MŰSZAKI TUDOMÁNY AZ ÉSZAK-KELET MAGYARORSZÁGI RÉGIÓBAN 2011

KONFERENCIA ELŐADÁSAI

Miskolc Egyetemváros, 2011. május 18.

Szerkesztette:
Edited by
Pokorádi László

Kiadja: **Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága**

ISBN 978-963-7064-25-8

Debrecen 2011

HIBAFA MÁTRIXALGEBRAI ÉRZÉKENYSÉG ELEMZÉSE

MATRIX-ALGEBRAIC FAULT TREE SENSITIVITY ANALYSIS

POKORÁDI László

Egyetemi tanár
Debreceni Egyetem Műszaki Kar
4028 Debrecen, Ótemető u. 2-4.
pokoradi@eng.unideb.hu

Kivonat: *A cikk egy új, könnyen algoritmizálható, moduláris megközelítésű, hibafa érzékenység elemzési módszert mutat be, mely repülőgép rendszerek és gázturbinás hajtóművek matematikai modellezési eljárásain alapszik. A tanulmány fő célja a lineáris matematikai diagnosztikai modellezési módszerek alkalmazásával a Lineáris Hibafa Érzékenységi Modell (LFTSM) módszertanának kidolgozás és egy példán keresztül az alkalmazási lehetőség szemléltetése*

Kulcsszavak: *hibafa elemzés, érzékenység vizsgálat, LFTSM*

Abstract: *The paper shows a new, easy-useable, modular approach fault tree sensitivity investigation method uses matrix-algebraic method based upon the mathematical modeling of aircraft systems and gas turbine engines. The main aim of this study is to shows the adaptation of linear mathematical diagnostic modeling methodology for setting-up of LFTSM and its possibility of use to investigate Fault Tree sensitivity by a demonstrative example.*

Keywords: *Fault Tree, Sensitivity analysis, LFTSM*

1. BEVEZETÉS

A hibafa-elemzés érzékenyvizsgálatának célja annak meghatározása, hogy az adott hibafa elemi események bekövetkezési valószínűségeinek változásaira milyen mértékben reagálnak — mennyire érzékenyek — a hozzá kapcsolódó közbülső események és a főesemény bekövetkezési valószínűségei.

A hibafa-elemzés során egy valós vagy feltételezett rendszerhibából, az úgynevezett főeseményből (Top Event) indulunk ki, és fokozatosan derítjük fel azokat az alkotóelem és részrendszer meghibásodási lehetőségeket, melyek az adott, nem kívánt esemény bekövetkezéséhez vezetnek vagy vezethetnek. Az elemző munkát fastruktúrájú gráf megjelenítés segíti, amit különböző, például megbízhatósági számításokkal is ki lehet egészíteni. Módszertanát a [5] és [6] szabványokból tudjuk megismerni. A részletesebb megértéshez szükséges gráfelméleti ismeretek Andrásfalvi [1] könyvében és Fazekas [3] egyetemi jegyzetében olvashatóak. Számítógéppel segített hibafa-elemzés módszertanát ismerteti Ferdous, szerzőtársaival a [4] irodalomban.

Az érzékenységi elemzések korábban alkalmazott módszere esetén a kiértékelést úgy végezzük el, hogy a hibafa egyik elemi eseményéhez nagy, majd kis értékű meghibásodási rátát rendelünk. Amennyiben a kiszámított rendszer-megbízhatósági paraméter, azaz a főesemény bekövetkezési valószínűsége, nem változott számottevően, akkor ez az elemi esemény nem bír nagy kockázati jelentőséggel. Viszont, ha a rendszer-megbízhatósági paraméter változása jelentős mértékűre adódott, akkor pontosabb adatokat kell szerezni vagy az eseményt további alap okokra kell bontani.

