

VASÚTI VONTATÓJÁRMŰVEK HAJTÁSRENDSZERÉNEK TERHELÉSI VISZONYAI

ZOBORY István

Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar
Járműgépészeti Intézet

Bevezetés

A vasúti vontatójárművek hajtásrendszerei a rendeltetésszerű működés során sztochasztikus terhelési viszonyok között üzemelnek. A járműtervezés és az üzemeltetés számos olyan kérdést vet fel, amelyet csak a sztochasztikus terhelési folyamat jellemzőinek ismeretében lehet megoldani. Jelen tanulmányban célul tűzzük ki a terhelési viszonyok sztochasztikus szkéma keretében történő elemzését, melynek során áttekintjük a hajtásrendszer állapotjellemzésének kérdését, és kijelöljük azokat a jellemző mennyiségeket, amelyek statisztikai vizsgálatával kép alkotható a hajtásrendszer terhelési állapotainak valószínűségeloszlásáról. Ismertetjük a végrehajtott üzemi mérések eredményeként adódó eloszlásjellemzőket, a korrelációs, spektrális és koherenciajellemzőket, valamint az állapotjellemzők statisztikus függőségével kapcsolatos kérdéseket. Végül rövid kitekintést adunk a terhelésállapot-eloszlás ismeretében megoldható konstrukciós és üzemeltetési analízis- és szintézisproblémákról.

A hajtásrendszer állapotjellemzése

Valamely vontatójármű pillanatnyi üzemállapotát egyértelműen meghatározó véges számú fizikai mennyiség együttesét — a vontatójármű üzemi jellemzőit — az adott időpillanathoz rendelt állapotvektorral adhatjuk meg. Jelölje T_0 a vizsgált jármű élettartamát és tegyük fel, hogy az állapotok egyértelmű leírásához r számú üzemi jellemző időbeli alakulását kell figyelemmel kísérnünk. Ekkor a $t \in T_0$ időponthoz rendelt állapotvektort jelölje $\mathbf{a}(t)$. Vizsgálatunkban feltételezzük, hogy az $\mathbf{a}(t)$ vektor $a_i(t)$; $i = 1, 2, \dots, r$ koordinátáinak száma minimális abban az értelemben, hogy közöttük már nincs determinisztikus függvénykapcsolat [1], [2]. A vontatójármű $\mathbf{a}(t)$ állapotvektorának bizonyos komponensei a hajtásrendszer terhelési viszonyait jellemzik. Jelölje az ezen komponensekből alkotott vektort $\mathbf{g}(t)$, amely n — dimenziós ($n \leq r$), és amelyet mindig $\mathbf{a}(t)$ első n komponenseként tekinthetünk. A vontatójármű hajtásrendszerének terhelési állapotát akkor tekinthetjük meghatározottnak ha a hajtáslánc valamennyi keresztmetszetén megadható a pillanatnyi nyom-

ték és fordulatszám értéke. A $g(t)$ vektor koordinátái ily módon nyomaték- és fordulatszám-koordináták lesznek, és szerepelhetnek még bizonyos információ-hordozó koordináták is. Így $g(t)$ a következőképp particionálható:

$$g(t) = [M(t), n(t), i(t)]^* \quad (1)$$

Az (1)-ben $M(t)$ a nyomatékok j dimenziós, $n(t)$ a fordulatszámok k dimenziós, $i(t)$ pedig az információhordozók l -dimenziós vektorösszetevője, és érvényes a $n = j + k + l$ egyenlőség. A $g(t)$ vektor a hajtásrendszer terhelésállapotvektorának alapváltozata, és $a(t)$ részvektora lévén maga is „minimális”, tehát összetevői között determinisztikus függőség nem áll fenn. A hajtásrendszer terhelési viszonyainak vizsgálata szükségessé teszi, hogy a $g(t)$; $t \in [0, T] \subseteq T_0$ időfüggvényt empirikusan, mérések végzésével meghatározzuk. Az empirikus vizsgálat a vontatójármű napi üzemének megzavarása nélkül csak nagyon nehezen valósítható meg, mert a $g(t)$ nyomatéki összetevőinek üzem közbeni regisztrálása igen körülményes. Ismerve azonban a hajtásrendszerben szereplő gépek jelleggörbéit, bevezethető az

$$x(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^* \quad (2)$$

állapotvektor, amellyel $g(t)$ egyértelműen

$$g(t) = f[x(t)], t \in [0, T] \subseteq T_0 \quad (3)$$

alakba írható. Az $x(t)$ vektor koordinátáit úgy választjuk meg, hogy azok a $g(t)$ koordinátáival ismert függvénykapcsolatban álló jellemzők legyenek, amelyek már regisztrálással könnyen meghatározhatók.

