

Autóbusz lengéskényelmének javítása a felfüggesztési paramétereinek optimális megválasztásával

Szöke Dezső

BME Járműváz-és Könnyűszerkezetek Tanszék

1111 Budapest, Bertalan L. u.2.

dezso@kme.bme.hu

Bevezetés

A jármű felépítmény/vázszerkezet a kerék/tengely felfüggesztés rugalmas elemein (hordrúgó, hidraulikus csillapító, abroncs) keresztül támaszkodik az egyenetlen útfelületre. A jármű mozgásakor a pályahibák időben változó kinematikai terhelést okoznak. Ennek következtében változik a lengéskényelem (komfort) érzet (a felépítmény gyorsulásával arányos jellemző) és a jármű úttartása, stabilitása is (dinamikus kerékterhelés). A felfüggesztés paramétereinek alkalmas megválasztásával elérhető, hogy a rugalmas vázszerkezetbe (pl. autóbusz) e szerkezeti elemeken keresztül bevezetett erők hatása a jármű lengésére, elemeinek dinamikus igénybevételére minimális legyen (lengésszigetelés).

A felfüggesztési rendszerrel szembeni követelmények

A jármű felfüggesztés rugalmas elemei: az abroncs, valamint a hordrúgó (légrúgó) és a hidraulikus csillapító. E három elem meghatározott karakterisztikákkal (linearizált paraméterekkel) rendelkezik egy-egy járműnél. Az útgerjesztés (úthibák) egy véletlenszerű, sztochasztikus folyamat (kiegészítve egyedi úthibákkal pl. vasúti átjáró), ami az úttípus statisztikus jellemzőitől és a jármű haladási sebességétől függ.

Elsősorban haszongépjárműveknél, de személygépkocsiknál is, a hasznos terhelés jelentősen változhat, így a felfüggesztési rendszer elemeinek terhelésfüggőnek is kell(ene) lenni (pl. szintszabályozott légrúgó alkalmazása).

A változó körülményekhez és követelményekhez is alkalmazkodni képes jármű felfüggesztéseknél szabályozott aktív vagy semi-aktív rendszereket alkalmaznak. Gyakorlatilag inkább még csak kutatási projekteknél jelennek meg az aktuátorok a magas költségek és energia igény miatt. Az alkalmazott járműmodellek kis szabadságfokúak (negyed járműmodell), és az egyedi úthibák (pl. vasúti átjárók keresztezése) „kivédése” a cél [Palkovics, Bokor, etc.].

Ha csak a statisztikusan változó gerjesztés paramétereknek (úttípus, sebesség, terhelés) megfelelően változtatjuk a felfüggesztés paramétereit az optimális lengések érdekében (komfort, stabilitás), akkor e beavatkozásnak nincs energia igénye (csillapító és légrúgó szelep állítása). A járműmodellek itt már bonyolultabbak: sík ill. térbeli merevtest modell [Péter], de megjelenik a helyettesítő rugalmas gerenda felépítmény modell is, akár az adaptív szabályzóval kiegészítve is.

