A futóművek üzemeltetési megbízhatóságának és rendelkezésre állásának elemzése az üzemeltetési folyamat Markov- és szemi-Markov modelljének segítségével

Dr. Csiba József

A futóművek, mint komplex műszaki rendszerek megbízhatóságának, rendelkezésre állásának elemzése számos célzatú lehet. Az elemzés irányulhat bizonyos műszaki kockázatok meghatározására, de cél lehet üzemeltetési körülmények hatásának számbavétele is. Fontos gyakorlati jelentőséggel bír a rendszer megbízhatóságon keresztül az alkalmazott karbantartási technológiák, azok gyakorlatának minősítése. Az üzemeltetési megbízhatóság és rendelkezésre állás elemzésére szokásos eljárás közül lehet módszert választani. Jelen esetben az elemzés az üzemeltetési folyamat Markov- és szemi-Markov modellje segítségével kerül végrehajtásra. Az elemzés során természetesen kitüntetett jelentőséggel bír az alkalmas modell kiválasztása ahhoz, hogy az üzemeltetéssel kapcsolatos felmerülő alapkérdésekre helyes válaszokat lehessen adni. Az elemzés fontos része a forgóvázak, futóművek sztochasztikus üzemeltetési folyamatának homogenitási vizsgálata.

KULCSSZAVAK: megbízhatóság, rendelkezésre állás, üzemeltetési folyamat Markov- és szemi-Markov modellje, sztochasztikus folyamat, homogenitás vizsgálat, átmenetvalószínűségek, átmenetvalószínűségek, statisztikái.

I. Bevezetés

A jelen tanulmány egy, a vasúti járművek, azok futóművének megbízhatósági viszonyainak elemzésére vonatkozó kutatási munka közbenső fázisát mutatja be. Az elemzés a futóművek üzemi viselkedését veszi „górcső alá” egy megbízhatósági modell keretében. A mostani álláspontig az üzemeltetési folyamat sajátosságai alapján megtörtént a megbízhatósági modellhez illeszkedő elemzési módszer kiválasztása. A forgóvázakra vonatkozó üzemeltetési adathalmaz statisztikai elemzésével választ kaphatunk az üzemeltetők alapkérdéseire. A munka során többféle modell közül kell kiválasztani a legalkalmasabbat, majd az alapkérdésekre kapott válaszok alapján ún. homogenitás vizsgálatot kell végezni. A jövőbeni feladatok sora tartalmazza a teljes homogenitás vizsgálatot követő érzékenység és függetlenség vizsgálatokat is.

2. A forgóváz és futómű üzemeltetők alapkérdései

A forgóvázakat- és futóműveket üzemeltetők alapkérdései a feladataikból adódnak. A fő feladatuk az üzemhez, a személy- és teherforgalom megfelelő szintű lebonyolításához szükséges járműállag tervezett szintű rendelkezésre állásának biztosítása. Kívánatos, hogy a járműállag rendelkezésre állása az előre megtervezett, a vasútüzem sajátságaiból adódóan egyeztetett és koordinált tervezett üzemi folyamat, technológia mellett valósuljon meg. Az alapkérdések az üzemi folyamat változatlanságának biztosítására törekvésből adódnak:

1. Ha tekintjük a következő eseményt mint előzményi eseményt miszerint „a vasúti jármű forgóvázak üzemre alkalmasak és jelenleg üzemben vannak", akkor mi annak az eseménynek az előző feltételi esemény melletti feltételes valószínűsége, hogy ezek a forgóvázak holnap is üzemképesek lesznek és üzemben lesznek?
2. Ha a feltételi esemény az, hogy a forgóvázak karbantartáson vannak, akkor mi a feltételes valószínűsége annak az eseménynek, hogy ezek a forgóvázak a jelzett feltételi esemény mellett holnap normál üzemben lesznek, vagy például személykocsi esetén az a kocsi, amely alá be vannak kötve, üzemképesen a tároló vágányra áll.
3. A statisztikai jellemzőket tekintve milyen hosszú időtartam alatt lesznek a forgóvázak üzemben, karbantartásban vagy javításban stb.

