A műszaki rendszerek megbízhatósága érzékenység vizsgálatának szükségessége és módszere

(Érzékenységvizsgálat és a karbantartási tevékenység minősítése)

Dr. Csiba József

A műszaki rendszerek tervezésénél és üzemeltetésénél mind a rendszertulajdonos, mind a rendszerüzemeltető számára alapvető információ, hogy a szóban forgó rendszernek milyen mértékű a megbízhatósága egy előre rögzített t időpontban. A t időpontbeli R(t) rendszer-megbízhatóság egy számérték, mely egyedül is jellemezheti mind a műszaki rendszert, mind a rendszer megfelelő szintű megbízhatóságát biztosítani hivatott tevékenységet, a karbantartást. A megbízhatóság értékével adott jellemzés a rendszer műszaki értékelésére és költségbehatárolásra – azaz „forintosításra" – egyaránt alkalmas.

A jól átgondolt, hosszú távon kellő eredményt biztosító karbantartási intézkedés nem tudja nélkülözni azt az információt amely, arra vonatkozik, hogy a tervezett vagy üzemelő teljes rendszer említett megbízhatóságát milyen mértékben befolyásolja a rendszer valamely meghatározott eleme, elemcsoportja, alrendszere. A kérdéses befolyás nagyságára a rendszer-megbízhatóságának érzékenység vizsgálata adja meg a választ. A válaszadás lényege abban foglalható össze, hogy vizsgálni kell, hogy a teljes rendszer valamely elemének, elem- csoportjának, vagy alrendszerének megbízhatósága egy százalékkal megváltozik, akkor ez a változás hány százalékkal módosítja a teljes rendszer eredő megbízhatóságát.

A megbízhatóság érzékenységvizsgálata szükségessé teszi a tekintett rendszer szerkezeti felépítésének ismeretét, tehát az elemek, az elemcsoportok és az alrendszerek konkrét kapcsolatát, a rendszerben betöltött szerepüket. A rendszer szerkezetének, az elemek, elemcsoportok, alrendszerek kapcsolatának leírására számos módszer terjedt el a megbízhatóság-elméleti vizsgálatok kivitelezéséhez. A módszerek közül a megbízhatósági blokkdiagram módszer[1], valamint a hibafa elemzés[2] módszere a két leggyakrabban alkalmazott szabványos módszer[3].

Jelen tanulmány az érzékenység vizsgálat módszerét egy konkrét vasúti jármű példáján keresztül mutatja be. A vizsgálathoz nélkülözhetetlen a járműszerkezet eredő megbízhatóságának meghatározása. A megbízhatóság meghatározása a két említett módszer alkalmazásával történik.

KULCSSZAVAK: meghibásodás, megbízhatóság, valószínűségi eloszlás, megbízhatósági függvény, érzékenység, vizsgálat, jármű, mint megbízhatósági rendszer, RBD, FTA

---

1 Reliability Block Diagram (RBD)

2 Fault Tree Analysis (FTA)

3 IEC 61025: 2006, Fault tree analysis (FTA) MSz EN 61025: Hibaelemzés. Magyar szabvány, Magyar Szabványügyi Testület, 2007. november, 1+3+49 o.
IEC 61078: Analysis techniques for dependability – Reliability block diagram and Boolean-methods

1. Az érzékenység vizsgálat szükségessége

A műszaki rendszerek t időponthoz tartozó megbízhatóságának mértéke a rendszer [0,t]-beli meghibásodásmentes működése valószínűségének számértékével értelmezett.

Ha a $\tau \geq 0$ valószínűségi változó a rendszer működésképes élettartamát leíró valószínűségi változó, akkor az $R_\tau(t)$ megbízhatósági függvény t-beni helyettesítési értéke annak a valószínűségét adja meg, hogy a rendszer τ működésképes élettartama a t értéket eléri vagy meghaladja.

A τ élettartam $F_\tau(t)$ élettartam eloszlásfüggvénye és a hozzá tartozó $R_\tau(t)$ megbízhatósági függvény a komplementer valószínűségekre vonatkozó

$$R_\tau(t) = P\{\tau \geq t\} = 1 - P\{\tau < t\} = 1 - F_\tau(t)$$

egyenlőségsor alapján függ össze.

A gépi berendezések mechanikai részei élettartamát leíró τ valószínűségi változó az esetek nagy többségében jellegzetesen Weibull-eloszlású, eloszlásfüggvénye pedig:

$$F\tau(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\delta}\right)^b} & t > 0, \end{cases}$$

ahol a három nem negatív paraméter: t_0: helyparaméter,
δ: skálaparaméter,
b: alakparaméter.

Egy mechanikai rendszer általában számos elemből, elemcsoportból, alrendszerből épülhet fel, amelyek mindegyikéről – az egyszerűbb tárgyalásmód alkalmazása érdekében – közelítéssel élve feltételezzük, hogy az egyes elemek, elemcsoportok stb. meghibásodásai azok *egymástól teljesen függetlenül* következnek be, azaz az élettartamukat leíró τ_i valószínűségi változók egymástól teljesen függetlenek. A rendszerelem- vagy alrendszer párok kapcsolata alapesetben soros vagy párhuzamos lehet, azonban a gyakorlatban előforduló számos elem esetén a két alapesetbeli kapcsolatfajta számos kombinációja is megjelenik, sőt olyan kapcsolatok is előfordulnak, amelyek nem rakhatók össze soros és párhozamos kapcsolású elemek kombinációjaként. A kapcsolatok tényleges alakulása meghatározza a rendszer eredő $R_\tau(t)$ megbízhatósági függvényét, valamint természetszerűleg az eredő $\lambda(t)$ meghibásodási rátáját. Az említett eredő jellemzőket célszerű kifejezni a rendszert alkotó részek (elemek, alrendszerek stb.) $r_i(t)$ részmegbízhatóságainak ill. a $\lambda_i(t)$ meghibásodási rátáinak függvényeként.

(1): Ha a rendszer $i=1,2,...,n$ elemből áll, és azok élettartam eloszlásfüggvényeit rendre $f_i(t)$ és megbízhatósági függvényeit pedig $r_i(t)$ jelöli, akkor a rendszer $R_\tau(t)$ eredő megbízhatósági függvénye

– tisztán soros kapcsolatokkal bíró rendszer esetén:

$$R_\tau(t) = \prod_{i=1}^{n} r_i(t),$$

– tisztán párhuzamos kapcsolat okkal bíró rendszer esetén:

$$R_\tau(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - r_i(t)),$$

– általános struktúrájú rendszer esetén az eredő $R_\tau(t)$ megbízhatósági függvény az $r_i(t)$ megbízhatósági függvények meghatározott alakú polinomjaként áll elő. [1]

(2): A fentiekben vizsgált rendszer eredő meghibásodási rátája a következőképpen adódik:

– kizárólag soros kapcsolatokkal bíró rendszer esetén:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t),$$

– kizárólag párhuzamos kapcsolatokkal bíró rendszer esetén:

$$\lambda(t) = -\frac{d}{dt} \ln\left\{1 - \prod_{i=1}^{n}\left[1 - e^{-\int_0^t \lambda_i(u)\,du}\right]\right\}$$

– bármely rendszer esetén az eredő $R_\tau(t)$ ismeretében a keresett $\lambda(t)$ *meghibásodási ráta* az általánosan érvényes:

$$\lambda(t) = -\frac{R_\tau'(t)}{R_\tau(t)}$$

összefüggéssel számítható, [1].

