot használtunk. A két ábrából jól érzékelhetően kitűnik, hogy utóbbi esetben sokkal jobb minőségű spektrumot tudtunk előállítani, különösképpen a kisebb hullámhosszak tartományában. Evidens, hogy ez a módszer a koszinuszos eljárással generált periodogramot lényegesen felülmúlja.

A **pspectrum** program minden alkalmazásnál először kiszámít egy kiinduló spektrumot (pilot spectrum), amely az adaptív becslési

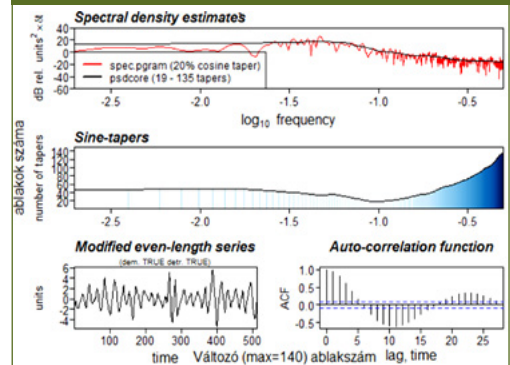
rutin kezdeti lépése (11. ábra). Ezután finomhangolt ablakozási műveletekkel, a spektrális deriváltak sorozatos kiszámításával generálja a további spektrumokat. Ennélfogva az ablakok számának a változása fogja meghatározni azt, hogy hány adaptív fokozatra van szükség. A számítási módszer, a szükséges ablakok számát mindegyik iterációnál a spektrum alakjától függően fogja a K_{opt} optimális-hoz (lásd (9) formula) igazítani. Esetünkben már kevés számú (öt) iteráció után az eredmény stabilizálódik, jelentősen redukálva az átlagos spektrális varianciát (Ave. S.V.R.):

- Iteráció: 0. becslés (Ave. S.V.R. -9.3 dB)
- Iteráció: 1. becslés (Ave. S.V.R. -15.8 dB)
- Iteráció: 2. becslés (Ave. S.V.R. -17.8 dB)
- Iteráció: 3. becslés (Ave. S.V.R. -19.4 dB)
- Iteráció: 4. becslés (Ave. S.V.R. -20.3 dB)

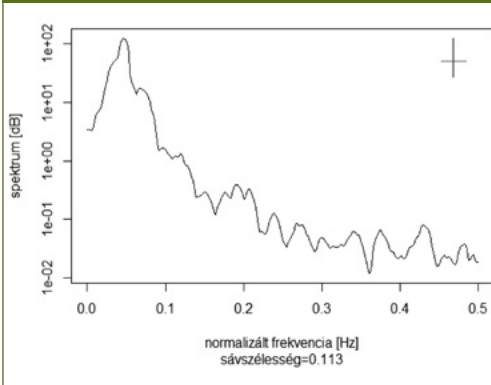
9. ábra: Ablakozás minden frekvenciánál állandó ablakozással