Csiba elemzései során a csúcseseménye bekövetkezési valószínűséget leíró függvény elemi események bekövetkezési valószínűségei szerinti parciális differenciál hányadosait képezte az érzékenységi együtthatók meghatározásához [2]. Ezen eljárás hátránya az, hogy egy nagyméretű, összetett hibafa esetén viszonylag nagy a hibázás lehetősége. Pokorádi [7] könyvében vizsgálta a technikai rendszerek lineáris érzékenységi modelljeinek felállítási és alkalmazhatósági lehetőségeit. A Szerző a repülőgép gépészeti rendszereinek lineáris diagnosztikai eljárásait alkalmazta a hibafa-elemzés relatív érzékenységvizsgálatára [9], valamint a Lineáris Hibafa Érzékenységi Modell (LFTSM — Linear Fault Tree Sensitivity Model) módszerét dolgozta ki [8].

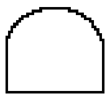
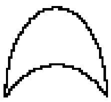
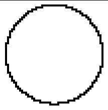
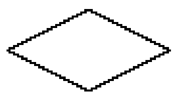
Jelen tanulmány a hibafa-elemzés érzékenységvizsgálatának, a fenti eljárástól eltérő, moduláris megközelítésű, mátrixalgebrai módszerét mutatja be a szerző által kidolgozott LFTSM alkalmazásával.

A tanulmány az alábbi részekből áll: A 2. fejezet a Hibafa-elemzést mutatja be röviden. A 3. fejezet az érzékenységvizsgálat teljes derivált módszerét írja le. A 4. fejezet egy egyszerű mintapéldán keresztül szemlélteti az előzőleg ismertetett módszer alkalmazását. Végül az 5. fejezet összegzi a tanulmány elkészítésekor szerzett tapasztalatokat és megfogalmazza a Szerző jövőbeli célkitűzéseit.

2. A HIBAFA-ELEMZÉS

A hibafa-elemzés során egy feltételezett rendszerhibából, az úgynevezett főeseményből (Top Event) indulunk ki, és fokozatosan derítjük fel azokat az alkotóelem és részrendszer meghibásodási lehetőségeket, melyek az adott, nem kívánt esemény bekövetkezéséhez vezetnek vagy vezethetnek. Az elemző munkát fastruktúrájú gráf megjelenítés segíti, amit különböző, például megbízhatósági számításokkal is ki lehet egészíteni. A gráf olyan alakzat, amely pontokból és bizonyos pontpárokat összekötő (nem feltétlenül egyenes) vonaldarabokból áll. Matematikai megfogalmazásban a *G(V;E;f)* gráfon olyan alakzatot értünk, amely a *V* pontokból és bizonyos pontokat összekötő *E* vonaldarabokból áll. A *V* halmaz elemeit pontoknak (esetleg gráf szögpontjainak vagy csúcsainak), az *E* halmaz elemeit pedig a gráf éleinek nevezzük. A fenti jelölésben szereplő *f* függvény az *E* halmazt képezi le a *VxV*-re, azaz bármely *e* élhez hozzárendel egy pontpárt a *V* halmaz elemei közül. Ezért *f*-t szokás illeszkedési leképezésnek is nevezni [1]. Az olyan összefüggő irányítatlan gráf neve, mely nem tartalmaz köröket, a fa. Az *n* csúcspontot tartalmazó fának pontosan *n-1* éle van. Egy fa gráfban bármely két pontot pontosan egy út köt össze [3].

Az 1. Táblázat a hibafa alap jelölésrendszerét szemlélteti.

	***ÉS kapu*** A kimeneti esemény csak akkor következik be, hogyha az összes bemeneti esemény bekövetkezik
	***VAGY kapu*** A kimeneti esemény akkor következik be, hogyha legalább egy bemeneti esemény bekövetkezik.
	***Elemi esemény*** Nem igényel további feltárást, mert a megfelelő megoldhatósági korlát elérésre került
	***Közbülső esemény*** Olyan nem elemi esemény, mely akkor következik be, ha egy vagy több olyan megelőző ok merült fel, amelyek logikai kapukon keresztül fejtik ki hatásukat az adott eseményre.
	***Feltáratlan esemény*** Olyan esemény, amely tovább nem tárható fel, mert az nem megfelelő következménnyel jár vagy, vagy mert nem áll rendelkezésre információ.