A magas, egyhez közeli megbízhatósági értékek szükségessége miatt nagy jelentőséggel bír annak ismerete, hogy valamely rendszerelem megbízhatóságának 1%-os csökkenése hány stb-os csökkenést okoz a teljes rendszer eredő megbízhatóságában. Az eredő rendszer megbízhatóság alakulásának az előbbiekben körvonalazottak szerinti elemzését *érzékenység vizsgálatnak* (sensitivity analysis) nevezzük.

Érzékenység vizsgálatra szükség van az adott rendszerelem, alrendszer és rendszer tervezésénél, de szükség lehet az üzemeltetés során nyert meghibásodási információk értékelésekor a rendszer, alrendszer ill. a rendszerelem minősítése céljából. A minősítés után következik azon szükséges intézkedések sorozatának kimunkálása és megvalósítása, amelyek az elem, az alrendszer és rajtuk keresztül a teljes rendszer

megbízhatóságának növelését eredményezik. Melyek lehetnek ezek az intézkedések? Intézkedés lehet: karbantartási utasítás módosítása, az alkalmazott anyag módosítása, konstrukció módosítása, más beszállító igénybevétele stb.

2. Az érzékenységvizsgálat módszere

Az előbbiek alapján tehát az érzékenység vizsgálat során arra vagyunk kíváncsiak, hogy a rendszer valamely paraméterének változása mennyiben van hatással a rendszer eredő megbízhatóságának értékére.

Matematikailag a paraméterérzékenységi vizsgálat tulajdonképpen a következő gondolatmenettel vezethető be:

Legyen egy $\underline{y} = \underline{y}_p(t)$ vektorparaméteres időfüggvény, például egy dinamikai rendszer mozgásválasza, mely értékeit az *N*-dimenziós numerikus térből veszi fel, azaz: $\underline{y}_p \in R^N$. A szereplő *n*-dimenziós $\underline{p}$ paramétervektor a dinamikai rendszer inerciális, merevségi, csillapítási és geometriai jellemzőit tartalmazza az alábbi felírás szerint:

$$\underline{p} = [m_1, m_2, \ldots, m_m, s_1, s_2, \ldots, s_m, d_1, d_2, \ldots, d_m, g_1, g_2, \ldots, g_m,]^r \in R^n.$$

Legyen *F* az $\underline{y}_p(t)$ időfüggvényeken értelmezett valamilyen valós értékű funkcionál, amely minden $\underline{y}_p(t)$ függvényhez hozzárendel egy *R*-beli valós számot. Képletes felírással:

$$F: \left\{ \underline{y}_p(t) \right\} \to R.$$

Kérdés ezek után, hogy *F* mennyire érzékeny $\underline{p}$ paramétervektor valamely koordinátájának megváltoztatására. E kérdés megválaszolása azzal adható meg, hogy a rendszer $\underline{p}$ paramétervektora valamely összetevőjének 1%-os változása hány %-os változást eredményez az F-értékében? Amennyiben az *F* funkcionál helyett egy, a $\underline{p}$ paramétervektorokon értelmezett $F: R^n \to R$ függvényt tekintjük, a p_i koordinátáktól függő, *minden változója szerint differenciálható F* függvény ε_i érzékenységei egyszerűen számíthatók a következő kifejezés szerint:

$$\varepsilon_i \overset{def}{=} \frac{\dfrac{\partial F}{F}}{\dfrac{\partial p_i}{p_i}} = \frac{\partial F}{\partial p_i} \cdot \frac{p_i}{F}; \quad i = 1,2,\ldots,n.$$

3. Egy vasúti személykocsi megbízhatóságának meghatározása blokk-diagram módszerrel és hibafa-eljárással

A rendszer-megbízhatóság meghatározására szolgáló számos módszer közül a két legismertebb és leggyakrabban használatos a megbízhatósági blokkdiagram módszer és a hibafa-eljárás ugyanarra az eredményre vezet. A két módszer ellentétes irányból közelíti meg a megoldást, ugyanis az első a túlélési események valószínűségének vizsgálatára alapoz, míg a második a meghibásodási események elemzésére támaszkodik.

3.1. A megbízhatóság meghatározása blokkdiagram módszerrel

A blokkdiagram módszernek a műszaki rendszerek megbízhatóságának meghatározásánál az egyes blokkok $r_i(t)$ megbízhatósági függvényei ismeretében – amennyiben az egyes rendszerelemek meghibásodási eseményei egymástól teljesen független eseményekként vizsgálhatók – a teljes rendszer $R_\tau(t)$ eredő megbízhatósági függvénye:

– soros elrendezésű, („kapcsolású”) blokkok esetén az

$$R_\tau(t) = \prod_{i=1}^{n} r_i(t),$$

– párhuzamos elrendezésű blokkok esetén pedig az

$$R_\tau(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - r_i(t))$$

összefüggéssel határozható meg, [1].

Az 1. és 2. sz. ábrákon ugyanazon vasúti személykocsi rendkívül leegyszerűsített megbízhatósági modellje látható. Az 1. ábrán a modell blokkdiagram módszerrel készült, a másodikon lévő pedig a hibafa elemzés módszerével.

Az egyszerűsített modellekben lévő szerkezeti elemek, egységek, alrendszerek jelölésük a következők:

1. járműszekrény
2. ütközőkészülékek
3. vonókészülékek
4. forgóvázak
5. fékberendezés
6. feljáróajtók
   6/1/1, 6/1/2 egyik oldali feljáróajtók
   6/2/4, 6/2/2 másik oldali feljáróajtók

