

HASZONJÁRMŰVEK LINEARITÁSÁNAK VIZSGÁLATA STATISZTIKAI IDENTIFIKÁCIÓS MÓDSZEREKKEL

MICHELBERGER Pál, VÁRLAKI Péter*, KERESZTES Albert

Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar Mechanika Tanszék

Bevezetés

A közúti haszonjarművek igénybevételi folyamatainak sztochasztikus vizsgálata során alapvető kérdésnek számít, hogy a konkrét útviszonyokhoz tartozó gerjesztési folyamat és adott utazási sebességértékek esetén leírható-e a haszonjarmű dinamikai viselkedése (azaz a vázszerkezet igénybevételi folyamata és az útgerjesztési folyamat közötti kapcsolat) lineáris dinamikus modellekkel (pl. lineáris állandó együtthetős differenciál-egyenletrendszerekkel, vagy lineáris integráloperátorokkal). Ha a lineáris modellek alkalmazása a fenti statisztikai kapcsolat nemlineáris jellege miatt nem lehetséges, akkor tisztázni kell, hogy milyen linearizáló (vagy esetleg „teljesen” nemlineáris) modell megválasztása tűnik célszerűnek.

A haszonjarművek dinamikus viselkedésének lineáris jellegére tett hipotézisünket az útgerjesztés és az igénybevétel (mint sztochasztikus folyamatok) realizációinak szimultán méréséből számított nemlinearitási mérőszámok meghatározásával ellenőrizhetjük, többek között a rendszeridentifikáció diszperziós módszerének alapján (azaz a fenti két sztochasztikus folyamat közötti keresztkorreláció és kereszt diszperzió függvények felhasználásával).

A konkrét mérőpados mérési eredményeink alapján kiszámított nemlinearitási mérőszám alkalmazásával az útgerjesztés amplitúdójának relatív szórása és a jellemző utazási sebesség-értékek függvényében meghatározható az a tartomány, ahol a lineáris modell biztonságosan alkalmazható, valamint azon tartomány, ahol valamilyen linearizáló, — illetve nemlineáris modell felhasználása szükséges, és végül azon tartomány, melynél további vizsgálatok szükségesek a megbízható modellkiválasztás megalapozása céljából.

* BME Közlekedés Technikai és Szervezési Intézet

A probléma felvetése

A haszonjárművek (autóbuszok, teherjárművek) tervezését megalapozó dinamikai vizsgálatok során az út—jármű rendszert a következőképpen modellezzük. A járműszerkezetet diszkrét tömegpontokból és merev testekből felépített rendszerrel helyettesítjük és feltételezzük, hogy az adott tömegpontokban az útfelület (véletlenszerű) gerjesztésére (a négy keréken) történő elmozdulás elegendő tesz az alábbi lineáris differenciál egyenletrendszernek [1, 5]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) - \mathbf{K}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{S}\mathbf{y}(t) = \mathbf{G}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}(t) \quad (1)$$

ahol:

\mathbf{M} — a tömegmatrix

\mathbf{K} — a csillapítási matrix

\mathbf{S} — a merevségi matrix

\mathbf{G} — a gerjesztés merevségi matrix

\mathbf{D} — a gerjesztés csillapítási matrix

$\mathbf{y}(t)$ — a rendszer szabadságfokának elmozdulása (a rendszer outputja) mint sztochasztikus folyamat

$\mathbf{x}(t)$ — az útfelület gerjesztése (a rendszer inputja) mint sztochasztikus folyamat.

Rögzített haladási sebesség és adott úttípus mellett (pl. aszfalt, makadám) az $\mathbf{x}(t)$ gerjesztő vektorfolyamat zérus várható értékű, ergodik, stacionáris Gauss-folyamat F_{ik} $i, k = 1, 4$ spektrális sűrűségmatrix-szal [1, 3]. A fenti lineáris modell segítségével meghatározható a haszonjárművek dinamikus igénybevételének kétféle eloszlásfüggvénye, valamint a gyakorlati károsodási elméletek számára a feszültség-szintátmetzési számok várható értéke [2, 3].