A fentiekben elmondottakat konkretizálva elmondható, hogy a vasúti vontatójárművek többségénél a hajtásrendszer terhelési állapotát a rövid ideig tartó gyors tranziens folyamatoktól eltekintve jellemezni lehet az M_K kerületi nyomaték, az M_{SG} segédgépnyomaték, az n_K kerékfordulatszám és az i fokozatjelzőszám alkotta

$$g = [M_K, M_{SG}, n_K, i]^* \quad (4)$$

vektor megadásával (az időfüggés jelölését az egyszerűbb írásmód kedvéért elhagytuk), amennyiben a hajtásrendszerben szereplő gépegységek átviteli jellemzői ismertek. Ekvivalens állapotjellemezés adódik, ha az M_K nyomatékat a Z kerületi vonóerővel, az n_K fordulatszámot a V sebességgel reprezentálva a g -vel lineáris kapcsolatban levő

$$\tilde{g} = [Z, M_{SG}, V, i]^* \quad (5)$$

vektort tekintjük. A gyakorlat igényeinek megfelelő egyszerűbb, jól közelítő állapotjellemezéshez jutunk, ha a legtöbb esetben megengedhető módon az M_{SG} nyomatékat a konstans közepes értékével vesszük figyelembe, és a sebességi fokozatok között automatikus átkapcsolást tételezzünk fel. Ebben az esetben

a hajtásrendszer terhelési állapotát a

$$\tilde{g}^* = [Z^*, V]^* \tag{6}$$

vektor jellemzi, ahol Z^* a közepes segédgépnymaték melletti kerületi vonóerő.

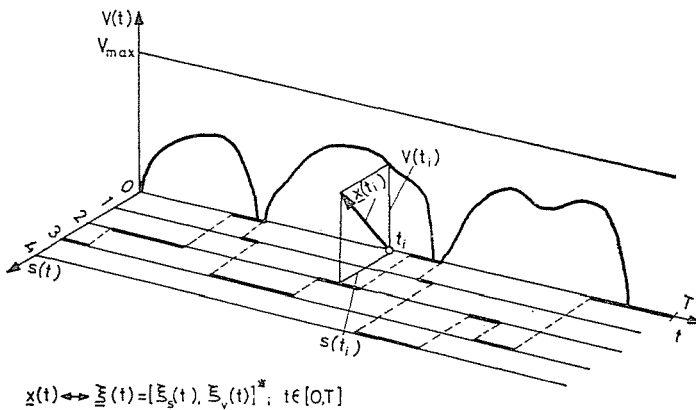
Mivel Z^* a tényleges üzemben nehezen mérhető, viszont a vontatójármű $Z^* = f(s, V)$ jelleggörbéje mindig ismert (itt s a teljesítménypozíció jelzőszáma, a vezérlési jellemző), a közelítő állapotleírás az

$$x = [s, V]^* \tag{7}$$

terhelésállapot-vektor megadására vezethető vissza.

A vontatójárművek üzemi viszonyainak sajátosságaiából következik, hogy a terhelési állapotok időbeli változásának regisztrálásával kapott $x(t) = [s(t), V(t)]^*$ időfüggvényt a terhelési viszonyokat leíró $\xi(t) = [\xi_s(t), \xi_v(t)]^*$ sztochasztikus vektorfolyamat realizációjaként kell tekinteni. Az 1. ábrán szemléltetjük a szóban forgó $x(t)$ realizáció lefutásának jellegét egy dízel-vontatójármű esetére.