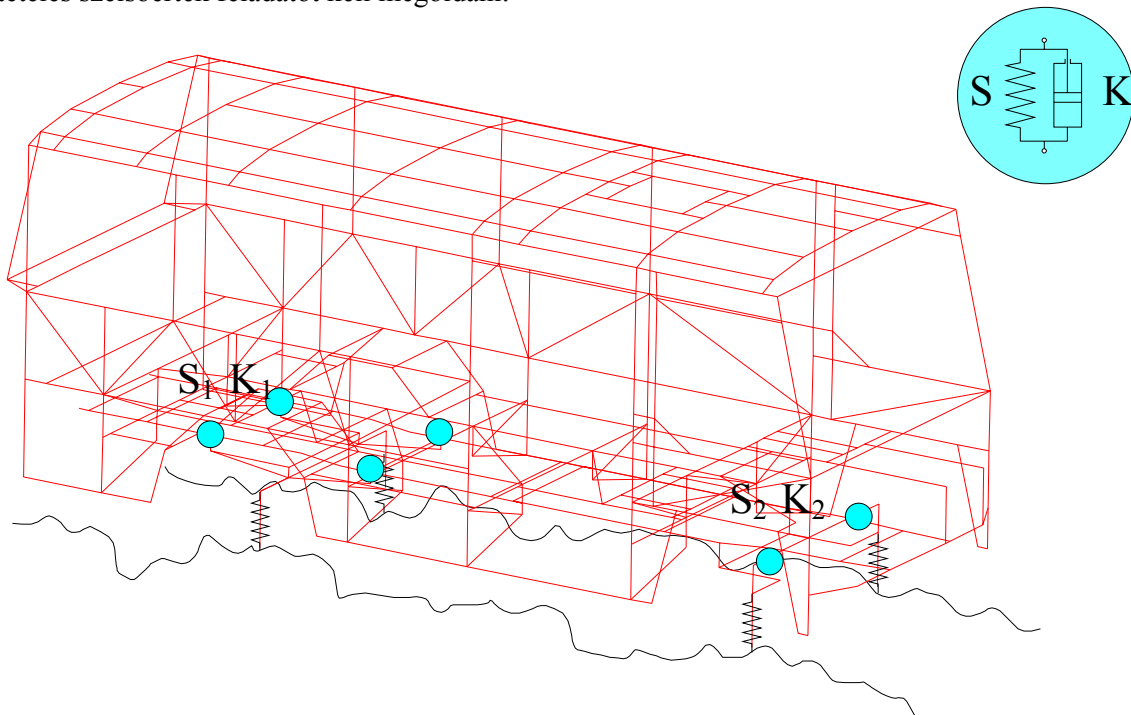
A szerkezetdinamikai vizsgálatokra kialakított járműmodellek (pl. autóbusz) végeselemes modellek több ezer szabadságfokkal, melyeknél felmerül az optimális paraméterű felfüggesztés rendszer meghatározása is.

Az optimális paraméterek becslését egy autóbusz végeselemes modelljén mutatjuk be. A feladat megoldásához szükség van: egyrészt egy számító eljárásra, amivel a több ezer szabadságfokú modell szerkezetdinamikai jellemzői (lengésgyorsulás, igénybevétel, feszültség) gyorsan számíthatók, amiből majd a célfüggvény előállítható, másrészt egy kereső algoritmusra a feltételes optimaláshoz.

Az autóbusz modell és az optimalizálható paraméterek

Az IK GMC tip. midi autóbusz végeelemes modellje 325 csomópontú, és közel 550 gerenda és lemez elemet tartalmaz. Az abroncsot, valamint a hordrugó és csillapító elemeket megfelelően linearizált rugó és csillapító elemekkel helyettesítjük. A vázszerkezet belső csillapítását a merevségével arányosnak modellezzük [Szőke]. A jármű $v=10$ m/s sebességgel az 1 cm szórású aszfalt úton halad. Kimenőjel lehet: tetszőleges szerkezeti pont (abszolút és relatív) elmozdulás, sebesség vagy gyorsulás szórása, valamint a szerkezeti elemek feszültség szórása, mint statisztikus jellemző.

A felfüggesztési rendszer elemei közül legkönnyebben a hordrugó és a hidraulikus csillapító elem karakterisztikája változtatható. A légrugó merevség és a csillapítási tényező változtatása haszongépjárműveknél egy-egy szelep nyitás-zárással gyakorlatilag megoldott, így e 2×2 paraméter (S_1, K_1, S_2, K_2 , 1. ábra) optimális paramétereit keressük csak. A paraméterek változása csak meghatározott tartományon lehetséges (pl. a gyári értékek $\pm 40\%$ -ában), így az optimalizálás során feltételes szélsőérték feladatot kell megoldani.