Az első két kérdéskör a tervezett üzemi folyamattól való eltéréssel, a harmadik pedig a folyamat tervszerű módosításával van kapcsolatban. (Természetesen az alapkérdésekre kapott válaszok a járműállag nagyságát is meghatározzák az üzemi technológia betarthatósága mellett.) Célunk az is, választ kapjunk miszerint helyes volt-e a modellválasztás, valamint az a feltételezés, miszerint az egyes üzemeltetési állapotok közötti átmenetek dinamikája homogén Markov-láncokkal kezelhető. A vizsgálatok eredményeként kimutatásra kerül, hogy a meghatározott állapotba kerülés független vagy nem független attól, hogy a vizsgálat mikor kezdődött.

2.1. A járművek, illetve forgóvázaik, futóműveik üzemeltetési állapotai

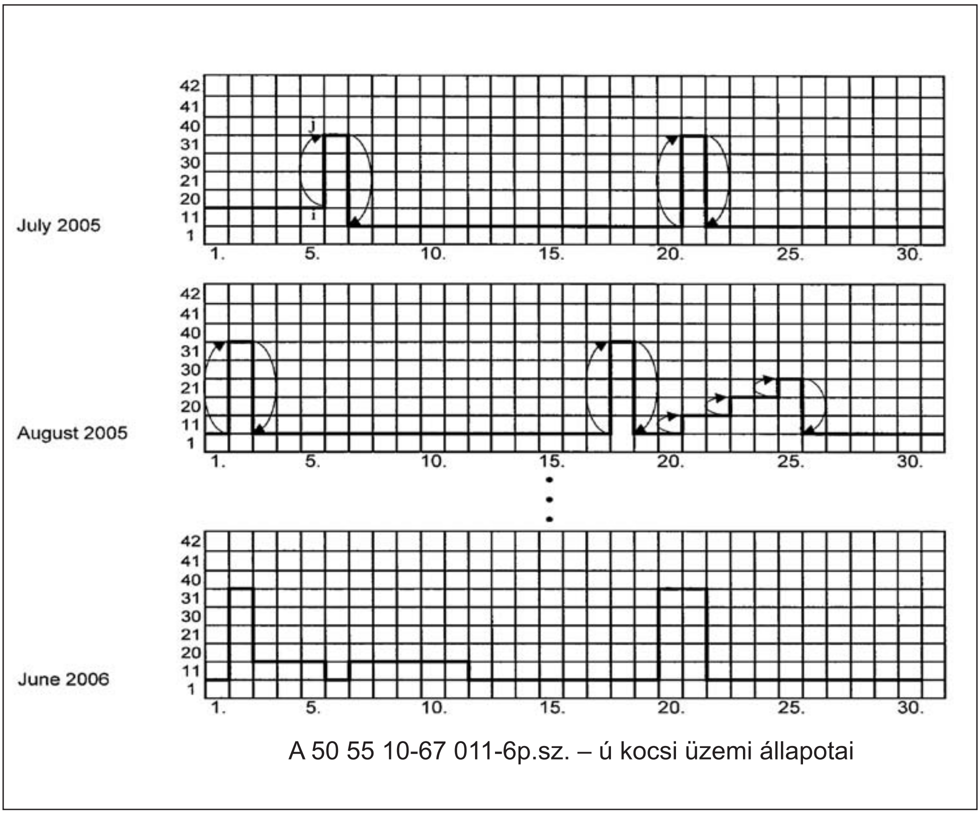
A járművek, ill. forgóvázaik, futóműveik üzemük során különböző állapotokba kerülnek. Az egyes állapotok befolyással bírnak az egyes járművek, az egyes járműtípusok és az egész járműállag (üzemeltetési) költségeire, ezeken keresztül a járművekkel kapcsolatos szolgáltatási árakra. Az elemzés szempontjából a vizsgálat tárgyát jelentő üzemeltetési állapotok a következők:

– a jármű üzemben, forgalomban van (1),
– a jármű üzemképes és vár üzemre (11),

– a jármű karbantartásra vár (20),
– a jármű karbantartáson van (21),
– a jármű javításra vár (30),
– a jármű javításban van (31),
– a jármű magasabb szintű karbantartásra vár (40),
– a jármű magasabb szintű karbantartáson van (41),
– a jármű garanciális javításra vár magasabb szintű karbantartás után (42).