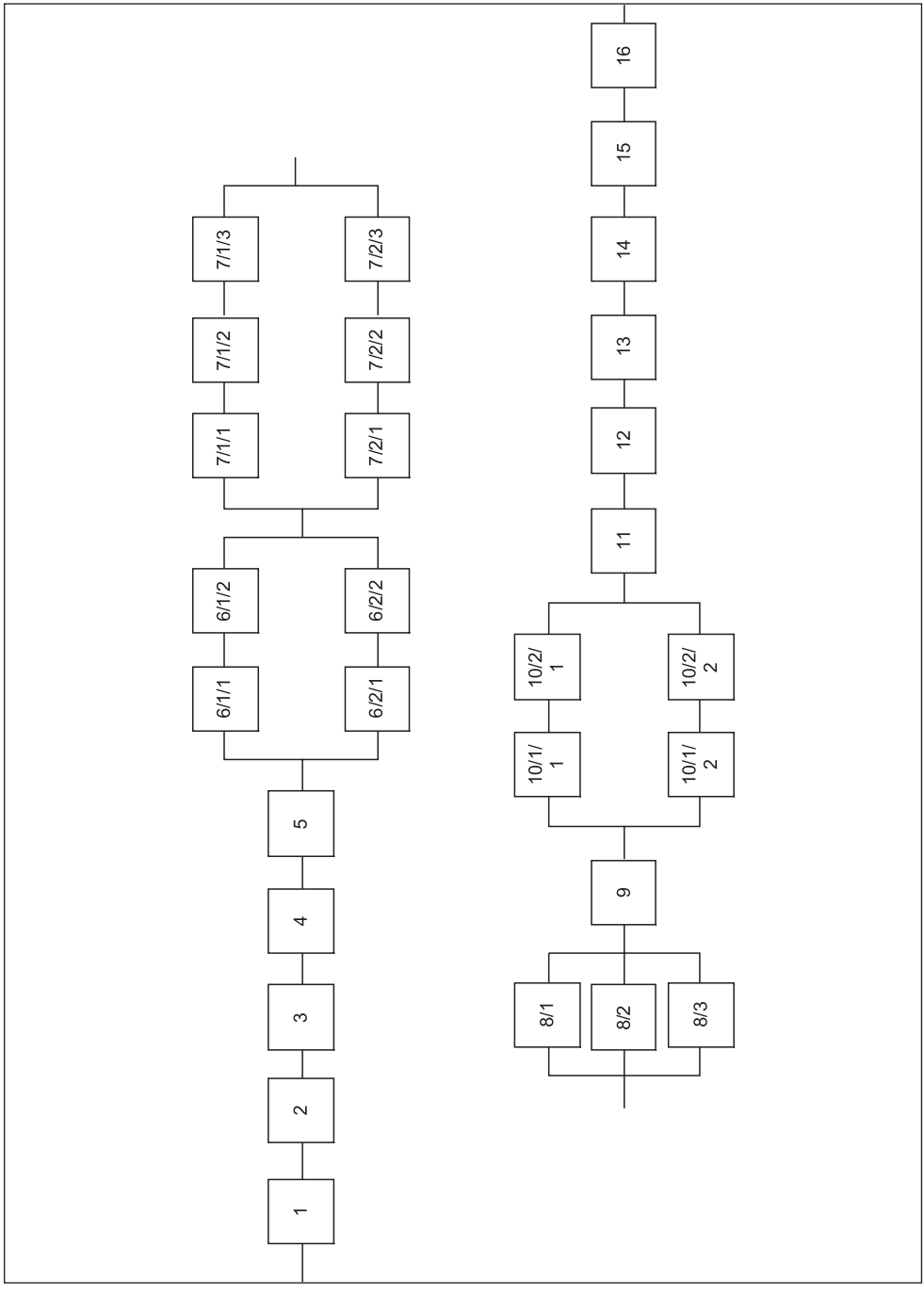
7. WC-k
   7/1/1, 7/1/2, 7/1/3 egyik kocsivégi WC berendezése, világítása, ajtója
   7/2/2, 7/2/2, 7/2/3 a másik kocsivégi WC berendezése, világítása, ajtója
8. utastéri világítás
   8/1 utastéri teljes világítás
   8/2 utastéri 1/2 világítás
   8/3 utastéri szükségvilágítás
9. előtéri világítás
10. beépített zárjelző
    10/1/1, 10/1/2 egyik kocsivégi beépített világítás
    10/2/1, 10/2/2 másik kocsivégi beépített világítás
11. energiaellátó berendezés
12. hangosítás
13. légjavító berendezés
14. fedélzeti diagnosztikai berendezés
15. tűzjelző berendezés
16. belső berendezés.

3.2. A megbízhatóság meghatározása hibafa-eljárással

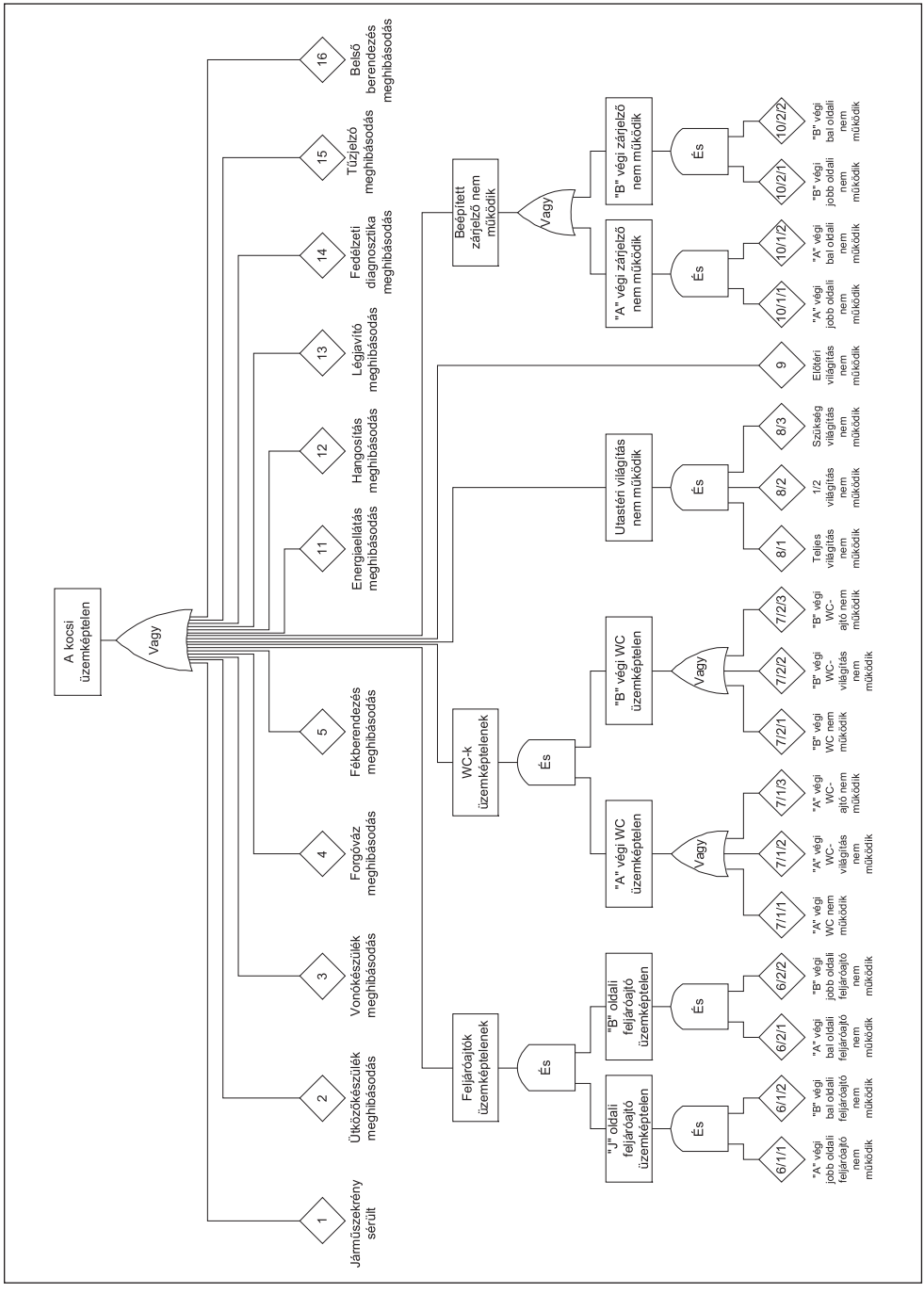
A hibafa-eljárás alkalmazása esetén (2. ábra) azt vizsgáljuk, hogy valamely rendszerelem, elemcsoport vagy alrendszer meghibásodásának bekövetkezése milyen hatással lesz a teljes rendszer eredő meghibásodási valószínűségére illetve az utóbbiból egyértelműen meghatározható megbízhatóságára. A bekövetkezett hatás milyensége alapvetően attól függ, hogy hol következett be a hiba, és a meghibásodott elem, elemcsoport, alrendszer milyen összefüggésben van a rendszer többi elemével, elemcsoportjával, alrendszerével. A műszaki rendszerek többségében az elemek, alrendszerek igen sok esetben „vagy” – kapcsolatban („vagy” – kapu) vannak, vagyis az elemek, elemcsoportok, az azokból összeálló alrendszerek meghibásodási eseményei (A_1, A_2, $A_{3...}$) bármelyikének bekövetkezése a teljes rendszer üzemképtelenségének bekövetkezését vonja maga után. Az esemény algebra és a valószínűségelmélet módszereit segítségül hívva, pl. három elem esetében a $T = \{A_1 \cup A_2 \cup A_3\}$ „csúcsesemény” („top event”) bekövetkezésének $P(T)$ valószínűsége az ismert *Poincare*-formula alapján számítható:

$$P(T)=P\{A_1 \cup A_2 \cup A_3\}=P\{A_1\}+P\{A_2\}+P\{A_3\}-$$
$$-P\{A_1 \cap A_2\}-P\{A_1 \cap A_3\}-P\{A_2 \cap A_3\}+P\{A_1 \cap A_2 \cap A_3\}.$$

A vizsgálandó vasúti személykocsi mint rendszer tekintetbe vett meghatározó elemeinek meghibásodási eseményei „vagy” – kapcsolatban vannak egymással, azaz



1. ábra. Vasúti személykocsi elvi blokkdiagram modellje



2. ábra. Vasúti személykocsi elvi hibafa modellje

bármely elemnek a meghibásodása a teljes kocsi üzemképtelenségét eredményezi. Az igen leegyszerűsített modellben 16 elem, részegység került figyelembe véve. A 16 elemre a fenti eseményalgebrai meggondolást és a *Poincaré*-formulát alkalmazva az alábbi összefüggést kapjuk:

$$P(T)= P\{A_1 \cup A_2 \cup A_{3...} \cup A_{16}\}=$$
$$P\{A_1\}+P\{A_2\}+\ldots+P\{A_{16}\}-P\{A_1 \cap A_2\}-\ldots-P\{A_{15} \cap A_{16}\}+P\{A_1 \cap A_2 \cap A_3\}+\ldots$$
$$+P\{A_{14} \cap A_{15} \cap A_{16}\}-P\{A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4\}-\ldots-P\{A_{13} \cap A_{14} \cap A_{15} \cap A_{16}\}+$$
$$+\ldots-P\{A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap \ldots\ldots \cap A_{16}\} .$$

A vizsgálat tárgyát képező vasúti személykocsi hibafa-elemzési módszerrel készült vizsgálati modellben van néhány elem, amelyek kapcsolódása az elemcsoporton, alrendszeren belül „és" – kapcsolatú („és" – kapu), ami azt jelenti két elemnél, hogy mindkettő együttes meghibásodásának bekövetkezése esetén lesz a vizsgált alrendszer, elemcsoport üzemképtelen.

A teljesen független események együttes bekövetkezési valószínűségére vonatkozó szorzási tételt alkalmazva az „és" – kapura vonatkozó összefüggés valamely T^* és T^{**} részleges top-event-ek esetén a következő konkrét formát ölti:

$$P\{T^*\}=P\{A_1 \cap A_2\}=P\{A_1\}P\{A_2\},$$
$$P\{T^{**}\}=P\{A_1 \cap A_2 \cap A_3\}=P\{A_1\}P\{A_2\}P\{A_3\} \text{ stb.}$$
$$\ldots$$

A hibafa-elemzés révén a teljes rendszer üzemképtelensége beálltának, mint a T „csúcseseménynek" a valószínűsége ismeretében meghatározható a rendszer R eredő megbízhatósága a vizsgálat alá vett vasúti személykocsi modelljére, éspedig a komplementer esemény valószínűségére vonatkozó ismert összefüggés alapján [2]:

$$R(T) = 1 - P\{T\} = \prod_{i=1}^{16} (1 - P\{A_i\})$$

3.3. A vasúti személykocsinak mint műszaki rendszernek a megbízható- ságának a meghatározására szolgáló összefüggés megbízhatósági blokk- diagram módszer alkalmazásakor

Az 1. ábrán egy vasúti személykocsi rendkívül leegyszerűsített megbízhatósági modellje látható. A blokkdiagram egyes elemei a jármű főbb szerkezeti egységeit jelképezik. A diagramban három főbb szerkezeti egység, melynek az utasbiztonságot és komfortot tekintve meghatározók, némileg nagyobb hangsúlyt kaptak a modellben. Ezek a feljáróajtók, a WC, valamint a világítás rendszere. E szerkezeti egységek abban is különböznek a többiektől, hogy egymással párhuzamosan kapcsolt

blokkokal rendelkező alrendszereket is tartalmaznak. A modellben az egyes elemek megbízhatósága első közelítésként legyen azonosan r_i. A teljes kocsira vonatkozó megbízhatóság R, mely az

$$R = \prod_{i=1}^{16} r_i$$

összefüggéssel határozható meg.
Ahhoz, hogy e szorzatot meghatározzuk, először a párhuzamos elemeket is tartalmazó alrendszerek, szerkezeti egységek megbízhatóságát kell kiszámítani. Ezek:

1) A párhuzamos elemeket (is) tartalmazó alrendszerek a következők:
   - Feljáróajtók,[4]
   - WC,[5]
   - utastéri világítás,[6]
   - beépített zárjelzők[7]

A párhuzamos kapcsolatban lévő elemek vizsgálata

Az előbb felsorolt párhuzamos kapcsolatban lévő elemek, szerkezeti egységek a következő összefüggésekkel határozhatók meg az 1. sz. ábrán lévő vázlatos modell kapcsolati rendszere alapján:

Feljáró ajtók (6)

A kocsit a feljáró ajtajaik szempontjából működőképesnek kell tekinteni, ha az egy oldalon lévő ajtók közül legalább egy üzemképes. Az egyoldali 2 (más kocsi típusoknál esetleg több) ajtó „és”-kapcsolatban van egymással.