1. ábra IK GMC szerkezetdinamikai modellje az optimalizálható paraméterekkel

Paraméterérzékenység vizsgálat és optimalizálás

Szerkezetdinamikai szempontból a felépítmény lengésgyorsulása, annak szórása a fő információ hordozó, amivel mind a komfortérzet (nincs utas szűrő), mind a dinamikus igénybevétel közelíthető. Így a célfüggvény: a felépítmény átlagos gyorsulás szórásának minimuma

$$M\{D(\ddot{z}_i)_{i=1,298}\} \rightarrow \min! \quad dK_j = \pm 0.4K_j \\ dS_j = \pm 0.4S_j \quad (j = 1,2)$$

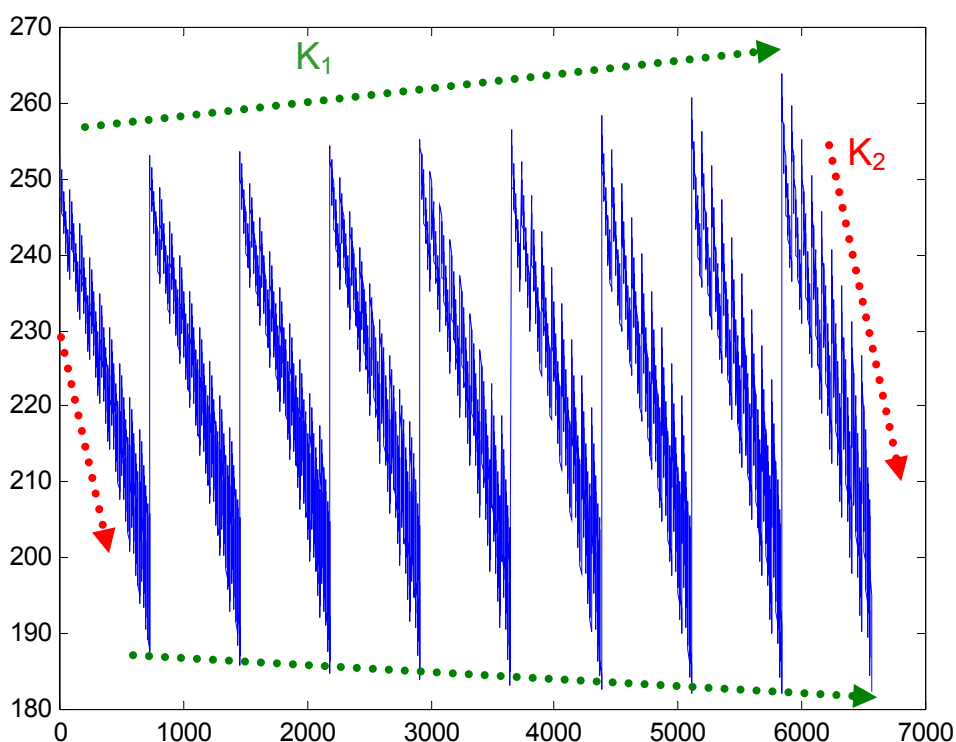
A célfüggvény számításához elő kell állítani minden csomópont gyorsulás spektrumát (PSD), majd azok integrálásával kapjuk a pont szórását, és képezzük azok átlagát.

A spektrum függvények számításánál modális kondenzációt alkalmazunk (a diszkrét csillapító elemek beépítésével) [Szőke]. Segítségével gyakorlatilag a csomópontok számától függetlenül ugyanannyi idő alatt állítható elő a célfüggvény.

Minden optimalizációs feladat előtt célszerű paraméterérzékenység vizsgálatot is végezni: azaz meghatározni a célfüggvény változását a rendszer paraméterek korlátozott változására. Az érzékenység függvényt numerikusan állítjuk elő $d=10\%$ -os paraméterváltozást feltételezve. A 4D-s felület (4 paraméter) így 9^4 (~ 6600) pontból áll (PIV futásidő kb. 80 perc). A gyorsulás érzékenységről elmondható (2. ábra), hogy

- a K_2 csillapítás változása a teljes felületen domináns és hatása egyértelmű,
- a K_1 változása már kisebb hatással bír a felépítményre és tendenciája változik is,
- az optimális paraméterek a tartomány szélén (annak közelében) helyezkednek el, és
- a célfüggvény „lapos”, így az optimális paraméterek becslésére csak megbízható kereső algoritmusokat alkalmazhatunk.