A járművekre vonatkozó, a fenti modellel kapott terhelési (igénybevételi) statisztika tehát a rendszerviselkedés (útgerjesztés-vázfeszültség kapcsolat) linearitási hipotézisének alapszik. A gyakorlati tapasztalatok alapján megállapítható, hogy a linearitás feltételezése jó approximáció biztosít bizonyos úttípusokra („jó utak”) viszonylag kisebb utazási sebességek esetén. Sajnos az (1) lineáris modell nem képes adekvát leírást adni az útgerjesztés-vázfeszültség kapcsolatról rosszabb típusú utak és nagyobb utazási sebességek esetén, elsősorban a kerékelpattanások valamint a nemlineáris rugókarakterisztikák és a nemlineáris csillapítási hatások miatt.

Mivel a lineáris modell rendkívül egyszerű és egyöntetű, továbbá a gyakorlat számára viszonylag könnyen felhasználható, ezért még viszonylag kisebb nemlinearitások esetén is alkalmazhatjuk a valamivel pontosabb, de sokkal bonyolultabb és számításigényesebb alternatív nemlineáris modellel szemben.

Azt, hogy bizonyos úttípusok (sűrűségpektrumok) és utazási sebességek esetén adott járműtípusokra a lineáris igénybevételi modellek alkalmazhatók-e vagy sem, a tényleges megfigyelt gerjesztési (input) és igénybevételi (output) folyamatok közötti statisztikai elemzések alapján dönthetjük el. A statisztikai elemzést identifikációs megközelítéssel, a Rajbman-féle diszerciós nemlinearitási mérőszámok alkalmazásával végezzük el [4, 5].

A nemlinearitási mérőszámok értelmezése és alkalmazása az útgerjesztés jármű vázszerkezet kapcsolat esetén

Az út—jármű rendszer modellezésének identifikációs megközelítésében legyenek $x_k(t)$, $k = 1, 4$ és $y_j(t)$, $j = 1, m$, a megfigyelt input-output sztochasztikus folyamatok (gyakorlatilag realizációk). A fenti stacionárius folyamatok között statisztikai kapcsolat elemzésére a következő egyszerű, a nemlinearitás mértékét mutató kifejezést alkalmazzuk [4, 5]:

$$N_{y_j x_k} = \int_0^{\infty} (\eta_{y_j x_k}^2(t) - R_{y_j x_k}^2(t)) dt \quad (2)$$

ahol $\eta_{y_j x_k}$ és $R_{y_j x_k}$ az $y_j(t)$ és $x_k(t)$ folyamatok közötti normált keresztdiszperzió, illetve keresztkorreláció függvény. A keresztdiszperzió függvények becslését ergodikus folyamatok esetén természetesen egy realizációból is kiszámíthatjuk [6].

A fenti nemlinearitási fok alkalmazásának alapja az, hogy *lineáris* útgerjesztés, jármű váz feszültség kapcsolat esetén az input és output együttes tetszőleges n dimenziós eloszlásfüggvénye ($n = 1, 2, \dots$) a többváltozós, normális eloszlást követi. Ekkor belátható, hogy a

$$\eta_{y_j x_k}^2(\tau) = R_{y_j x_k}^2(\tau), \quad \tau \in T \quad (3)$$

egyenlőség fennáll, és így a lineáris hipotézis teljesülés esetén a nemlinearitási fok $N_{y_j x_k} = 0$. Ha az input és output folyamatok közötti kapcsolat nem lineáris, akkor

$$\eta_{y_j x_k}^2(\tau) > R_{y_j x_k}^2(\tau), \quad \tau \in T$$

Sajnos az $N_{y_j x_k}$ nemlinearitási mérőszámra esetünkben „nemlinearitási skála” kialakítása bonyolult feladat, ezért a következő normált változatát alkalmaztuk:

$$L_{y_j x_k} = \frac{N_{y_j x_k}}{D_{y_j x_k}}, \quad 0 \leq L_{y_j x_k} \leq 1, \quad (4)$$

ahol: $D_{y_j x_k} = \int_0^{\infty} \eta_{y_j x_k}^2(t) dt$.