10. ábra: Ablakozás minden frekvenciánál változó ablakozással

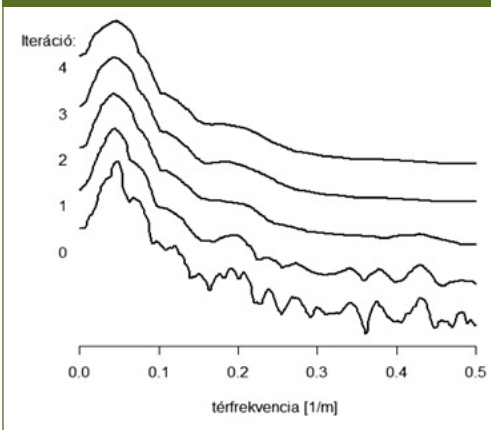


11. ábra: Kiinduló (pilot) spektrum



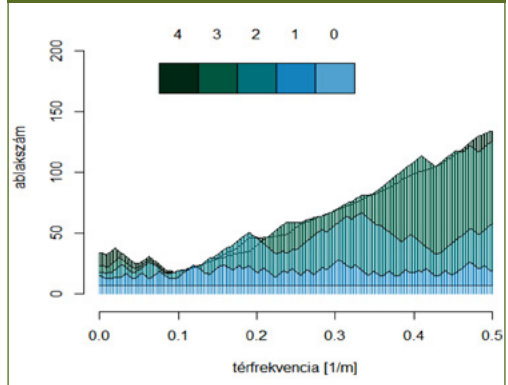
Az iteráció lépései és erőteljes hatása a variancia fokozatos csökkentésére a 12. ábrán is jól érzékelhető. Ehhez a simító ablakok számát a kis hullámhosszúságú sávokban 140-re kellett növelni a 13. ábra szerint.

12. ábra: A variancia csökkenése az iteráció egyes lépéseinél

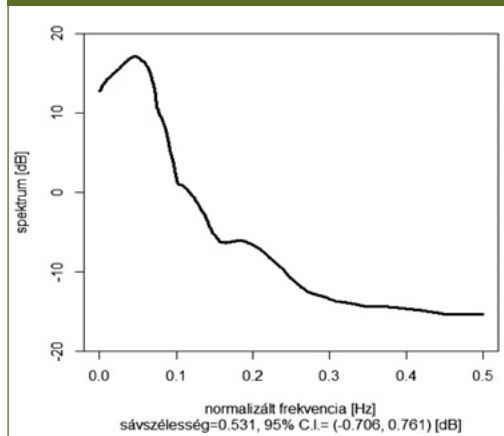


A vasúti pályagerjesztés végső spektrális sűrűségfüggvényét (4. iteráció), az elmozdulásspektrumot, a 14. ábra mutatja. Ez a spektrum, a járműrendszer átviteli frekvencia karakterisztikájával együttesen alapot nyújt a válaszfüggvények meghatározásához, és ezzel elősegíti a szerkezeti elemek dinamikai méretezését, valamint közvetve, a környezetet érő zajterhelés csökkentését.

13. ábra: A simító ablakok számának a szükséges növelése



14. ábra: A pályagerjesztés spektrális sűrűségfüggvénye (elmozdulásspektrum)



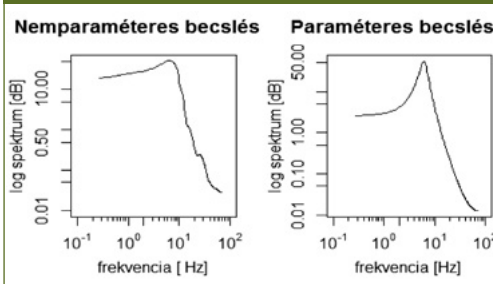
A spektrum tömör értékelése az alábbi:

- A spektrális sűrűségfüggvény egyenes vonalú pályán való haladáskor, egyenletes, 200 km/h járműsebesség esetén érvényes.
- A spektrumfüggvény folytonos.
- A spektrum a mintavételezés módja miatt nem torzításmentes.
- Az átfogható frekvenciatartomány: 0.38–88.88 Hz, azaz 146.2–0.625 m hullámhossztartomány.
- Magasabb frekvenciák, azaz kisebb hullámhosszak esetén a hiba összetevőinek amplitúdói egyre csökkennek.

- A legnagyobb amplitúdójú összetevők a 4–8 Hz frekvencia, azaz a 13.88–6.94 m hullámhossztartományba esnek.

Amennyiben a nemparaméteres és a paraméteres eljárással előállított spektrumfüggvényeket egymás mellé rajzolva együttesen ábrázoljuk – a vízszintes tengelyen is logaritmikusan léptéket alkalmazva – akkor nyilvánvalóvá válik a különböző módon generált spektrumok szembetűnő hasonlósága (15. ábra).