Az optimalizációs feladat megoldására több algoritmust teszteltünk [Lógó] ill. használtunk fel. A paraméterérzékenység vizsgálatot Matlabbal végeztük, így programozás szempontjából legkedvezőbb megoldással élve, az Optim toolbox feltételes szélsőértéket számító eljárásokat alkalmaztuk.



2. ábra Gyorsulás paraméter felület (gyorsulás érzékenység)

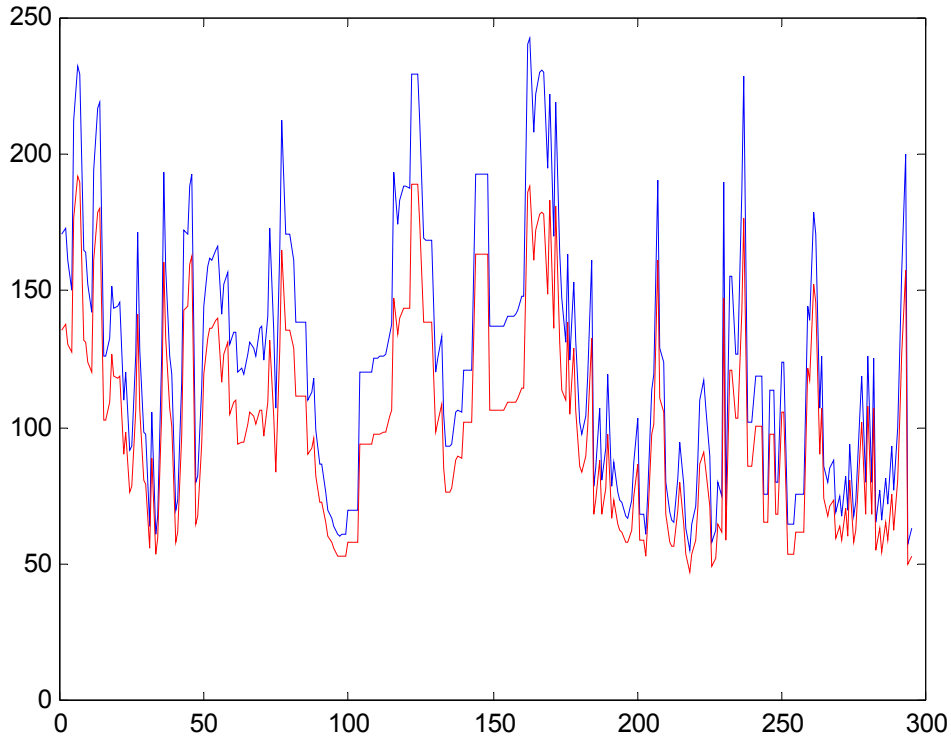
Optimalizációs eredmények

Két optimalizáló algoritmust is teszteltünk (fmincon, fminimax). Mindkét eljárás azonos eredményt határoz meg, kb. 5-6 ill. 8-9 iterációs lépésben, szemben a 9^4 lépésű, paraméter változtató kereséssel.

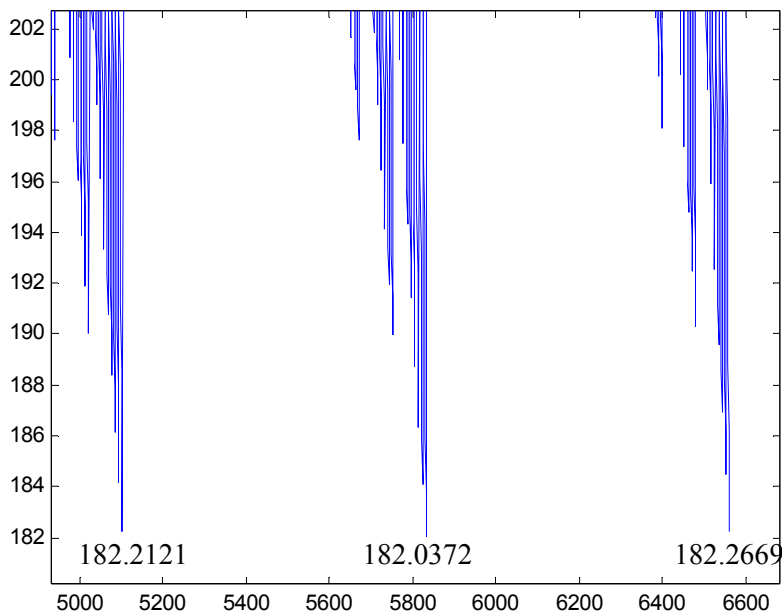
Ha gyorsulásra optimalizáljuk a járművet (autóbusz, sztochasztikus útterjesztés) és a felfüggesztési rendszer 4 paramétere változhat, akkor az alaprendszer paramétereit így kell módosítani:

$$\begin{aligned} dK_1 &= -0.3004 K_1 & dK_2 &= -0.4000 K_2 \\ dS_1 &= -0.4000 S_1 & dS_2 &= -0.4000 S_2 \end{aligned} \quad (\text{csillapítás } \downarrow, \text{ merevség } \downarrow, \text{ azaz lágyabb a rendszer})$$

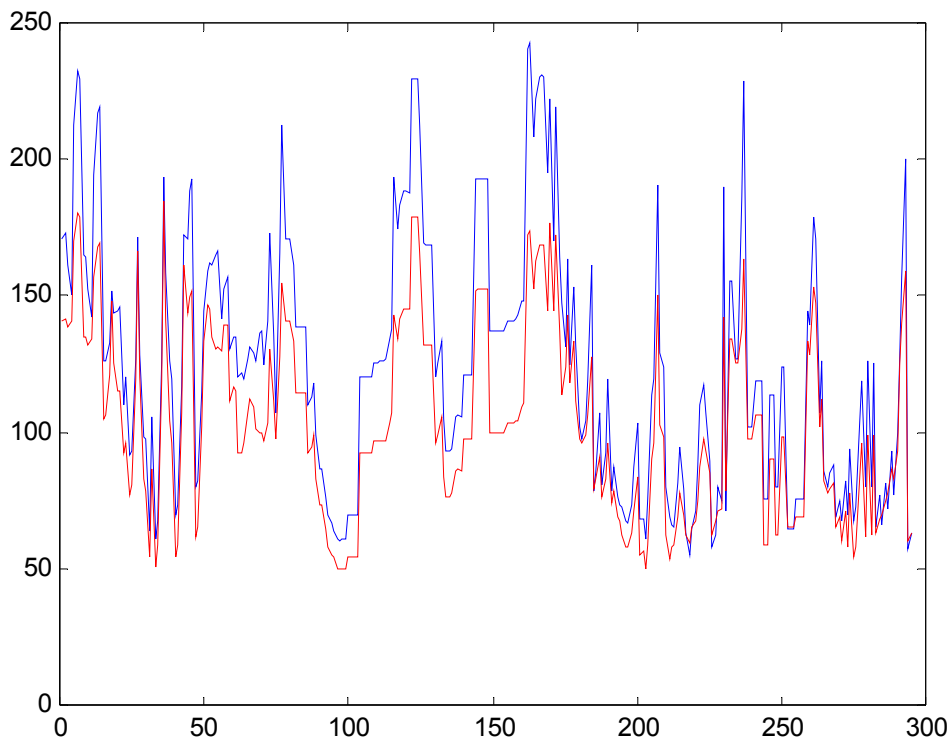
Ezáltal a felépítmény átlagos gyorsulása kb. 18%-kal csökken ($f_0 = 222.6493 \text{ cm/s}^2 \rightarrow f_{min} = 182.0372 \text{ cm/s}^2$), míg a csomópontok gyorsulás szórásai a 3. ábra szerint változnak (csökkennek). A kereső algoritmus alkalmazhatóságát bizonyítja, hogy megtalálta azt az optimumot, amit a paraméter „szeletelő” eljárással már megbecsültünk (4. ábra).