A sztochasztikus terhelési viszonyokat az $x(t)$ realizációs függvény koordinátáinak együttes szintmegaladási időhányadaiból kiindulva értelmezett terhelésállapot-eloszlásfüggvénnyel mérnöki szempontból kielégítően lehet jellemezni [3]. A terhelésállapot-eloszlásfüggvény meghatározza a $\xi = [\xi_s, \xi_v]^*$ időtől független helyettesítő valószínűségi vektorváltozót, mely a terhelési viszonyok egyszerűsített, praktikus jellemzését teszi lehetővé. A terhelésállapotok időbeli változásának vizsgálatához célszerű bevezetni a gyengén stacionárius $\xi_*(t)$ helyettesítő vektorfolyamatot, mely elsőrendben szigorúan is stacionárius, és amelynek eltolásinvariáns elsőrendű perem-eloszlásfüggvénye a ξ eloszlásfüggvényével egyezik meg. A $\xi_*(t)$ helyettesítő folyamat korrelációs, spektrális és koherenciajellemzői a regisztrált $x(t)$ realizációs függvény alapján becsülhetők,



1. ábra

és ezek a jellemzők egyrészt mélyebb betekintést tesznek lehetővé a terhelési viszonyokat irányító véletlen mechanizmus összefüggéseibe, másrészt alapot szolgáltatnak a mintavételes megfigyelés megtervezéséhez és értékeléséhez.

A sztochasztikus terhelési folyamat statisztikai vizsgálata

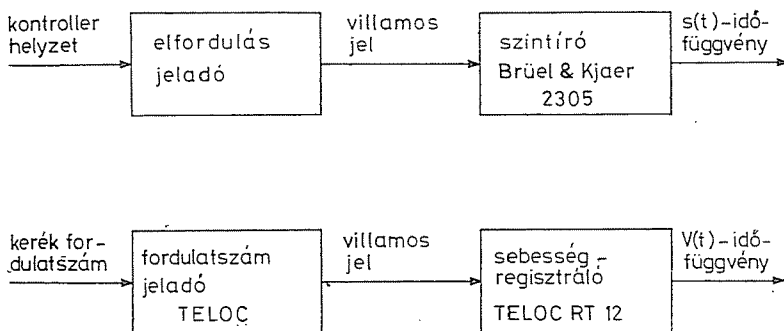
A terhelésállapot-eloszlásfüggvény a terhelési folyamat realizációjából mintavételes módszerrel becsülhető. A becslés pontosságának és megbízhatóságának értékeléséhez felhasználható a független statisztikai minták elmélete, mivel a megfigyelt realizációba foglalt, közelítőleg függetlennek tekinthető mintaelemek N_0 száma a helyettesítő stacionárius folyamat korrelációs függvényeinek ismeretében meghatározható. A mintaelemek közelítő korrelálatlanságával meghatározott legkisebb τ_0 időeltolás ugyanis összevethető a kiinduláskor felvett Δt mintavételi időközzel és a megfigyelt tényleges N mintaszámmal, és így az

$$N_0 \approx \left[\frac{N}{\left[\frac{\tau_0}{\Delta t} \right] + \text{sign} \left\{ \frac{\tau_0}{\Delta t} \right\}} \right] \quad (8)$$