Nyilvánvaló, hogy $L_{y_{yx}} = 0$, ha a rendszer teljesen lineáris, míg $L_{y_{yx}} = 1$, ha a lineáris approximáció az input és output sztochasztikus folyamatok közötti kapcsolat jellemzésére teljesen inadekvát.

A különböző utazási sebességekre az úttípusokra kiszámítva a fenti nem-linearitási mérőszámokat, becsülhető az a tartomány (az útprofil szórás- és a sebességértékek függvényében), ahol a lineáris igénybevételi modell biztonságosan alkalmazható, illetve meghatározható az a tartomány, ahol a lineáris modell még jó közelítésnek tekinthető.

A kísérletek ismertetése

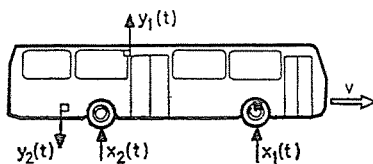
Tekintettel arra, hogy ismételt országúti kísérletek során a nyomvonal azonossága (így az $x(t)$ útgerjesztését is) maradéktalanul nem biztosítható, ezért a méréseket Schenck gyártmányú számítógép vezérelt HIDROPULSE berendezéssel végeztük. Az autóbusz vertikális lengéseit a hidropulse munkahengereinek elmozdulása váltotta ki, amelyre a jármű kerekei támaszkodtak. A hidraulikus munkahengerek elmozdulásainak elektronikus szabályozása lehetővé tette, hogy azok korábban regisztrált útprofilok szerint mozogjanak. Az útegyenletlenségek nagyságát 0—100% között folyamatosan soft-ware úton lehetett változtatni, akár csak a haladási sebesség értékét.

A dolgozat egy viszonylag „jó” és egy „rossz” minőségi útprofillal végzett mérések eredményeit mutatja be 12,5—25—50—100%-os amplitúdó kivezérléskor, valamint jó út esetében 20, 40, 60, 80 és 100 km/óra, míg rossz úton 20, 40 és 60 km/óra haladási sebesség mellett. Mágnesszalagon regisztráltuk a jármű első és hátsó kerekeinek vertikális kitérését. A jobb és bal oldali kerekek azonos nyomvonalon futottak (ortotróp út) és az első és hátsó kerék $x_1(t)$ illetve $x_2(t)$ gerjesztése csak a tengelytávolság és a haladási sebesség által meghatározott időkésséssel tért el egymástól. Ily módon a rendszer bemenőjelének az első futómű útgerjesztését tekintettük. Két kimenőjelet regisztráltunk, a középső ajtó oszlopában mért $y_1(t)$ és a hossztartóban ébredő $y_2(t)$ nyúlásmérő bélyegekkel mért feszültséget. A mérési vázlatot az 1. ábra mutatja, a 2. ábrán pedig az egyenként 500 s időtartamú mérésekből láthatunk egy rövid mintát. A HIDROPULSE berendezéssel végzett mérések fontos jellemzője az, hogy a mérés folyamán a külső zajok, zavarások hatása minimális, gyakorlatilag a mérési zajokra korlátozódik.