1. Táblázat A hibafa-elemzés főbb jelölései

Egy (nem elemi) esemény bekövetkezési valószínűsége meghatározható az azt kiváltó események — melyek lehetnek elemi vagy alacsonyabb szintű közbülső események — bekövetkezési valószínűségeinek, illetve a kapcsolatot leíró logikai kapu ismeretében, azaz:

ÉS kapu esetén:

$$P = \prod_{i=1}^{k} P_i \quad , \tag{1}$$

VAGY kapu esetén:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{k} \left(1 - P_i\right) \quad . \tag{2}$$

ahol:

P_i $P_i \in [0,1] \subset \Re \; \forall i \in \{1,2,...,k\}$ — az *i*-edik kiváltó esemény bekövetkezési valószínűsége;

k $k \in \aleph$ — a kiváltó események száma.

3. ÉRZÉKENYSÉGI MODELL FELÁLLÍTÁSA

A hibafa-elemzés érzékenyvizsgálatának célja annak meghatározása, hogy az elemi események bekövetkezési valószínűségeinek változásaira milyen mértékben reagál — mennyire érzékeny — a közbülső események és a főesemény bekövetkezési valószínűsége [9].

Az érzékenységi elemzések egyik lehetséges, korábban alkalmazott módja az, amikor a kiértékelést úgy végezzük el, hogy a hibafa egyik elemi eseményéhez nagy, majd kis értékű meghibásodási rátát rendelünk. Amennyiben a kiszámított rendszer-megbízhatósági paraméter, azaz a főesemény bekövetkezési valószínűsége, nem változott számottevően, akkor ez az elemi esemény nem bír nagy jelentőséggel. Viszont, ha a rendszer-megbízhatósági paraméter változása jelentős mértékűre adódott, akkor pontosabb adatokat kell szerezni vagy az eseményt további alap okokra kell bontani.

Jelen tanulmány a hibafa-elemzés érzékenységvizsgálatának, a fenti eljárástól eltérő, egy mátrixalgebrai módszerét mutatja be.

Az érzékenységi modell felállítása során mindegyik logikai kapuhoz kapcsolódó valószínűségi leírás — lásd (1) és (2) egyenletek — alapján meghatározzuk a belőle levezethető érzékenységi függvényeket és együtthatókat.

Az érzékenységi együtthatók meghatározása során az eredeti

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_k) \quad f: \Re^k \to \Re \tag{3}$$

egyenlet mindkét oldalának

$$dy = \frac{\partial f(x_1; x_2; \ldots x_k)}{\partial x_1} dx_1 + \ldots + \frac{\partial f(x_1; x_2; \ldots x_k)}{\partial x_n} dx_k \tag{4}$$

teljes deriváltját képezzük, majd a jobb oldal mindegyik tagját bővítjük $\frac{x_i}{x_i}$-vel, és mindkét oldalt osszuk a (4) egyenlet megfelelő oldalával azaz:

$$\frac{dy}{y} = \frac{\partial f(x_1; x_2; \ldots x_k)}{\partial x_1} \frac{x_1}{f(x_1; x_2; \ldots x_k) x_1} dx_1 + \ldots + \frac{\partial f(x_1; x_2; \ldots x_k)}{\partial x_k} \frac{x_k}{f(x_1; x_2; \ldots x_k) x_k} dx_k \tag{5}$$

A

$$K_{y;x_i} = \frac{\partial f(x_1; x_2; \ldots x_k)}{\partial x_i} \frac{x_i}{f(x_1; x_2; \ldots x_k)} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \tag{6}$$

együttható bevezetésével, és a

$$\frac{d\eta}{\eta} \approx \frac{\Delta\eta}{\eta} = \delta\eta \tag{7}$$

egyenlőség felhasználásával az alábbi lineáris egyenletet kapjuk:

$$\delta y = K_{y;x_1}\delta x_{y;x_2} + \ldots + K_{y;x_k}\delta x_k \quad , \tag{8}$$

amely a vizsgált rendszer paramétereinek relatív változásai közti kapcsolatot — azaz a kimenő jellemző relatív érzékenységét — írja le [7].