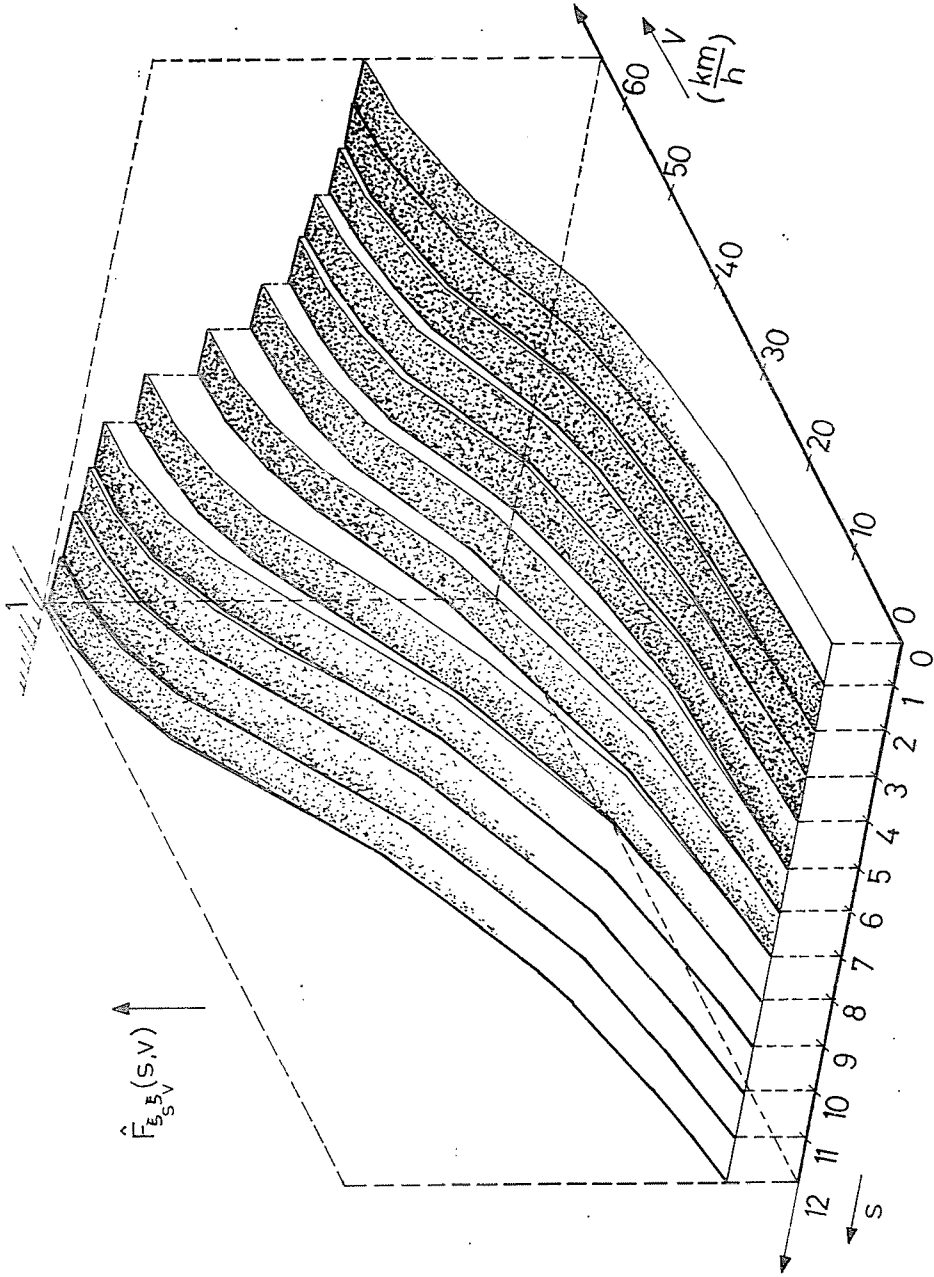
összefüggés adódik [3], ahol a szögletes zárójel az egészrész képzést, a kapcsos zárójel pedig a törtrészképzést jelöli. A (8) összefüggést a $\Delta t \leq \tau_0 \leq (N - 1) \Delta t$ és $N \geq 2$ feltételek mellett vezettük le.

A terhelésállapot-eloszlásfüggvény adott pontosságú és megbízhatóságú behatárolása iteratív statisztikai vizsgálat végrehajtását teszi szükségessé, mivel ismeretlen struktúrájú terhelési folyamat esetén a szükséges realizációhossz, illetve mintaszám előre nem adható meg [3].

A következőkben bemutatjuk az M 41 sorozatszámú dízelmozdony hajtásrendszerének személyvonati szolgálatban kialakuló terhelési viszonyaival kapcsolatos mérések jellemző diagramjait. A 2. ábra blokkdiagramja szerint



2. ábra



3. ábra

kialakított regisztráló rendszer szolgáltatta az $x(t)$ realizációs függvény $s(t)$ és $V(t)$ koordináta függvényeit. A realizációs függvényekből $\Delta t = 10$ s-os mintaveteli időközzel $N = 1214$ elemű mintát képeztünk. Az így adódó mintasorozat statisztikai analizését digitális számítógépen végeztük el. A 3. ábrán az

$$F_{\xi_s, \xi_v}(s, v) = \mathbf{P}\{\xi_s < s, \xi_v < v\}$$

elméleti terhelésállapot-eloszlásfüggvényt relatív gyakoriságokkal közelítő $\hat{F}_{\xi_s, \xi_v}(s, v)$ tapasztalati függvény axonometrikus képét rajzoltuk fel.