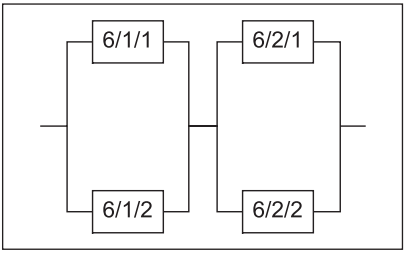
---

4 A kocsit a feljáró ajtók szempontjából működőképesnek kell tekinteni, ha az egy oldalon lévő ajtók közül legalább egy üzemképes. Tehát az egyoldali 2 (más kocsitípusoknál esetleg több) ajtó párhuzamos, illetve „és”-kapcsolatban van egymással.

5 A kocsit az elhelyezett kettő WC-t tekintve működőképesnek kell tekinteni, ha azok közül legalább egy üzemképes, a két WC-t így a kocsiba párhuzamos illetve „és” – kapcsolatának kell tekinteni. Az üzemképesség szempontjából a WC-t is kell minősíteni. Az akkor üzemképes, ha annak zárt WC-berendezése, a WC-fülkében lévő világítás valamint a WC-ajtó kifogástalanul működik. A WC-t alkotta említett 3 alrendszer tehát soros, illetve „vagy”- kapcsolatban van egymással.

6 A kocsit az utastéri világítás szempontjából működőképesnek kell tekinteni, ha a három világítási fokozatból („teljes”, „1/2”, „szükségvilágítás”) legalább egy üzemképes, tehát azok párhuzamos, illetve „és” kapcsolatban vannak egymással.

7 A kocsit a kocsi 2 (A és B) végén beépített 2-2 zárjelzőt tekintve működőképesnek kell tekinteni, ha a szóbanforgó kocsivégen legalább egy lámpa üzemképes. Jelen vizsgálatnál nem képezi megfontolás tárgyát, hogy a kocsi hová van besorolva a szerelvénybe. Az egy kocsivégen beépített két zárlámpa párhuzamos, illetve „és”-kapcsolatban van egymással.



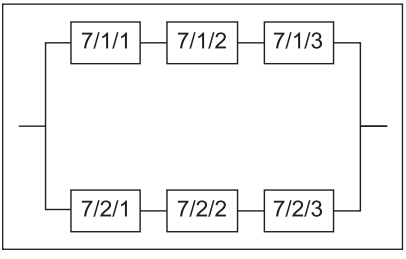
3. ábra. Feljáró ajtók blokkdiagrambeli kapcsolódása

A kétoldali feljáróajtók megbízhatósága r_{611}, r_{612}, r_{621}, r_{622}, melyekre támaszkodva az r_6 eredő megbízhatóság a következő lépések elvégzésével adódik ki:

$$r_6 = r_{61}r_{62};$$
$$r_{61} = 1-(1-r_{611})(1-r_{612}) = r_{611}+r_{612}-r_{611}r_{612};$$
$$r_{62} = r_{621}+r_{622}-r_{621}r_{622}$$
$$r_6 = r_{611}r_{621}+r_{612}r_{621}-r_{611}r_{612}r_{621}+r_{611}r_{622}+r_{612}r_{622}-r_{611}r_{612}r_{622}-r_{611}r_{621}r_{622}-$$
$$-r_{612}r_{621}r_{622}+r_{611}r_{612}r_{621}r_{622}.$$

WC-k (7)

A két kocsivégi WC-berendezés világítási berendezéseinek és ajtóinak megbízhatósága rendre r_{711}, r_{712}, r_{713} *és* r_{721}, r_{722}, r_{723}.



4. ábra. Zárt WC-k meghatározó egységeinek blokkdiagrambeli kapcsolódása

Ezek figyelembevételével az egyes kocsivégek WC-inek megbízhatóságai:

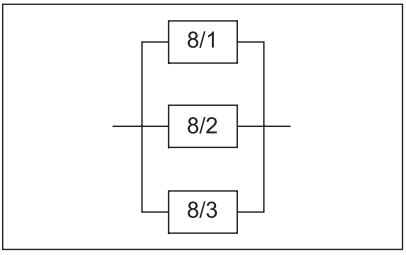
$r_{71} = r_{711}r_{712}r_{713}$ *és* $r_{72} = r_{721}r_{722}r_{723}$;

végül a kocsi WC-inek eredő megbízhatósága:

$$r_7 = 1-(1-r_{71})(1-r_{72}) = r_{711}r_{712}r_{713}+r_{721}r_{722}r_{723}-r_{711}r_{712}r_{713}r_{721}r_{722}r_{723}.$$

Utastéri világítás (8)

A három állapotú (teljes, fél, szükség) utastéri világítás alrendszerei megbízhatóságok: r_{81}, r_{82}, r_{83}.



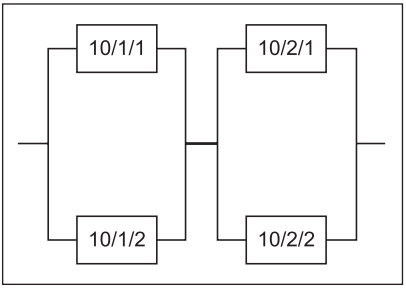
5. ábra. Utastéri világítás meghatározó szolgáltatásainak blokkdiagrambeli kapcsolódása

A teljes utastéri világítás rendszerének megbízhatósága:

$$r_8 = 1-(1-r_{81})(1-r_{82})(1-r_{83}) = r_{81}+r_{82}-r_{81}r_{82}+r_{83}-r_{81}r_{83}-r_{82}r_{83}+r_{81}r_{82}r_{83}.$$

Beépített zárjelzők (10)

A kocsi két végén lévő két-két beépített zárjelző megbízhatósága legyen r_{1011}, r_{1012}, r_{1021}, r_{1022}.
Az eredő, vagyis a kocsi zárjelzői megbízhatóságának (r_{10}) meghatározása azonos alakú, mint a feljáróajtók megbízhatóságának meghatározása, így az eredmény:



6. ábra. Zárjelzők blokkdiagrambeli kapcsolódása

$$r_{10} = r_{1011}r_{1021}+r_{1012}r_{1021}-r_{1011}r_{1012}r_{1021}+r_{1011}r_{1022}+r_{1012}r_{1022}-r_{1011}r_{1012}r_{1022} -r_{1011}r_{1021}r_{1022}-r_{1012}r_{1021}r_{1022}+r_{1011}r_{1012}r_{1022}.$$