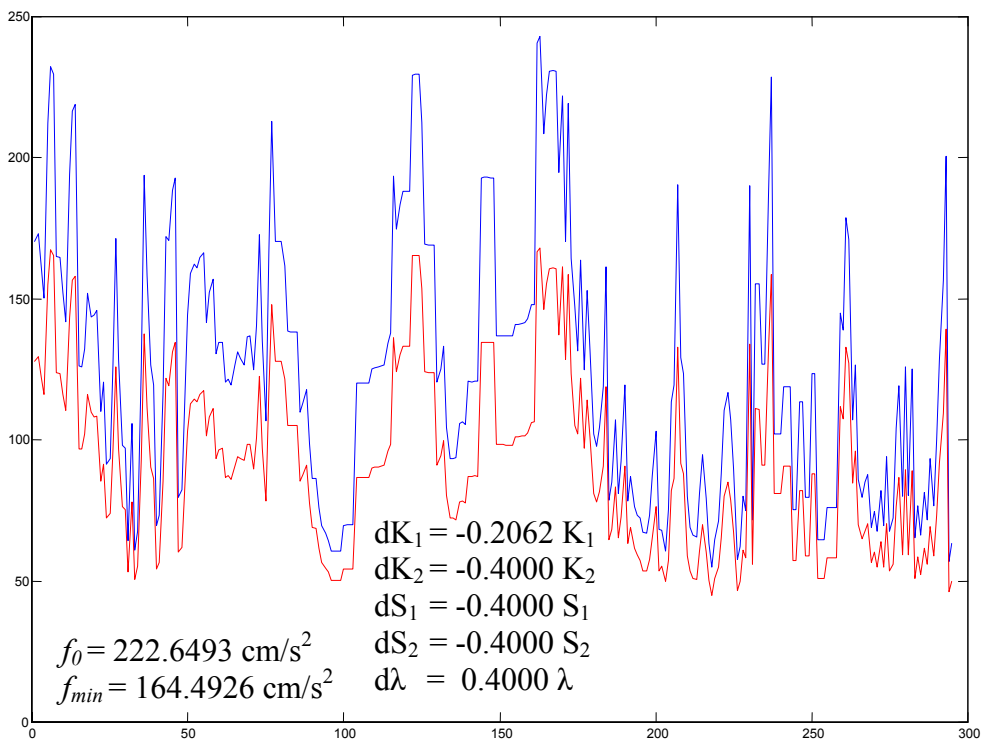
3. ábra A felépítmény gyorsulás szórása (--- optimált) és az optimalás eredménye (4 par.)



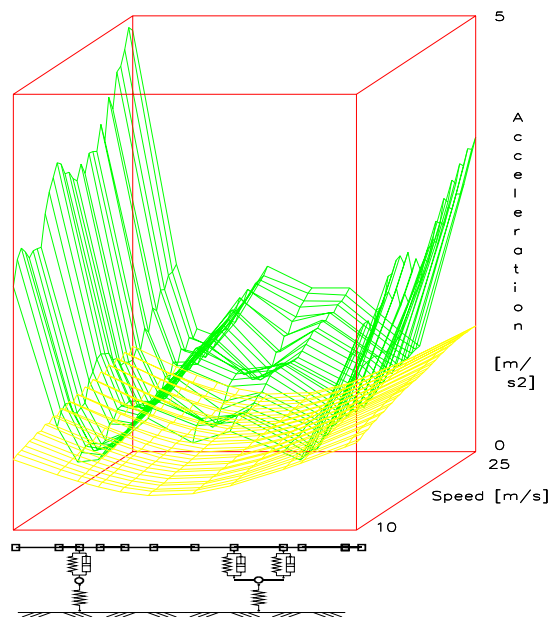
4. ábra Gyorsulás paraméter felület részlet (gyorsulás érzékenység)



5. ábra A felépítmény gyorsulás szórása (--- optimált) és az optimalás eredménye (2 par.)



6. ábra A felépítmény gyorsulás szórása (--- optimált) és az optimalás eredménye (5 par.)