A 4. ábra az $\hat{F}_{\xi_s, \xi_v}(s, v)$ marginális eloszlásfüggvényeit az

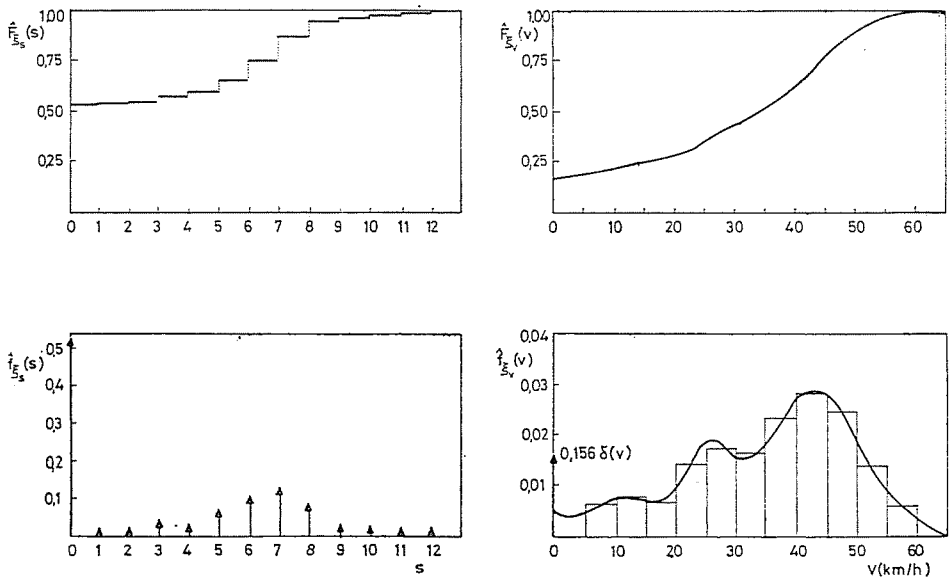
$$\hat{F}_{\xi_s}(s) = \hat{F}_{\xi_s, \xi_v}(s, \infty) \text{ és } \hat{F}_{\xi_v}(v) = \hat{F}_{\xi_s, \xi_v}(\infty, v) \quad (10)$$

függvényeket, valamint ezek általánosított deriváltjaiként értelmezett

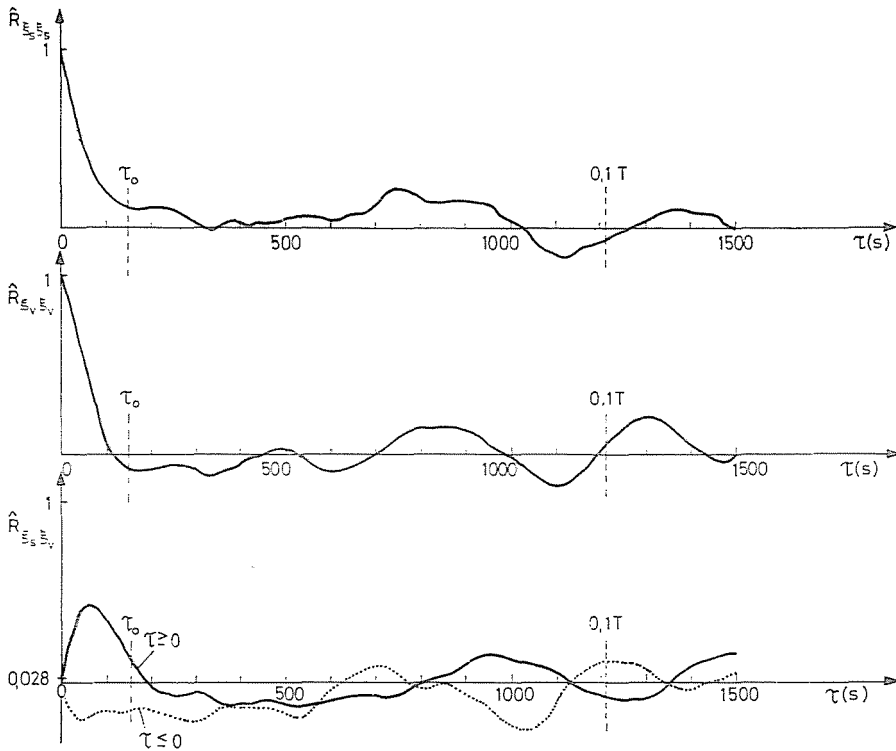
$$\hat{f}_{\xi_s}(s) = \frac{d\hat{F}_{\xi_s}(s)}{ds} \text{ és } \hat{f}_{\xi_v}(v) = \frac{d\hat{F}_{\xi_v}(v)}{dv} \quad (11)$$