A fenti összefüggés alapján meg tudjuk határozni, hogy a vizsgált logikai kapu kimenő jellemzője (pontosabban annak bekövetkezési valószínűsége) milyen relatív érzékenységgel bír a „bemenő" események bekövetkezési valószínűségeinek változásával szemben. Például, a kiváltó események bekövetkezési valószínűségeinek becslése során fellépő pontatlanság hogyan befolyásolja az okozat bekövetkezési valószínűségének pontosságát, értékének megbízhatóságát.

A hibafa elemzéseknél alkalmazott logikai kapuk érzékenységi együtthatóit az alábbiak szerint határozhatjuk meg:
ÉS kapu esetén:

$$K_i = 1 \qquad \forall i \in \{1,2,...,k\} \quad . \tag{9}$$

VAGY kapu esetén:

$$K_j = \frac{P_j}{P}\prod_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{k}(1-P_i) \quad . \tag{10}$$

Következő lépésként különválasztjuk a vizsgált hibafa eseményeit az elemi és nem-elemi (közbülső és fő-) eseményekre, mivel az utóbbiak mindegyike valamelyik logikai kapu kimenő (függő) változója. Az elemi és nem-elemi események bekövetkezési valószínűségeit az $\mathbf{x} \in \Re^{m\times 1}$, illetve $\mathbf{y} \in \Re^{n\times 1}$ vektorokba rendezzük. Ekkor a bekövetkezési valószínűségek relatív változásai közti kapcsolat az

$$\mathbf{A}\delta\mathbf{y} = \mathbf{B}\delta\mathbf{x} \tag{11}$$

mátrixegyenlettel tudjuk leírni, ahol:

$\mathbf{A} \in \Re^{n\times n}$ — nem elemi események együttható mátrixa;
$\mathbf{B} \in \Re^{n\times m}$ — elemi események együttható mátrixa;
$n \in \aleph$ — nem elemi események száma
$m \in \aleph$ — elemi események száma.

Felhasználva a

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad \in \Re^{n\times m} \tag{12}$$

mátrixalgebrai összefüggést, a hibafa-elemzés $\mathbf{D}$ relatív érzékenységi mátrixát kapjuk meg, és a (11) egyenlet a

$$\delta\mathbf{y} = \mathbf{D}\delta\mathbf{x} \tag{13}$$

alakura módosul.

A relatív érzékenységi mátrix *i*-edik sorának *j*-edik eleme azt mutatja meg, hogy az *i*-edik nem elemi esemény bekövetkezési valószínűségének relatív változását milyen mértékben befolyásolja a *j*-edik elemi esemény bekövetkezési valószínűségének relatív változása.

A (7) egyenlet alapján az elemi események relatív változásának vektora az alábbi módon határozható meg:

$$\delta\mathbf{x} = \mathbf{X}_{nom}^{-1}\Delta\mathbf{x} \quad , \tag{14}$$

ahol:

$\mathbf{X}_{nom} \in \Re^{n\times n}$ — az elemi események bekövetkezés valószínűségeinek névleges érték mátrixa:

$$\mathbf{X}_{nom} = \begin{bmatrix} P_{1nom} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_{2nom} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P_{nnom} \end{bmatrix} . \tag{15}$$

$\Delta\mathbf{x} \in \Re^{m\times 1}$ — az elemi események bekövetkezés valószínűségei mért eltéréseinek vektora.