A teljes kocsira vonatkozó eredő megbízhatóságot a blokkdiagramban szereplőpárhuzamos kapcsolatú elemeket is tartalmazó szerkezeti egységek megbízhatóságát a velük ekvivalens soros kapcsolású elemek részeredő megbízhatóságaival számolva:

$$R=\prod_{i=1}^{16} r_i = r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 (r_{611} r_{621} + r_{612} r_{621} - r_{611} r_{612} r_{621} + {}_{611} r_{622} + {}_{612} r_{622} -$$

$$- r_{611} r_{612} r_{622} - r_{611} r_{621} r_{622} - r_{612} r_{621} r_{622} + r_{611} r_{612} r_{621} r_{622})(r_{711} r_{712} r_{713} +$$

$$+ r_{721} r_{722} r_{723} - r_{711} r_{712} r_{713} r_{721} r_{722} r_{723})$$

$$(r_{81} + r_{82} + r_{83} - r_{81} r_{82} - r_{81} r_{83} - r_{82} r_{83} + r_{81} r_{82} r_{83}) r_9 (r_{1011} r_{1021} + r_{1012} r_{1021} -$$

$$- r_{1011} r_{1012} r_{1021} + r_{1011} r_{1012} + r_{1012} r_{1012} - r_{1011} r_{1012} r_{1022} - r_{1011} r_{1021} r_{1022} -$$

$$r_{1012} r_{1021} r_{1022} + r_{1011} r_{1012} r_{1021} r_{1022}) r_{11} r_{12} r_{13} r_{14} r_{15} r_{16}$$

3.4. A vasúti személykocsi, mint műszaki rendszer megbízhatóságának meghatározására szolgáló összefüggés a hibafa-elemzés alkalmazásakor

A $\{A_i\}$ jelöli azt az eseményt, hogy a vizsgált járműmodellben az i-edik-jelű elem stb. meghibásodik. Ezen elem meghibásodásának valószínűsége: $P\{A_i\}=P_i$

Az előbbi felsorolásból látható, hogy a rendkívül egyszerűsített vasúti személykocsi modellnek 4 olyan eleme van, amelyeknél az elemek kapcsolódása azonos célú, illetve működéséhez tartozó az elem, szerkezeti egység rendeltetéséből következően „és”-jellegű, ezek:

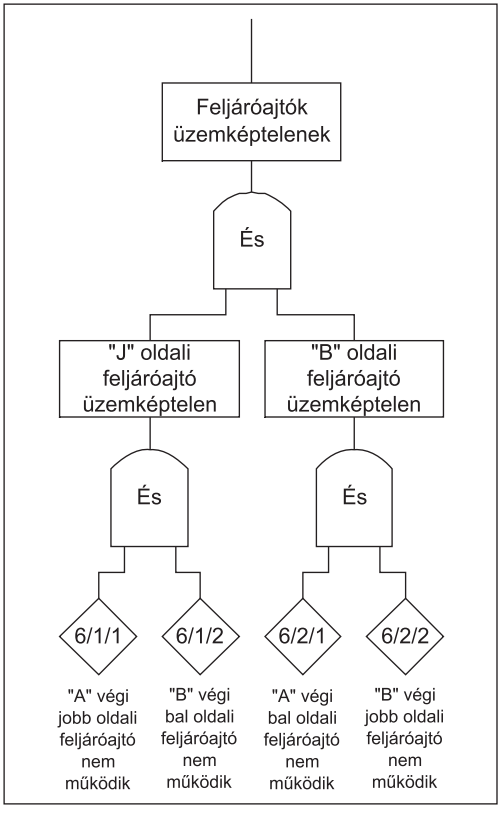
- feljáró ajtók (6)[4]
- WC (7)[5]
- utastéri világítás (8)[6]
- beépített zárjelzők (10)[7]

Az „és”-kapcsolatban lévő elemek vizsgálata

Az előbb felsorolt „és” -kapcsolatban lévő elemek meghibásodási valószínűségei a következő összefüggésekkel határozhatók meg a vázlatos modell kapcsolati rendszere alapján:

Feljáró ajtók (6)

Meghibásodási események: A_{611}, A_{612}, A_{621}, A_{622}



7. ábra. Feljáró ajtók hibafája

Meghibásodási feltételek:

$$A_{61} = A_{611} \cap A_{612}$$
$$A_{62} = A_{621} \cap A_{622}$$
$$A_{6} = A_{6} \cup A_{62}$$

A meghibásodások bekövetkezésének valószínűségei, a működőképességet akadályozó feltételek teljesülési valószínűsége:

$$
\begin{aligned}
P(A_{61}) &= P(A_{611})P(A_{612}) \\
P(A_{62}) &= P(A_{621})P(A_{622}) \\
P(A_6) &= P(A_{61})+P(A_{62})-P(A_{61})P(A_{62})=P(A_{611})P(A_{612})+P(A_{621})P(A_{622})- \\
&\quad -P(A_{611})P(A_{612})P(A_{621})P(A_{622})
\end{aligned}
$$

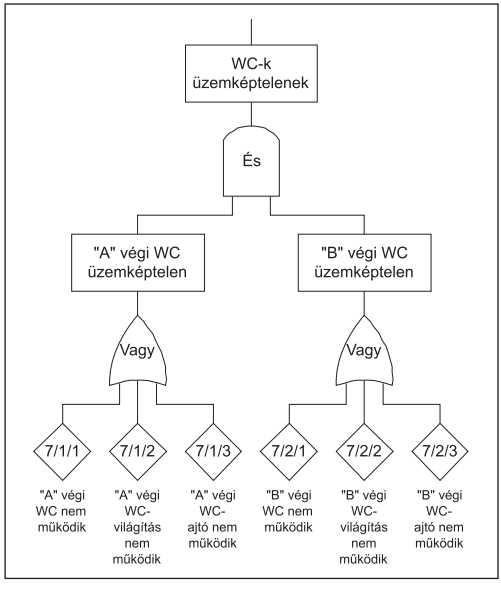
A feljáró ajtóknak mint a kocsi egy valós alrendszerének a megbízhatósága (r_6):

$$
\begin{aligned}
r_{61} &= r_{611}+r_{612}-r_{611}r_{612} \\
r_{62} &= r_{621}+r_{622}-r_{621}r_{622} \\
r_6 &= r_{61}r_{62}=(r_{611}+r_{612}-r_{611}r_{612})(r_{621}+r_{622}-r_{621}r_{622})= \\
&= r_{611}r_{621}+r_{612}r_{621}-r_{611}r_{612}r_{621}+r_{611}r_{622}+r_{612}r_{622}-r_{611}r_{612}r_{622}- \\
&\quad -r_{611}r_{621}r_{622}-r_{612}r_{621}r_{622}+r_{611}r_{612}r_{621}r_{622}
\end{aligned}
$$

WC-k (7)

Meghibásodási események: A_{711}, A_{712}, A_{713}, A_{721}, A_{722}, A_{723}
Meghibásodási feltételek:

$$
\begin{aligned}
A_{71} &= A_{711} \cup A_{712} \cup A_{713} \\
A_{72} &= A_{721} \cup A_{722} \cup A_{723} \\
A_7 &= A_{71} \cap A_{72}
\end{aligned}
$$