sűrűségfüggvényeket mutatja.

A mintasorozat alapján meghatároztuk az empirikus auto- és keresztkorrelációs függvényeket. Ezek lefutása az 5. ábrán látható. Az ábrában fel-tüntetjük a közelítő korrelálatlansághoz tartozó $\tau_0 = 150$ s-os időeltolás-absz-cisszát is. Az empirikus korrelációs függvények Fourier transzformációjával állítottuk elő a realizációkkal reprezentált stacionárius folyamat empirikus



4. ábra

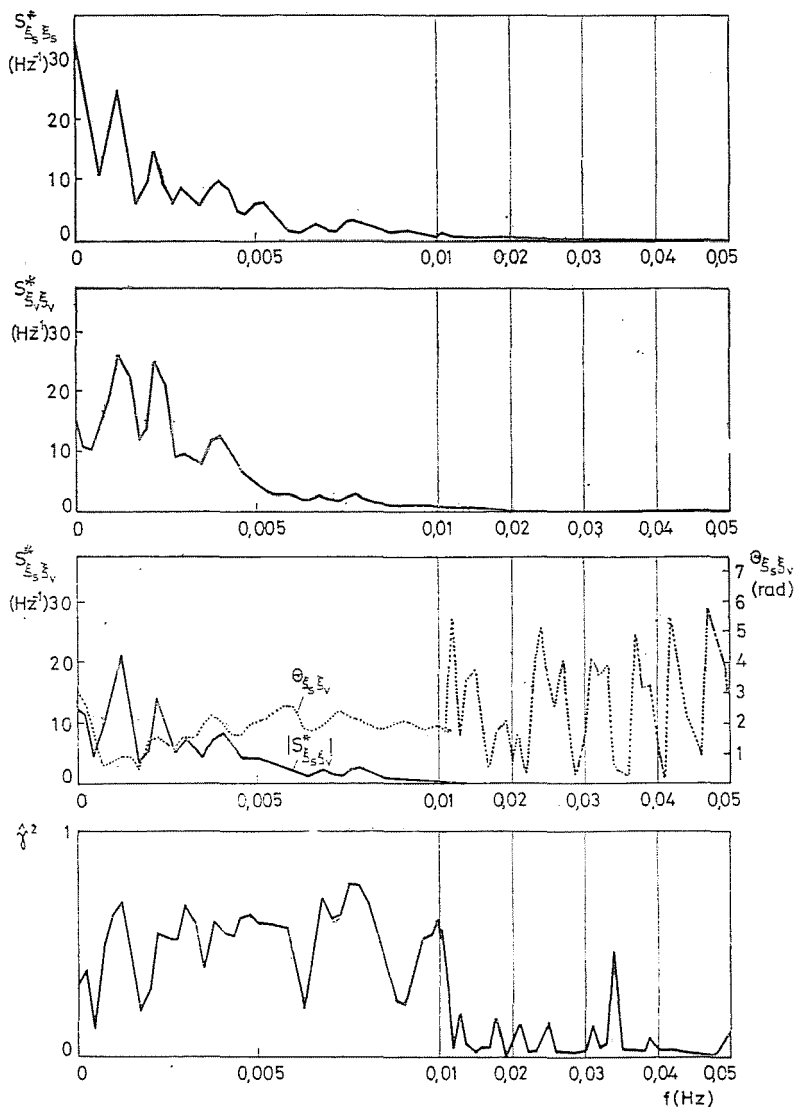


5. ábra

auto- és kereszt spektrálsűrűségfüggvényeit, valamint empirikus koherenciafüggvényét. A 6. ábrán megadott, auto- és kereszt spektrumok lefutásával kapcsolatban megállapítható, hogy azok „lényegi” része 0 és 0,01 Hz-es frekvencia-intervallumban helyezkedik el. Az ábránkon a hely kímélése érdekében a frekvenciatengelyen a léptéket 0,01 Hz-től felfelé ötödrésztére csökkentettük. A spektrumok a 0,03 Hz érték felett gyakorlatilag eltűnnek, így a terhelési folyamat sávkorlátosnak tekinthető. A kereszt spektrum $\theta_{\xi_{\omega} \xi_{\omega}}(f)$ fázisszögével kapcsolatban utalunk arra, hogy azok a Gauss-féle számsíkon kiadódó komplex spektrum-értékeket a pozitív forgásirányban mérhető $[0, 2\pi]$ -beli szögértékekkel reprezentálják.