Az egyes állapotokat magában foglaló elvi lépcsős diagramot (realizációs függvényt) mutat az *1. ábra.*

Az egyes jármű, járműszerkezet üzemeltetési és fenntartási költségeinek csökkentését ezeken keresztül a szolgáltatás gazdasági eredményességének javítását szolgálja a forgóváz, futómű gyengepontjainak meghatározása. Tehát azon túlmenően, hogy a forgóvázat javítani kell, szükséges ismerni a konkrét okot. Erre szolgál az elvi hibafa elkészítése, majd a meghibásodások elemzésén keresztül a gyengepontok megállapítása.



1. ábra. Realizációs függvény egy naptári évre vonatkozóan

A gyengepontok ismeretében műszaki intézkedéseket lehet hozni a forgóváz egyes elemein keresztül a forgóváz, ezen keresztül pedig a járműtípus megbízhatóságának, valamint a rendelkezésre állásának növelésére. A műszaki intézkedések vonatkozhatnak a karbantartási technológiára, a szóban forgó alkatrész gyártási technológiájára, az alkatrész, alkatrészek konstrukciós módosítására.

3. A forgóvázak és futóművek mint műszaki rendszerek állapot átmeneteinek és azok kezelésének valamint az egyes állapotokban tartózkodás meghatározásának matematikai háttere

A bevezetőben bemutatott alapkérdések első két csoportjának vizsgálata azonos matematikai módszert kíván. A forgóvázakat, ill. futóműveket műszaki rendszernek tekintve a különböző állapotba kerülés adott feltétel melletti valószínűsége a rendszerbeli állapot átmenetek elméletének alkalmazásaival határozható meg. Az állapot átmenet-valószínűségi jellemzői ismeretében a folyamat jellemzése lehetővé válik. A tömegkiszolgálási rendszerek elméletében megjelenő folyamatokhoz hasonló folyamatok és eszközök alkalmazása szükséges. A sztochasztikus (valószínűségi) folyamat az $X_t(\omega)$ valószínűségi változók egyparaméteres családja, ahol a t paraméterváltozó az aktuális időpont azonosítására szolgál. Az ω argumentum az elemei eseményt és a véletlentől való függést jelöli.

3.1. A sztochasztikus folyamatok osztályozása

A sztochasztikus folyamatok osztályozása számos szempont szerint lehetséges. A jelen vizsgálatok tárgya alapján a következők rögzíthetők:

- az egyes állapotokat leíró sztochasztikus folyamatok valószínűségi változói lehetnek diszkrétek vagy folytonosak,
- a t index általában az időparamétert jelent,
- a folyamat szerkezetét a különböző t indexekhez tartozó $X_t(\omega)$ valószínűségi változók közötti statisztikai függőségi feltételek határozzák meg,
- a Markov-folyamatok rendkívüli szereppel bírnak a műszaki rendszerek analízisében, ugyanis a markovitás esetében a folyamat jövőbeni állapotainak a jelen állapot ismerete melletti feltételes valószínűsége meghatározott, azaz a jövőbeni állapotok előfordulásának feltételes valószínűségei közvetlenül nem függenek a múltbeli feltételi állapotok alakulásától, csupán az utolsó, a jelen feltételi állapotra vonatkozó feltételes valószínűségek ismerete szükséges.

Az üzemelés során a forgóvázak elemeinek egyes megadott állapotokba kerülése sztochasztikus folyamat. A folyamat a t paraméteres $X_t(\omega)$ (valószínűségi változó sereggel jellemezhető. Az állapotok egymásra következésének statisztikus szabályosságát

Markov-láncoknál elsőnek az egylépéses p_{ij} állapot átmeneti valószínűségek kvadratikus $\underline{\underline{\Pi}}$ mátrixa írja le, és értelemszerűen a most vizsgált diszkérét értékű szemi-Markov-folyamat $\xi(t,\omega)$ beágyazott Markov-láncát is ezen egylépéses átmenet-valószínűségek jellemzik:

$$p_{ij} \overset{def}{=} P\Big\{\{\omega:\xi(t_a^+,\omega)=j\}\Big|\{\omega:\xi(t_a^-,\omega)=i\}\Big\}$$

A kifejezésben a t_a^+, ill. a t_a^- jelölések az állapot-átmenethez tartozó t_a időpontot közvetlenül követő ill. közvetlenül megelőző időpillanatot azonosítják.