8. ábra. Zárt WC-k meghatározó egységeinek hibafája

A meghibásodások bekövetkezésének valószínűségei, a működőképesség feltételeinek teljesülési valószínűsége:

$$P(A_{71}) = P(A_{711})+P(A_{712})+P(A_{713})-P(A_{711})P(A_{712})-P(A_{711})P(A_{713})- -P(A_{712})P(A_{713})+P(A_{711})P(A_{712})P(A_{713})$$

$$P(A_{72}) = P(A_{721})+P(A_{722})+P(A_{723})-P(A_{721})P(A_{722})-P(A_{721})P(A_{723})- -P(A_{722})P(A_{723})+P(A_{721})P(A_{722})P(A_{723})$$

$$P(A_7) = P(A_{71})P(A_{72})=[P(A_{711})+P(A_{712})+P(A_{713})-P(A_{711})P(A_{712})- -P(A_{711})P(A_{713})-P(A_{712})P(A_{713})+P(A_{711})P(A_{712})P(A_{713})] [P(A_{721})+P(A_{722})+P(A_{723})-P(A_{721})P(A_{722})-P(A_{721})P(A_{722})- -P(A_{722})P(A_{723})+P(A_{721})P(A_{722})P(A_{723})]$$

A WC-knek mint a kocsi egy valós alrendszerének a megbízhatósága (r_7):

$$r_{71} = r_{711}r_{712}r_{713}$$

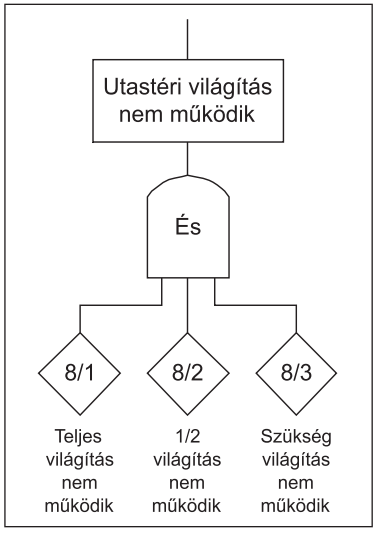
$$r_{72} = r_{721}r_{722}r_{723}$$

$$r_7 = r_{71}+r_{72}-r_{71}r_{72}=r_{711}r_{712}r_{713}+r_{721}r_{722}r_{723}-r_{711}r_{712}r_{713}r_{721}r_{722}r_{723}$$

Utastéri világítás (8)

Meghibásodási események: A_{81}, A_{82}, A_{83}
Meghibásodási feltétel: $A_{81} \cap A_{82} \cap A_{83}$
A meghibásodás bekövetkezésének valószínűsége, a működőképesség feltételének teljesülési valószínűsége:

$$P(A_8) = P(A_{81})P(A_{82})P(A_{83})$$



9. ábra. Utastéri világítás hibafája

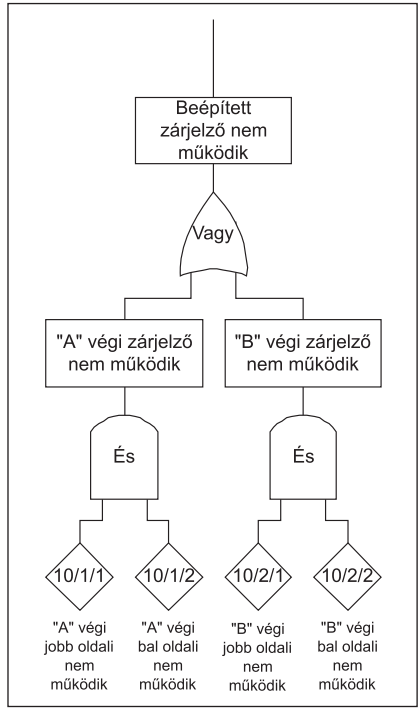
Az utastéri világításnak mint a kocsi egy valós alrendszerének a megbízhatósága (r_8):

$$r_8=r_{81}+r_{82}+r_{83}-r_{81}r_{82}-r_{81}r_{82}-r_{81}r_{83}-r_{82}r_{83}+r_{81}r_{82}r_{83}$$

Beépített zárjelzők (10)

Meghibásodási események: A_{1011}, A_{1012}, A_{1021}, A_{1022}
Meghibásodási feltételek:

$$A_{101} = A_{1011} \cap A_{1012}$$
$$A_{102} = A_{1021} \cap A_{1022}$$
$$A_{10} = A_{101} \cup A_{102}$$



10. ábra. Zárjelzők hibafája

A meghibásodások bekövetkezésének valószínűségei, a működőképesség feltételeinek teljesülési valószínűségei:

$$P(A_{101}) = P(A_{1011})P(A_{1012})$$
$$P(A_{102}) = P(A_{1021})P(A_{1022})$$
$$P(A_{10}) = P(A_{101})+P(A_{102})-P(A_{101})P(A_{102})=P(A_{1011})P(A_{1012})+$$
$$+P(A_{1021})P(A_{1022})-P(A_{1011})P(A_{1012})P(A_{1021})P(A_{1022})$$

A kocsivégeken beépített zárjelzőknek mint a kocsi egy valós alrendszerének a megbízhatósága (r_{10}):

$$
\begin{aligned}
r_{101} &= r_{1011}+r_{1012}-r_{1011}r_{1012}\\
r_{102} &= r_{1021}+r_{1022}-r_{1021}r_{1022}\\
r_{10} &= r_{101}r_{102}=(r_{1011}+r_{1012}-r_{1011}r_{1012})(r_{1021}+r_{1022}-r_{1021}r_{1022})=r_{1011}r_{1021}+\\
&\quad +r_{1012}r_{1021}-r_{1011}r_{1012}r_{1021}+r_{1011}r_{1022}+r_{1012}r_{1022}-r_{1011}r_{1012}r_{1022}-\\
&\quad -r_{1011}r_{1021}r_{1022}-r_{1012}r_{1021}r_{1022}+r_{1011}r_{1012}r_{1021}r_{1022}
\end{aligned}
$$

A teljes kocsira vonatkozó megbízhatóság az „és”-kapukkal bíró szerkezeti egységek megbízhatóságát is számításba véve:

$$
\begin{aligned}
R=\prod_{i=1}^{16} r_i \;&= r_1r_2r_3r_4r_5(r_{611}r_{621}+r_{612}r_{621}-r_{611}r_{612}r_{621}+_{611}r_{622}+_{612}r_{622}-\\
&\quad -r_{611}r_{612}r_{622}-r_{611}r_{621}r_{622}-r_{612}r_{621}r_{622}+r_{611}r_{612}r_{621}r_{622})(r_{711}r_{712}r_{713+}\\
&\quad +r_{721}r_{722}r_{723}-r_{711}r_{712}r_{713}r_{721}r_{722}r_{723})\\
&\quad (r_{81}+r_{82}+r_{83}-r_{81}r_{82}-r_{81}r_{83}-r_{82}r_{83}+r_{81}r_{82}r_{83})r_9(r_{1011}r_{1021}+r_{1012}r_{1021}-\\
&\quad -r_{1011}r_{1012}r_{1021}+r_{1011}r_{1012}+r_{1012}r_{1012}-r_{1011}r_{1012}r_{1022}-r_{1011}r_{1021}r_{1022}-\\
&\quad r_{1012}r_{1021}r_{1022}+r_{1011}r_{1012}r_{1021}r_{1022})r_{11}r_{12}r_{13}r_{14}r_{15}r_{16}
\end{aligned}
$$