7. ábra A felépítmény gyorsulás szórása a járműhossz és haladási sebesség fgv.-ében (rugalmas és merev felépítményű városi autóbusszmodell beton úton)

Ha csak a csillapítások változása megengedett ($dK_i = \pm 0.8 K_i$!), akkor is már közel hasonló javulás érhető el (5. ábra), igaz a csillapítás extrém csökkentésével. Az egyedi úthibákra adott tranziens lengésválaszok ekkor nem eléggé csillapítottak (stabilitási probléma).

Elméletileg lehetőség van a vázszerkezet belső csillapítását is változtatni. A már 5 paraméteres optimálási feladat eredményei (6. ábra) megerősítik a redukált gerenda modell strukturális tulajdonságait (7. ábra). A belső csillapítás növelésével ($d\lambda = 0.4 \lambda$) a rugalmas test merevedik, ami a felépítmény gyorsulásának csökkenését alapvetően meghatározza ill. meghatározná.

Összefoglalás

Egy adott fizikai paraméterekkel rendelkező járműnél ill. annak modelljénél a hasznos terhelés, a jármű haladási sebessége és az úttípus is változik, melyek alapvetően befolyásolják a jármű szerkezetdinamikai jellemzőit.

A bemutatott számítógépes eljárásokkal és programmal azonban lehetőség van a jármű optimális felfüggesztés paramétereinek megbízható és gyors becslésére egy adott terhelés konfigurációhoz tartozóan. A járműbe ténylegesen beépítésre kerülő légrugó és csillapító elemek kiválasztásánál az igazi problémát a reális célfüggvény megfogalmazása jelenti.

Irodalom

- Lógó, J. (1988): Rúdszerkezetek tervezése többcélűfüggvényes programozással. Egyetemi doktori értekezés. Budapest (1988).
- Lógó, J. (2005): New Type of Optimal Topologies by Iterative Method, Mechanics Based Design of Structures and Machines, (2005), 33, pp. 149-172. Imp.f. 0.265.
- Michelberger P., Bokor J., Palkovics L.(1994): Robust design of active suspension system, International Journal of Vehicle Design, 14(2-3):145-165.
- M. Mitschke (1990): Fahrzeugdynamik, Band B, Springer Verlag
- Palkovics L., P. Venhovens, Bokor J.(1994): Design problems of the semi-active wheel suspension system and a possible way of their elimination, FISITA'94 Conf., Beijing, China, 30-41.

- Péter T., Bellay Á.* (1986): Integral transformations of road profile excitation spectra for variable vehicle speeds, *Vehicle System Dynamics* 15: 19-40.
- Péter T.* (1997): Gépjármű lengőrendszerek felfüggesztésparamétereinek optimalálása. MTA, Budapest, Kandidátusi értekezés, 1997.
- Péter T.* (2000): Mathematical Transformations of Road Profile Excitation for Variable Vehicle Speeds. *Studies in Vehicle Engineering and Transportation Science. A Festschrift in Honor of Professor Pál Michelberger on Occasion of his 70th Birthday.* Hungarian Academy of Sciences – BUTE 2000. 51-69 p.
- Péter T.* (1992): Reduction of parameters of spatial non-linear vehicle swinging systems, for identification and optimisation purposes. *Periodica Polytechnica* Vol.36.No.1.1992. 131-141 p.
- Szőke D., Gajdár T.* (1995): Optimal Control of Flexible Bus Structures 28th ISATA Conference, Stuttgart, 18-22. Sept. 1995, pp. 753-762.
- Szőke D.* (1999): Effect of nonlinearities on the dynamic loads of bus framework structure, 30th Meeting of Bus and Coach Experts, Győr, 247-257.
- Szőke D.* (2001): Modalanalyse der dynamisch kondensierten Schwingungssysteme GAMM Tagung, Zürich, 2001. febr. 10-14. pp. 142-143.
- Szőke D.* (2001): Az általánosított sajátérték feladat közelítő megoldása MicroCAD2001 International Scientific Conference, Miskolc, 2000. márc. 1-2. pp. 127-132.