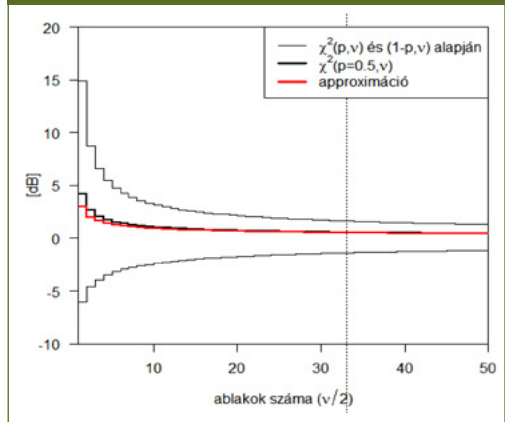
15. ábra: A pályagerjesztés nemparaméteres és paraméteres becslésével előállított spektrumfüggvényei



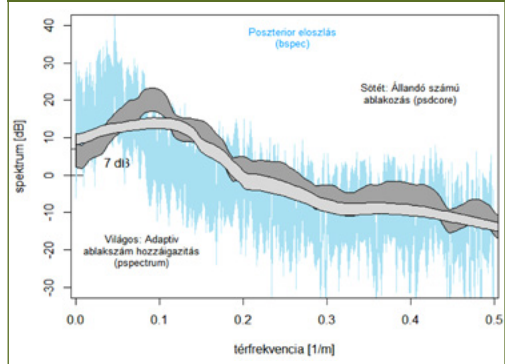
A továbbiakban az adaptív, többszörös, szinuszos ablakfüggvénnyel végzett spektrális becslés néhány értékes tulajdonságát illusztráljuk. Az aszimptotikusan torzítatlan becslés $2K$ szabadságfokú χ^2 eloszlással közelíthető bizonytalanságai miatt fontos azok statisztikai határait kijelölni. Ennek szemléltetésére szolgál a 16. ábra, ahol az ablakok K számának növekvő $[0-50]$ sorozatára, 95%-os konfidencia intervallumokat határoztunk meg. A többszörös ablakozás előnye az ábra alapján azonnal világossá válnak a fokozatosan csökkenő bizonytalanság következtében. A függőleges szaggatott vonal azt jelöli ki, hogy 33 ablak alkalmazásával a bizonytalanság már jelentősen, mintegy 3 dB értékűre csökkenthető.

Ebből a szempontból a módszer más becslési eljárásokat is jelentős mértékben felülmúl. A 17. ábrán a kitöltött tartomány a 16. ábra felső korlátja alapján felvett 95%-os konfidencia intervallumnak felel meg. A világosabb és a sötétebb régiók a spektrálsűrűségek bizony-

16. ábra: A becslés bizonytalanságának csökkenése az ablakok számának a növekedésével



17. ábra: Az adaptív becslés szűkebb bizonytalansági intervallumai más eljárásokéhoz viszonyítva



talanságait jelenítik meg ablakozással, illetve ablakozás nélkül történő becslés esetén.

Két kívánatos tulajdonság, az ablakok száma és a frekvencia felbontás (lényegében a spektrális sáv szélesség) között sajátos egyensúly van. Ha az alkalmazott ablakok száma nagyobb, akkor kisebb a spektrális felbontás. A 18. ábra vizuálisan megjeleníti a spektrális felbontási képesség különbségeit az adaptív módszer esetében, viszonyítva azt a rögzített ablakszámmal operáló módszerhez képest úgy, hogy a változásokat százalékban fejezem ki. A nemzérus median érték ($Me=4.2$) azt jel-