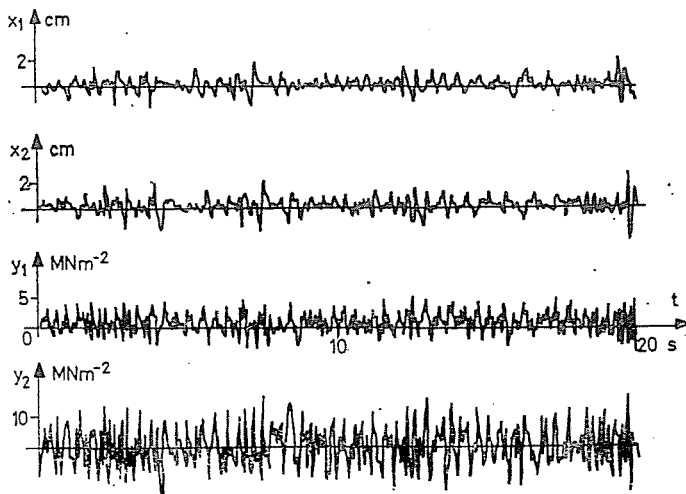
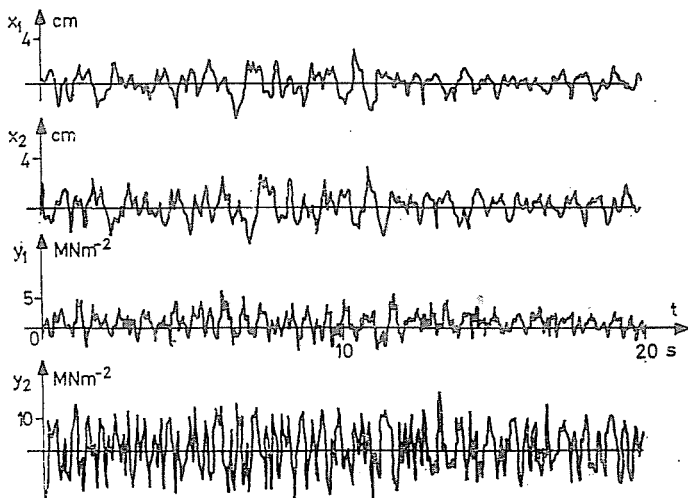
Lineáris esetben az 1. ábra mérési elrendezésének megfelelő hatásvázlat a 3. ábra szerint adható meg, mely szerint az egyes futóművekben belépő útgerjesztés hatása szuperpozícióval írható fel a kimeneti pontokon [7]:

$$y_1(t) = g_{11}(t) * x_1(t) + g_{12}(t) * \delta(t - T) * x_1(t)$$

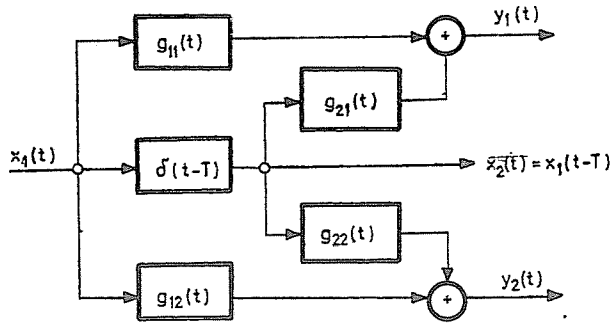
$$y_2(t) = g_{21}(t) * x_1(t) + g_{22}(t) * \delta(t - T) * x_1(t)$$