A lépcsős realizációk vizsgálata folytonos idejű és diszkrét állapotú szemi-Markov folyamat modellje segítségével történik. A szemi-Markov folyamat állapotterében kijelölt diszkrét szinteken eltöltött – valószínűségi változóként azonosított – $\{\tau_i^k(\omega)\}$ időtartamokat a szintre érkezés előtti átmenet jellemzőinek beépítésével értelmezett $F_{ij}(t)$ feltételes eloszlás függvényekkel jellemzik. Az utóbbi feltételes eloszlásfüggvényekből képezhető azután a szinttartózkodási viszonyokat jellemző $\underset{nxn}{F}(t)$ négyzetes mátrix-értékű időfüggvény. A jelzett négyzetes mátrixértékű időfüggvény $F_{ij}(t)$ feltételes valószínűségi eloszlásfüggvényekből való felépülését az következő képlet mutatja:

$$\underset{nxn}{\underline{\underline{F}}}(t)=\begin{bmatrix} 0 & F_{12}(t) & \cdots & F_{1n}(t) \\ F_{21}(t) & 0 & \cdots & F_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n1}(t) & F_{n2}(t) & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

A mátrix főátlójában csupa zérus áll, hiszen ezen indexpároknál az átmenet-valószínűségi mátrix elemei is zérus értékűek, azaz $p_{ii} = 0$.

Az m-edik állapotbeli tartózkodási idő feltételes eloszlásfüggvénye a következő összefüggéssel határozható meg:

$$F_{im}(t) \overset{def}{=} P\Big\{\{\omega:\tau_m(\omega)<t\}\Big|\big\{\{\xi(t_a^-,\omega)=i\}\cap\{\xi(t_a^+,\omega)=m\}\big\}\Big\}$$

Ismételten utalunk arra, hogy a szemi-Markov lépcsős folyamatbeli állapot-átmenetek váltakozását a diszkrét és véges állapotterű beágyazott Markov lánc képviseli a jelen modellben. Kiemeljük, hogy a Markov-folyamatok azon esetek leírására alkalmasak, amikor a korábbi állapotok ismerete nincs hatással a folyamat jövőbeni sztochasztikus viselkedésére. A jövőbeni állapotra csak a jelenlegi állapot van befolyással. A folyamat első lépésbeli jellemzése a $\underline{\underline{\Pi}}$ egylépéses átmenet-valószínűségi mátrixszal írható le. Ezen mátrix – mint már láttuk – feltételes valószínűségeket tartalmaz, jellemezve a folyamat egy lépésben megvalósuló állapot átmeneteit.

4. A forgóvázak, futóművek sztochasztikus üzemeltetési folyamatának homogenitás-vizsgálata

A homogenitás-vizsgálat célja a valószínűségi mechanizmus jellemző természetének megállapítása. Feladat továbbá az ezen valószínűségi mechanizmus időbeli homogenitásának vizsgálata. Így vizsgálatra kerül, hogy az állapotátmenetek sztochasztikus folyamatának egylépéses átmeneti valószínűségi mátrixa ($\underline{\underline{\Pi}}$) kielégíti-e azt a homogén folyamatokra jellemző sajátosságot, miszerint az egylépéses átmenet-valószínűségi mátrix átmeneti lépésszám szerinti hatványozása elvezet az n-lépéses átmenet-valószínűségi mátrixhoz. Homogén Markov-láncokra ugyanis igaz a következő mátrix hatvány egyenlőség:

$$\underline{\underline{\Pi}}^{(r)} \stackrel{?}{=} \left[\underline{\underline{\Pi}}^{(1)}\right]^{r},$$

ahol r a lépések száma. Az r-lépéses átmenet-valószínűség meghatározása a homogenitás vizsgálat első lépése. Továbbiakban a statisztikai jellemzők meghatározása szintén a homogenitás vizsgálatát szolgálják.