Az elemi események bekövetkezési valószínűségei relatív eltérés vektorának ismeretében, felhasználva a hibafa relatív érzékenység mátrixát, azaz a (13) egyenletet, kapjuk meg a nem-elemi események valószínűségeinek

$$\delta\mathbf{y} = \mathbf{D}\delta\mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{X}_{nom}^{-1}\Delta\mathbf{x} \quad . \tag{16}$$

relatív eltérés vektorát. A nem-elemi események valószínűségei névleges érték mátrixának alkalmazásával, a nem elemi események valószínűségeinek

$$\Delta\mathbf{y} = \mathbf{Y}_{nom}\delta\mathbf{y} = \mathbf{Y}_{nom}\mathbf{D}\mathbf{X}_{nom}^{-1}\Delta\mathbf{x} \tag{17}$$

úgynevezett mért eltéréseit kapjuk meg. Bevezetve hibafa

$$\mathbf{S} = \mathbf{Y}_{nom}\mathbf{D}\mathbf{X}_{nom}^{-1} \quad \in \Re^{n\times m} \tag{18}$$

„mért” érzékenység mátrixát, a (17) egyenlet a

$$\Delta\mathbf{y} = \mathbf{S}\Delta\mathbf{x} \tag{19}$$

alakra egyszerűsíthető.

A hibafa-elemzés érzékenység vizsgálata során alapvetően csak a teljes rendszer megbízhatósági paraméterének, azaz a főesemény bekövetkezési valószínűségének értékét, illetve annak érzékenységét vizsgáljuk. Ezért továbbiakban a fenti $\mathbf{S}$ érzékenységi mátrix első sorát, mint $\mathbf{s}$, a rendszer érzékenységi vektorát alkalmazzuk. Így a főesemény bekövetkezési valószínűségének változása a

$$\Delta P_{TE} = \mathbf{s}^T\Delta\mathbf{x} \tag{20}$$

vektoregyenlettel írható le.

Mivel az elemi események bekövetkezési valószínűségeinek eltérései a

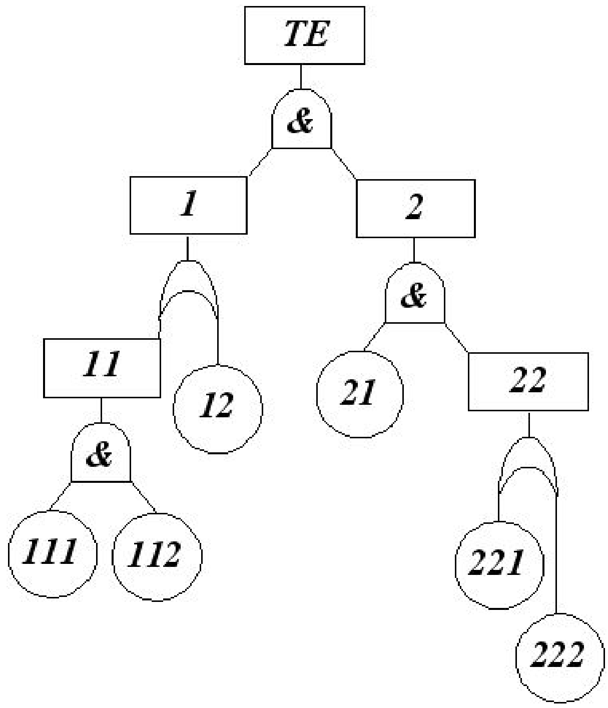
$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{nom} \tag{21}$$

módon határozható meg, a (20) egyenletet az alábbi formára is tudjuk módosítani:

$$P_{TE} = P_{TEnom} + \mathbf{s}^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{nom}) \quad . \tag{22}$$

4. ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT (MINTAPÉLDA)

Az 1. ábra az elemzéseink során alkalmazott hibafát szemlélteti.



1. ábra Hibafa (mintapélda)

Az ábrából leolvasható, hogy az 1; 2; 11 és 22 kódú események a közbülső események, míg a 12; 21; 111; 112; 221 és 222 számú események pedig elemi események. A vizsgált hibafa valószínűségi modellje:

$$P_{TE} = P_1 P_2 \tag{23}$$

$$P_1 = P_{11} + P_{12} - P_{11}P_{12} \tag{24}$$

$$P_2 = P_{21}P_{22} \tag{25}$$

$$P_{11} = P_{111}P_{112} \tag{26}$$

$$P_{22} = P_{221} + P_{222} - P_{221}P_{222} \tag{27}$$

További vizsgálatunkhoz először az elemi események — névleges (átlagos, jellemző) bekövetkezési valószínűségeit kell meghatároznunk, melyeket a 2. Táblázat tartalmazza. Ezek alapján, a (18) – (14) egyenletek felhasználásával (visszafelé haladva) meghatározhatók a közbülső események, valamint a főesemény névleges bekövetkezési valószínűsége (3. Táblázat).