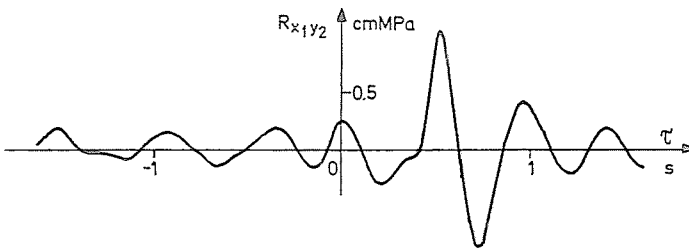
1. ábra



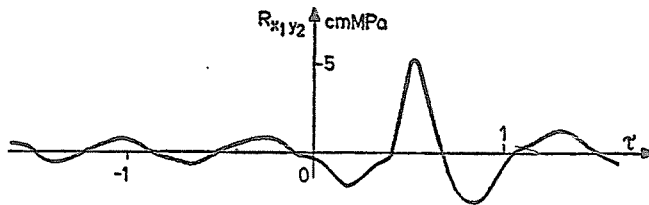
2. ábra



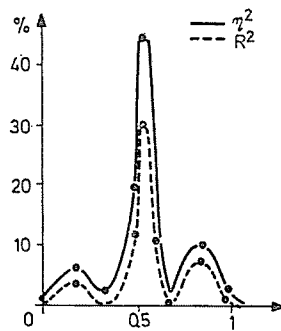
3. ábra



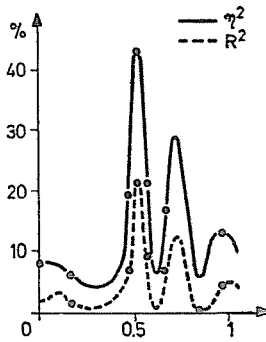
4. ábra



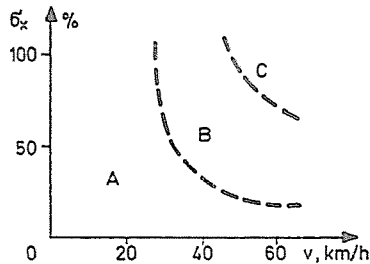
5. ábra



6. ábra



7. ábra



8. ábra

ahol az eddig szerepelt jelöléseken kívül a konvolúciós integrál jele *. Az autókorrreláció és keresztkorreláció függvényeket HP gyártmányú célszámítógépen határoztuk meg, függvényenként 200 diszkrét pontban. A 4. ábra mutat be egy jellegzetes keresztkorreláció függvényt, amelynél a rendszer lineárisan működik, míg az 5. ábrán nemlineáris jellegű kapcsolatra jellemző keresztkorreláció függvény látható.

A jármű különböző út és haladási sebesség közötti lineáris és nemlineáris működésmódjának különválasztására a (4) kifejezéssel megadott nemlinearitási fokot is meghatároztuk. A kísérletekben regisztrált folyamatos jelekre MEDA 41TC hibrid jellegű számítógép segítségével számítottuk ki a normalizált keresztdiszperziós függvényt [6, 8]. A keresztdiszperzió, illetve keresztkorreláció függvények kapcsolatára közelítőleg lineáris kapcsolat esetén a 6. ábra mutat példát míg a 7. ábra egy nemlineáris esetben mutatja a keresztdiszperzió, illetve keresztkorreláció függvényeket.

A kapott eredmények alapján a 8. ábra szerint osztható fel lineáris és nemlineáris tartományokra a relatív útprofil szórás (σ_x) és a haladási sebesség (v) függvényében. Az A jellegű tartomány a laprugókon ébredő száraz súrlódás miatt nemlineáris, a B jelű közel lineáris és a C jelű zóna telítődés jellegű nemlineáris üzemmódot képvisel.

Irodalom

1. Robson, J. D.: Road surface description and vehicle response. *Int. Journal of Vehicle Design.* 1 25 (1979)
2. Michelberger, P.—Gedeon, J.—Keresztes, A.: Some problems and developments in commercial road vehicle fatigue design and testing. *Int. Journal of Vehicle Design.* 1 440 (1980)
3. Horváth, S.—Keresztes, A.—Michelberger, P.—Szeidl, L.: Mathematical model of the load and stress statistics of vehicle structures. *Int. Journal of Applied Mathematical Modeling*
4. Várlaki, P.—Rajbman, N. S.: Estimation for degree of nonlinearity of dynamic systems. *Tehhn. Kib.* 1980, No. 1. (In Russian) (*Izv. Ak. Nauk SZSZSR. Ocenka sztepeni nelinejnosztyi dinamicseszkogo objekta. Technicseszkaja Kibernetika.*)
5. Rajbman, N.—Kapitonenko, V.—Várlaki, P.: *Dispersinal System Identification. (Diszperszionnaja identifikacija).* Moscow, Nauka, 1981.
6. Lototsky, V.—Szeidl, L.—Várlaki, P.: New estimation method for identification of nonlinear system Preprint of IFAC Symp. on Identification and System Parameter Estimation — Washington, 1982. p. 52—57.
7. Michelberger, P.—Várlaki, P.—Keresztes, A.: An identification approach for of stochastic model of commercial road vehicles. *Proceedings of American Control Conference, Washington, 1982.*
8. Várlaki, P.—Szücs, B.: Nonparametric identification of continuous nonlinear dynamic system. Preprint of IFAC Symp. on Identification and System Parameter Estimation — Washington, 1982. p. 47—51.

Dr. Michelberger Pál tanszékvezető egy. tanár, az MTA levelező tagja

Dr. Várlaki Péter tudományos főmunkatárs, a műszaki tudományok kandidátusa

Dr. Keresztes Albert egy. adjunktus, a műszaki tudományok kandidátusa