A 3.3. és 3.4. pontokban a teljes vasúti személykocsira, mint műszaki rendszer megbízhatóságának a meghatározására kapott összefüggések *azonosak*. Az azonosság szerint az elemek blokkdiagrambeli párhuzamos kapcsolata a hibafa eljárás „és” – kapcsolatának felel meg. A soros elemek a blokkdiagramban megfelelnek a hibafa „vagy” – kapcsolatának. A megbízhatóság értékeinek számítása során mindkét módszernél feltételeztük, hogy a rendszerelemek meghibásodásai egymástól teljesen független eseményeknek tekinthetők.

5. Érzékenységi vizsgálat eredménye és a karbantartási tevékenység minősítése

A felsoroltak mint részeredők, alrendszerek megbízhatósága ismeretében a teljes rendszerre, azaz az egyszerűsített modellre vonatkozó megbízhatóság a 16 szerkezeti egység megbízhatóságai szorzatával meghatározható. A teljes rendszerre, azaz a modellben szereplő személykocsira vonatkozó megbízhatóság ismeretében az érzékenység az

$$\varepsilon_i = \frac{\partial R}{\partial r_i}\cdot\frac{r_i}{R}$$

összefüggéssel számítható.

A MATLAB 207B verziója segítségével végrehajtott számítások, futtatások eredményei a következők:

1.) Ha valamennyi szerkezeti egység megbízhatósága egységesen r_i = 99%, akkor a teljes jármű megbízhatósága *R = 88,5%.*
2.) Ha r_i = *99,9%*, akkor *R = 98,81%.*
3.) Ha r_i = 99,99%, akkor *R = 99,88%.*
4.) Ha az utastéri teljes világítás és három feljáró ajtó, valamint az előtéri világítás megbízhatósága egyaránt 95%-ra csökken le ($r_{713} = r_{711} = r_{722} = r_{81}$ = 95%) és a többi szerkezeti egységé r_i = 99,9% értékű, akkor a kocsi megbízhatósága *R=96%*-ra csökken le.
5.) Ha az utastér belső berendezései kivételével a kocsi valamennyi szerkezeti egységének a megbízhatósága r_i = 99,9% és a kivételé pedig csak r_{16} = 90%, akkor a teljes kocsié már *R = 84,65%* lesz, ha pedig az r_i az első pillanatra reálisabbnak tűnő mindössze *99%*, akkor a kocsié a már megengedhetetlennek minősíthető *R = 77,23%.*

Az eredmények alapján rögzíthető:

– Ha egy vasúti járműtípus beszerzésénél, korszerűsítésénél vagy a hétköznapi üzemelés során azt a követelményt támasztjuk, hogy akár a megbízhatóság, akár az üzemkészség vagy a rendelkezésre állás egy járműállagra legyen pl. 96%, akkor bemutatott igen leegyszerűsített modell szerint is az egyes szerkezeti egységek – a döntően soros kapcsolatok miatt az összetevő ekvivalens soros részrendszerek meghibásodási valószínűségeinek közel zérusnak kell lennie, a megbízhatóságuknak pedig értelemszerűen közel 100%-osaknak kell lenni. (Az egyes szerkezeti egységek is egy-egy bonyolult műszaki rendszert jelentenek, pl. a feljáró ajtók a maguk mechanikus és pneumatikus berendezéseivel.)
– Ahhoz, hogy ez a példaként vett és a gyakorlatban nem túlzó 95%-os megbízhatóság, üzemkészség, rendelkezésre állás tartható legyen *nagyon komoly elvárásokat* kell megfogalmazni a karbantartási politikával az alkalmazott karbantartási módszerrel, technológiával, annak feltételrendszereivel szemben. Az érzékenységi vizsgálat rávilágított, hogy csekély mértékű szerkezeti egység megbízhatóság csökkenés jelentősen befolyásolja a teljes rendszer működési megbízhatóságát.

A műszaki rendszerek tervezésénél, azok megvásárlásánál, azt követően pedig az üzemeltetésüknél meghatározó jelentőségű a rendszerek megbízhatósága. A megbízhatóság számszerűsíthető. A megbízhatóság értékének kiszámítására, a rendszer vizsgálatára számos módszert dolgoztak ki, többet közülük szabványosítottak. A két legelterjedtebben alkalmazott szabványos módszer a blokkdiagram módszer és a hibafa-eljárás. Bár a két módszer ellentétes irányból közelíti meg a megbízhatóság kérdését, azonban a megbízhatóságra nézve mindkét módszer szükségképp azonos

eredményt szolgáltat. A megbízhatóság meghatározására szolgáló összefüggés ismeretében elvégezhető a rendszer megbízhatóságának érzékenység vizsgálata. E vizsgálat eredménye megmutatja, hogy ha a rendszer valamely elemének (pontjának), alrendszerének a megbízhatósága megváltozik, akkor ez a megváltozás miképp módosítja a teljes rendszer eredő megbízhatóságát. Az érzékenység vizsgálat adta információk nélkülözhetetlenek a jól átgondolt, hosszútávra kellő eredményt biztosítani képes karbantartási rendszer kialakításához, működtetéséhez. A cikkben ismertetett rendszer, a vasúti személykocsi megbízhatóságára vonatkozó 95%-os megbízhatóság ill. az ilyen értékű rendelkezésre állás nem jelent különösen magas követelményt az általános műszaki karbantartási gyakorlatban. Hangsúlyozni kell azonban a vasúti járművek szerkezeti felépítési sajátosságaiból adódó azon tényt, hogy a járművek meghibásodási blokkdiagramjában jelen lévő igen nagy számú soros kapcsolatú blokk miatt a megfelelő üzemkészség fenntartása kiemelten hatásos, karbantartási rendszert, kiemelten szigorú intézkedéseket és végrehajtási fegyelmet igényel.

Felhasznált irodalom

1.) *Dr. Csiba József – Dr. Zobory István*: A megbízhatósági blokkdiagram (RBD) – módszer alkalmazása a vasúti járműállag megbízhatóságának vizsgálatára. Vasútgépészet. 2006. 4. sz. 41– 42. o.

2.) *Zobory, I. – Győri, J. – Kolonits, F. – Békefi, E.:* On Reliability Analysis of Bogies and Running Gears. Proceedings of BOGIE'07 (Ed. by Prof. I. Zobory). BME, Dept. of Railway Vehicles, 2008. p.367–383.

3.) *Dr. Denkinger Géza:* Valószínűségszámítás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.