$P_{12} = 0{,}10$	$P_{21} = 0{,}20$	$P_{111} = 0{,}15$
$P_{112} = 0{,}25$	$P_{221} = 0{,}3$	$P_{222} = 0{,}10$

2. Táblázat Kiinduló adatok

$P_{22} = 0{,}370$	$P_{11} = 0{,}03750$
$P_{2} = 0{,}074$	$P_{1} = 0{,}11375$
$P_{TE} = 0{,}0098975$	

3. Táblázat Számított (névleges) valószínűségi értékek

Az 1. ábrán szemléltetett hiba-fa, a (14) – (18) egyenletekkel leírt, valószínűségi elemzésének érzékenységi függvényei és együtthatói a következők:

$$\begin{aligned} &\delta P_{TE} = K_1 \delta P_1 + K_2 \delta P_2 \\ &K_1 = 1; \quad K_2 = 1 \end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned} &\delta P_1 = K_{11} \delta P_{11} + K_{12} \delta P_{12} \\ &K_{11} = (1 - P_{12}) \frac{P_{11}}{P_1} = 0{,}1525; \quad K_{12} = (1 - P_{11}) \frac{P_{12}}{P_1} = 0{,}8305 \end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned} &\delta P_2 = K_{21} \delta P_{21} + K_{22} \delta P_{22} \\ &K_{21} = 1; \quad K_{22} = 1 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned} &\delta P_{11} = K_{111} \delta P_{111} + K_{112} \delta P_{112} \\ &K_{111} = 1; \quad K_{112} = 1 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} &\delta P_{22} = K_{221} \delta P_{221} + K_{222} \delta P_{222} \\ &K_{221} = (1 - P_{222}) \frac{P_{221}}{P_{22}} = 0{,}4118; \quad K_{222} = (1 - P_{221}) \frac{P_{222}}{P_{22}} = 0{,}4118 \end{aligned} \tag{32}$$

Következő lépésként külön kell választanunk vizsgált hibafa eseményeit a — 12; 21; 111; 112; 221 és 222 — elemi és nem-elemi — TE; 1; 2; 11 és 22 — (fő- és közbülső) eseményekre, és ezek bekövetkezési valószínűségeit a

$$\mathbf{x}^T = [P_{12}; P_{21}; P_{111}; P_{112}; P_{221}; P_{222}] \quad , \tag{33}$$

$$\mathbf{y}^T = [P_{TE}; P_1; P_2; P_{11}; P_{22}] \tag{34}$$

vektorokba rendezzük.

A fenti vektorok ismeretében, valamint a (28) – (32) egyenletek alapján meghatározzuk a bekövetkezési valószínűségek relatív változásainak együttható mátrixait:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -K_1 & -K_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -K_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -K_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -0{,}2523 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ; \tag{35}$$

$$\mathbf{B}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0\\K_{12}&0&0&0&0&0\\0&K_{21}&0&0&0&0\\0&0&K_{111}&K_{112}&0&0\\0&0&0&0&K_{221}&K_{222}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0\\0{,}7196&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0\\0&0&1&1&0&0\\0&0&0&0&0{,}7297&0{,}1892\end{bmatrix} \qquad (36)$$