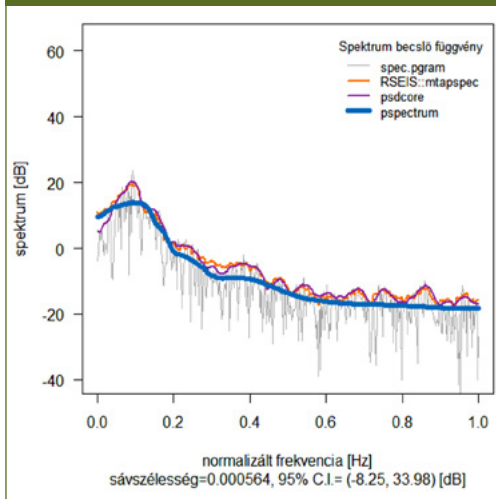
zi, hogy a kiinduló spektrum előállításához az optimalizáló algoritmus szerint túl kevés ablakot alkalmaztunk. Az ábrán a pozitív értékek egyre szélesebb frekvenciasávokat jelölnek ki.

18. ábra: A spektrális felbontási képesség változása



Végül, a 19. ábrán összehasonlítjuk az adaptív, többszörös, szinuszos ablakfüggvény-nyel előállított spektrum alakját több más, az **R** programcsomag által tartalmazott módszer által generált spektrális sűrűségfüggvénnyel. A 19. ábra tanulmányozása alapján egyértelművé válnak a **pspectrum** program által nyert spektrális becslésnek (PSD) az előzőekben tárgyalt előnyös tulajdonságai.

19. ábra: Különböző módszerekkel előállított spektrumfüggvények összehasonlítása



4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vasúti személy- és áruszállítással szemben támasztott növekvő mennyiségi és minőségi igények indokoltá teszik a pályadiagnosztikai állapotfelmérések gyakoribb alkalmazását. Ugyanis a kerék-sín kapcsolatnál fellépő erők okozta rezgések jelentősen hozzájárulnak a meglévő vasúti pályák erőteljes elhasználódásához és a környezeti zajterhelés fokozódásához. Ezek kiváltó okai a növekvő statikus tengelyterhelés és a pályaegyenetlenségek következtében ébredő dinamikus erőhatások. A tanulmányban, üzemszerű körülmények között, mérőkocsival felvett mérési regisztrátum alapján bemutatásra kerültek a vertikális elmozdulásjel korszerű feldolgozásának paraméteres (időtartománybeli) és nemparaméteres (frekvenciartománybeli) módszerei, beleértve néhány, a szakirodalomból ismert újabb eljárást is. A vizsgálatok az **R** programozási nyelv felhasználásával készültek. Rögzíthető, hogy az adaptív, szinuszos, többszörös ablakozású módszer pontosabb és megbízhatóbb eredményeket szolgáltat a gerjesztés spektrális sűrűségfüggvényének a becslésére, mint a korábban használt, hasonló célzatú technikák. Erre alapozva javasolható a bemutatott vizsgálatok kiterjesztése hosszabb, 500–1000 m-es pályaszakaszokra.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. (2004) A theoretical model for ground vibration from trains generated by vertical track irregularities, *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5):937-965. DOI: <http://doi.org/fvh37k>
- [2] Thompson D.J. (2009) *Railway noise and vibration – Mechanisms, modelling and means of control*, Elsevier, p. 518.
- [3] Kaewunruen S., Remennikov A. (2008) Dynamic properties of railway track and its components: a state-of-art review, *Research Online, Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia*, p. 35.
- [4] Sun W., Zhou J., Gong D., You T. (2016) Analysis of modal frequency optimization of railway vehicle car body, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(4):1-12. DOI: <http://doi.org/f8nc3r>
- [5] Carlbom P. (2000) Carbody and passengers in