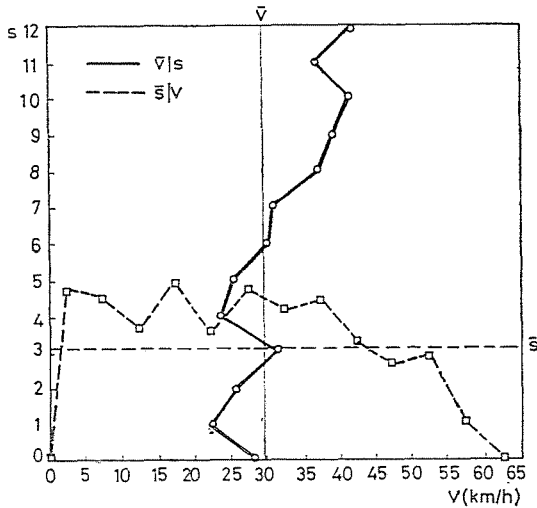
A spektrumok felső határfrekvenciáját $f_0 = 0,03$ Hz-ben rögzítve, az alkalmazott $\Delta t = 10$ s-os mintavételezéshez tartozó Nyquist frekvencia $f_c = 1/(2 \cdot 10) = 0,05$ Hz-re adódik, azaz $f_0 < f_c$ miatt a realizációs függvényt a mintavételezéssel nyert értékek kielégítően reprezentálják. Az empirikus koherenciafüggvény a

$$\gamma^2(f) = \frac{|S_{\xi_{\omega} \xi_{\omega}}^*(f)|^2}{S_{\xi_{\omega} \xi_{\omega}}^*(f) S_{\xi_{\omega} \xi_{\omega}}^*(f)} \quad (12)$$



6. ábra

képlettel számított értékeit elemezve megállapíthatjuk, hogy a görbe a $0 \leq f \leq 0,01$ frekvenciaértékekre 0,5 körül ingadozik, így a $\xi_s(t)$ és $\xi_v(t)$ koordinátafolyamatok által generált eseményrendszerek nem teljesen függetlenek. Egyébként a koherenciafüggvény vázolt lefutását a vonatnak mint dinamikai rendszernek a nemlinearitása és az a tény magyarázza, hogy a $\xi_s(t)$ folyamaton kívül a sztochasztikus üzemi környezet (a pályaelenállások, a rakottság változása) is befolyásolja a $\xi_v(t)$ folyamat realizálódó értékeit.