A homogenitás vizsgálat során vizsgáljuk:

a) az egyes forgóvázak (forgóvázpárok) egylépéses átmeneti valószínűségi mátrixainak átlagát, ha n számú forgóváz(pár) képezi a vizsgálat tárgyát és a vizsgálat időtartama egy naptári év, akkor az átmeneti valószínűségi mátrix:

$$_{k}\underline{\underline{\Pi}}^{(1,2,\ldots,365)} \qquad k = 1,\ldots,n,$$

az átlagmátrix:

$$\overline{\underline{\underline{\Pi}}}^{(1,2,\ldots,365)} = \frac{1}{n}\sum_{\kappa=1}^{n} {}_{k}\underline{\underline{\Pi}}^{(1,2,\ldots,365)}$$

b) az átlagmátrix ismeretében minden egyes forgóvázra, forgóvázpárra meghatározásra kerülnek az éves átmeneti valószínűségi mátrixtól való eltérések:

$$_{k}\underline{\underline{\Pi}}_{eltérés} = {}_{k}\underline{\underline{\Pi}}^{(1,2,\ldots,365)} - \overline{\underline{\underline{\Pi}}}^{(1,2,\ldots,365)}, \quad k = 1,2,\ldots,n;$$

c) kiválasztásra kerülnek abszolút értékükkel az összes forgóvázra vonatkozó átmeneti valószínűségek eltéréseinek legkisebb és legnagyobb értékei:

$$k_k \ \min\left|{}_{eltérés}P_{ij}\right|;$$

$$k_k \ \max\left|{}_{eltérés}P_{ij}\right|, \quad k = 1,2,\ldots,12;$$

d) statisztikai jellemzőként az előbbi legkisebb és legnagyobb eltérések száma is bemutatásra kerül, természetesen az összes jármű forgóvázást illetően:

$$\sigma \min\left|{}_{eltérés} P_{ij}\right|;$$

$$\sigma \max\left|{}_{eltérés} P_{ij}\right|;$$

e) szintén mint statisztikai jellemzők kiszámításra kerülnek az eltérés mátrixok normai minden járműnél;

f) az eltérés mátrixok normáinak meghatározása után a normákat elosztjuk a négyzetes mátrix elemszámával, ez a mutató a mátrix elemének az átlagértéktől való eltérésének globális jellemzését adja, amely a homogenitás egy jellemzője;

g) a kezdő és végállapotot leíró egylépéses átmeneti valószínűségi mátrix közötti

$$_t\underline{\underline{\Pi}}^{(r)} \stackrel{?}{=} \left[{}_t\underline{\underline{\Pi}}^{(1)} \right]^r$$

hatvány-összefüggés fennállásának vizsgálata:

A vizsgálat eredményei

– Az egyes járművek 1 évre vonatkozó állapotairól az első ábra mutat egy realizációt.

– Az egyes járművek üzemeltetési viszonyait a realizáció alapján az alábbi Π egylépéses átmenet-valószínűségi mátrix írja le (példaként egyetlen járműről):

0,0000	0,2727	0,0455	0,0000	0,0000	0,5455	0,1364	0,0000	0,0000
0,8125	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1875	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,4706	0,5294	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3333	0,6667
0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000

– A 23 jármű átlagolt egylépéses átmenet-valószínűségi átlag mátrix:

0,0000	0,4773	0,0281	0,0579	0,0021	0,3997	0,0255	0,0000	0,0094
0,7952	0,0000	0,0074	0,0254	0,0000	0,1561	0,0140	0,0013	0,0007
0,0000	0,0000	0,0000	0,5870	0,0000	0,1087	0,0000	0,0000	0,0000
0,4796	0,3626	0,0000	0,0000	0,0000	0,0999	0,0145	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1304	0,0000	0,0000	0,0000
0,5795	0,3956	0,0040	0,0130	0,0017	0,0000	0,0041	0,0000	0,0021
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4058	0,2464
0,4783	0,1304	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1667	0,2319	0,0000	0,0000	0,0000	0,0362	0,0000	0,0435	0,0000

– Az első járműre vonatkozó különbség mátrix, vagyis az egyes járműegyedhez tartozó átmenet-valószínűség mátrix és az átlag mátrix és különbsége:

0,0000	0,2046	–0,0174	0,0579	0,0021	–0,1457	–0,1109	0,0000	0,0094
–0,0173	0,0000	0,0074	0,0254	0,0000	–0,0314	0,0140	0,0013	0,0007
0,0000	0,0000	0,0000	0,5870	0,0000	–0,8913	0,0000	0,0000	0,0000
0,4796	0,3626	0,0000	0,0000	0,0000	0,0999	0,0145	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1304	0,0000	0,0000	0,0000
0,1089	–0,1338	0,0040	0,0130	0,0017	0,0000	0,0041	0,0000	0,0021
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0725	–0,4203
0,4783	–0,8696	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1667	–0,2681	0,0000	0,0000	0,0000	–0,4638	0,0000	0,0435	0,0000