- rail vehicle dynamics, PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Department of Vehicle Engineering, Stockholm, p. 107.
- [6] Erhard F., Wolter K.U., Zacher M. (2009) Improvement of track maintenance by continuous track monitoring with regularly scheduled high speed trains, Railway Engineering, 10th International Conference, 24-25 June, London.
- [7] Nielsen J., Berggren E., Lölgen T., Müller R., Stallaert B., Pesqueux L. (2013) Overview of methods for measurement of track irregularities important for ground-borne vibration, UIC Collaborative Project Report, RIVAS_CHALMERS_WP2_D2_5, p. 49.
- [8] Newey W.K., West K.D. (1987) A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix, *Econometrica*, 55(3):703-708., <https://www.jstor.org/stable/1913610>,
- [9] Zobory I. (1994) Sztochasztikus folyamatok, Tanulmánykötet, Budapesti Műszaki Egyetem, Járműgépészeti Intézet, Budapest, p. 128.
- [10] Slepian D. (1961) Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty, Bell System Technical Journal, Volume 40, pp. 43-64. DOI: <http://doi.org/gc93jw>
- [11] Welch P. (1967) The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2):70-73. DOI: <http://doi.org/fjndmb>
- [12] Thomson D.J. (1982) Spectrum estimation and harmonic analysis. In: Proceedings of the IEEE, Volume 70, Bell Laboratories, pp. 1055-1096.
- [13] Riedel K., Sidorenko A. (1995) Minimum bias multiple taper spectral estimation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 43(1):188-195. DOI: <http://doi.org/c6bt59>
- [14] Barbour A.J., Parker R.L. (2014) Adaptive sine multitaper power spectral density estimation for R, *Computers and Geosciences*, 63():1-8. DOI: <http://doi.org/f5qjxb>
- [15] Percival D., Walden A. (1993) Spectral Analysis for Physical Applications, Cambridge University Press.
- [16] Barbour A.J., Parker R.L., Myer, D. (2016) Package 'psd' - CRAN.R-project.org, p. 50.



Processing of railway track diagnostics data using the program package R

The worldwide increase in frequency of traffic for passenger trains and the rise of freight trains over the recent years necessitate the more intense deployment of track monitoring and rail measurement procedures. The wheel-rail contact forces have been a significant factor contributing to the deterioration of the railway track system. Ground vibration and noise are generated either by static axle loads moving along the track or by the dynamic forces arising from wheel and track irregularities. In this paper a track record, obtained by a track recording coach under real railway traffic operations, was utilized. The statistical data processing of the vertical displacement signal using both parametric (in the time-domain) and nonparametric (in the frequency-domain) methods was demonstrated, including some up-to-date techniques as well. For our investigations, the program package R was applied. We have found that the adaptive, sine multitaper spectral density estimates possess more accurate and reliable outcomes than the traditional estimators have been widely used so far. In the future, it may be proposed the measurements to be extended to longer (500 – 1000 m) track records.



Bearbeitung von Gleisdiagnosedaten mit dem Programmpaket R

Die weltweite Zunahme der Häufigkeit des Verkehrs für Personenzug und der Anstieg der Güterzug in den letzten Jahren erfordern den intensiveren Einsatz von Überwachungsverfahren und Gleiszustandmessung. Die Rad-Schiene-Kontaktkräfte waren ein wesentlicher Faktor für die Verschlechterung des Eisenbahngleis Systems beitragen. Bodenschwingungen und Geräusche werden erzeugt entweder durch statischen Achslasten entlang der Schiene oder durch die dynamischen Kräfte von der sich bewegenden Rad und Gleisunregelmäßigkeiten ergeben. In dieser Arbeit wurde eine Erfolgsbilanz verwendet, die von einem Strecke Recording Trainer unter realen Eisenbahnverkehrsoperationen erhalten wurde. Die statistische Datenverarbeitung des Vertikalverschiebungssignals unter Verwendung von sowohl parametrischen (im Zeitbereich) als auch nichtparametrischen (im Frequenzbereich) Verfahren wurde demonstriert, einschließlich einiger neuer Techniken. Für unsere Untersuchungen wurde das Programmpaket R angewendet. Wir haben gefunden, dass die adaptive, sinus Multitaper Spektraldichte Schätzungen besitzen genauere und zuverlässigere Ergebnisse als die traditionelle Schätzer weit bisher verwendet. In Zukunft kann es die Messungen vorgeschlagen werden, um länger Streckenrekord (500 - 1000 m) ausgedehnt werden.