7. ábra

A terhelési folyamat statisztikai vizsgálata során három oldalról igyekeztünk képet alkotni a $\xi_s(t)$ és $\xi_v(t)$ azonos $t \in T_0$ melletti értékeinek statisztikus függőségeire nézve. Kiindulásként a keresztkorrelációs függvény $\tau = 0$ időeltolás melletti értékét vizsgáltuk, erre $R_{\xi_s \xi_v}(0) = 0.028$ adódott, ami gyakorlatilag korrelálatlanságként értékelhető. Ezután függetlenségi vizsgálatot végeztünk a χ^2 próba segítségével. Az elemzésben 5%-os elsőfajú hibavalószínűséget megengedve számított χ^2 érték kisebb volt, mint az adott szabadságfokhoz ($DF = 156$) tartozó kritikus érték, így a függetlenség hipotézisének nem mondott ellent a vizsgált adatsokaság. A ξ_s és ξ_v függőségének további elemzésére meghatároztuk a $\bar{M}(\xi_s | \xi_v)$ és $\bar{M}(\xi_v | \xi_s)$ feltételes várható értékek becsléseit. A 7. ábrán ezeket a feltételes középértékeket vázoltuk fel, az \bar{s} és \bar{v} becslések feltüntetésével. A diagramból látható, hogy a feltételes középértékek jellegre nézve követik az \bar{s} és \bar{v} vonalakkal kijelölt tengely keresztirányát, vagyis a függetlenségi hipotézis megtartása mellett szólnak. Megállapítható tehát, hogy a vizsgált esetben a ξ_s és ξ_v komponensek igen gyenge függőségben levő valószínűségi változókként azonosíthatók.

A függetlenség megfelelő statisztikai biztonság melletti igazolásához azonban még további széles körű mérések elvégzése szükséges.

A terhelésállapot-eloszlás alkalmazásairól

A terhelésállapot-eloszlásfüggvény alkalmazásának két alapvető formája határozható el: az analízisproblémák és a szintézisproblémák. Az analízisproblémáknál adott kialakítású hajtásrendszer esetén, azaz rögzített konstruk-

ciós paraméterek mellett kívánjuk a tényleges terhelési viszonyok között realizálódó üzemi jellemzőket értékelni. Az analízisproblémák általában tipikus várható értékek meghatározására vezetnek [3].

A szintézisproblémánál azt a konstrukciós paraméterrendszert keressük, amely biztosítja, hogy adott terhelésállapot-eloszlási viszonyok mellett valamely vizsgált jellemző a legkedvezőbb legyen. A szintézisfeladat tipikusnak mondható alakja adódik abban az esetben, amikor a vizsgált üzemi jellemzőt a tekintetbe veendő konstrukciós paraméterek \mathbf{q} vektorától explicite függővé téve $J = J(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ alakban írjuk fel, és így a $\xi = [\xi_s, \xi_v]^*$ várható értéke \mathbf{q} függvényévé válik:

$$\mathbb{M} J(\xi, \mathbf{q}) = \int J(\mathbf{x}, \mathbf{q}) dF_{\xi}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{q}). \quad (13)$$

A szintézisprobléma megoldásához a (13) függvény szélső értékét kell meghatározni, általában a \mathbf{q} -ra kiszabott valamilyen *feltétel* mellett. A szélsőértékprobléma részletes diszkussziójára nézve a [3]-ra utalunk.

Az alábbiakban felsoroljuk azokat a fontosabb kérdésköröket, amelyek elemzésének egyik kulcsa a terhelésállapot-eloszlásfüggvénnyel megfogalmazott analízis-, ill. szintézisproblémák megoldása:

- a teljesítményátviteli viszonyok vizsgálata
- az üzemanyagfogyasztási viszonyok vizsgálata
- a hajtásrendszer kvázistatikus mechanikai igénybevételeinek vizsgálata
- a hajtásrendszer kopási viszonyainak elemzése
- a kenőanyagok megválasztása
- a megbízhatóságelmélet alkalmazása a járműfenntartásban
- környezetvédelmi vizsgálatok.

Irodalom

1. Szüle, D.: Összefüggés az üzemállapotok előfordulásának gyakorisága és a motoros jármű üzemi jellemzői között. Közlekedéstudományi Szemle No. 11. (1967)
2. Zobory, I.: Die theoretische Untersuchung der Belastungszustandsverteilung von Maschinensätzen mit Hilfe einer statistischen Methode. Periodica Polytechnica (Transportation Engineering) 3, 93 (1975)
3. Zobory, I.: Vasúti vontatójárművek terhelési viszonyainak vizsgálata és a terhelésállapot-eloszlás alkalmazása a hidrodinamikus hajtóművek tervezésében. Kandidátusi értekezés, Budapest, 1979.

Dr. Zobory István egy. docens, a műszaki tudományok kandidátusa.