– Az első járműre vonatkozóan a különbség mátrixok legkisebb és legnagyobb elemei abszolút értékekkel

$$_1\min\left|_{eltérés} P_{ij}\right| = 0{,}0007; \quad _1\max\left|_{eltérés} P_{ij}\right| = 0{,}7406,$$

– A maximum és minimum szórásértékek

$$\sigma \min\left|_{eltérés} P_{ij}\right| = 0{,}0002; \quad \sigma \max\left|_{eltérés} P_{ij}\right| = 0{,}1462.$$

– Az eltérés mátrixok normája rendre (azaz kocsinként) 0,5627, 0,2911 stb.
– A mátrix normák egy elemére vonatkoztatott értékei 0,0069, 0,0036 stb.

Különböző jellemző mennyiségekre vonatkozó összehasonlítási és értékelési lehetőségeket dolgoztunk ki a realizációs függvény sokaság statisztikai kiértékelésével. Legígéretesebbnek tűnik a mátrixnorma értékek összehasonlításán alapuló vizsgálat. A nyert eredmények alapján a tekintett vasúti személykocsik üzemi folyamatának szemi-Markov-modelljében a beágyazott Markov-lánc homogenitása közelítőleg teljesül. További vizsgálatok szükségesek az alkalmazott összehasonlító eljárások statisztikai becsléselméleti jellemzőinek kimunkálására. Szükséges a megfigyeléseket a jelen vizsgálatban szereplő járműsokaságnál nagyobb járműpark esetére kiterjeszteni

5. Következtetések

- A kutatási munka eredményei alapján egy, a vasúti járművek, azok futóművének megbízhatósági viszonyainak elemzésére vonatkozó kutatási munka közbenső fázisa került bemutatásra, amikor is egy megbízhatósági modell keretében a forgóvázak, futóművek üzemi viselkedését vizsgáltuk.
- Három alapvető üzemeltetési kérdés csoport került megfogalmazásra. A megválaszolásához a számos és a gyakorlatban ismert megoldási lehetőségek közül a sztochasztikus folyamatok, ezen belül a Markov-láncok alkalmazását hívtuk segítségül.
- A részletes homogenitás vizsgálat a módszer kiválasztásának helyességét volt hivatott igazolni az alkalmazott elemzési módszer alkalmas lehetőséget adott a futóművek karbantartásánál használt technológia és a bevezetett módszer minősítésére is.
- A kutatási munka következő fázisa a matematikai statisztikai eszközökkel végzendő érzékenység- és függetlenség vizsgálat.

Irodalomjegyzék

[1] *Csiba, J. – Zobory, I.:* Application of the Block Diagram Method for the Examination and Determination of the reliability of Railway Rolling Stock. Congress reports of 18th EUROMAINTENCE 2006, 3rd WORLD CONGRESS of MAINTENANCE. 20–22. June, 2006 Basel/Switzerland. In *Guido Walt – H.-Joachim Behrend* (Publishers). MM Support GmbH, CH-3000 Bern, p.809–814.

[2] *Csiba, J.:* Reliability Analyses of Complex Systems by Using Markov-Chains. Presentation in Maintenance Conference in Prag, 2006. (Konferencia kiadvány).

[3] *Feller, W.:* An Introduction to Probability Theory And Its Applications John Wiley and Sons, Inc. New York, 1978.

[4] *Kleinrock, L.:* Sorbanállási rendszerek. Vol. I.: Elmélet. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.

[5] *Zobory, I.:* Vasúti járművek üzemeltetéselmélete. Egyetemi jegyzet. Budapest Technical University. Faculty of Transportation Engineering, Department of Railway Vehicles, Budapest, 1991.

[6] *Zobory, I. – Békefi, E.:* Software STOPSIM for Stochastic Simulation of Motion and Loading Processes of vehicles. Periodica Polytechnica, (Transportation Engineering) Vol. 22. No. 2, Budapest, 1994, p.111–127.

[7] Zobory, I.: Megbízhatóságelmélet, Egyetemi jegyzet. Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar, Vasúti Járművek Tanszék, Budapest, 1994.

[8] *Zobory, I.:* Sztochasztikus folyamatok. Egyetemi jegyzet. Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar, Vasúti Járművek Tanszék, Budapest, 1986.