Az elemi és nem-elemi események névleges érték mátrixai a 2. és 3. Táblázatok alapján:

$$\mathbf{X}_{nom}=\begin{bmatrix}0{,}01&0&0&0&0&0\\0&0{,}02&0&0&0&0\\0&0&0{,}05&0&0&0\\0&0&0&0{,}06&0&0\\0&0&0&0&0{,}04&0\\0&0&0&0&0&0{,}03\end{bmatrix}; \qquad (37)$$

$$\mathbf{Y}_{nom}=\begin{bmatrix}1{,}178\cdot10^{-5}&0&0&0&0\\0&1{,}297\cdot10^{-2}&0&0&0\\0&0&1{,}376\cdot10^{-3}&0&0\\0&0&0&6{,}88\cdot10^{-2}&0\\0&0&0&0&3\cdot10^{-3}\end{bmatrix}. \qquad (38)$$

A relatív érzékenységi együttható mátrix:

$$\mathbf{D}=\begin{bmatrix}0{,}7196&1&0{,}2523&0{,}2523&0{,}7297&0{,}1892\\0{,}7196&0&0{,}2523&0{,}2523&0&0\\0&1&0&0&0{,}7297&0{,}1892\\0&0&1&1&0&0\\0&0&0&0&0{,}7297&0{,}1892\end{bmatrix}. \qquad (39)$$

A vizsgált hibafa érzékenységi mátrix:

$$\mathbf{S}=\begin{bmatrix}1{,}372\cdot10^{-3}&8{,}923\cdot10^{-4}&8{,}173\cdot10^{-5}&6{,}811\cdot10^{-5}&2{,}516\cdot10^{-4}&2.490\cdot10^{-4}\\0{,}997&0&5{,}940\cdot10^{-2}&4{,}950\cdot10^{-2}&0&0\\0&6{,}880\cdot10^{-2}&0&0&1{,}940\cdot10^{-2}&1{,}940\cdot10^{-2}\\0&0&5{,}999\cdot10^{-2}&0{,}500&0&0\\0&0&0&0&0{,}970&0{,}960\end{bmatrix}, \qquad (40)$$

illetve érzékenységi vektora:

$$\mathbf{s}^{T}=\begin{bmatrix}1{,}372\cdot10^{-3}&8{,}923\cdot10^{-4}&8{,}173\cdot10^{-5}&6{,}811\cdot10^{-5}&2{,}516\cdot10^{-4}&2.490\cdot10^{-4}\end{bmatrix}. \qquad (41)$$

Matematikailag megfogalmazva, az érzékenység vektor elemei megmutatják, hogy az elemi események bekövetkezési valószínűségeinek értékcsökkenése vagy növekedése a főesemény bekövetkezési valószínűségének milyen mértékű csökkenését, illetve növekedését okozzák. Másképpen fogalmazva: mely elemi esemény bekövetkezési valószínűségének változása bír a legnagyobb hatással a főesemény bekövetkezési valószínűségére.

Mérnöki szempontból ez azt mutatja meg, mely elemi eseményt létrehozó rendszerelem megbízhatóságának növelésével tudjuk a legnagyobb, illetve legkisebb mértékben javítani a teljes rendszer megbízhatóságát.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi években a Szerző kutatómunkát folytat annak feltárására, hogy a széles értelemben vett modellezési és rendszer bizonytalanság, valamint rendszerérzékenység elemzés és kezelés milyen módon oldható meg a leghatékonyabb formában. A kutatási program keretében készült ez a tanulmány, mely egy új, könnyen algoritmizálható mátrixalgebrai módszert mutat be a hibafák érzékenységi elemzéséhez. A cikk egy egyszerű mintapéldán keresztül szemlélteti és igazolja az eljárás használhatóságát. Az elemzőmunka egyértelműen bizonyította, hogy a repülőgépészeti rendszerek diagnosztikai elemzéseinél alkalmazott rendszerérzékenységi modellvizsgálati eljárások jól alkalmazhatóak a hibafa elemzések érzékenységvizsgálatához.

A Szerző további tudományos kutatómunkája során olyan tanulmányok elkészítését tűzte ki célként, amelyek leírják a modell- és rendszerbizonytalanságokat, illetve rendszer érzékenységeket, értelmezik, vizsgálják és szemléltetik azok elemzési módszereit.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] **ANDRÁSFALVI B**: Gráfelmélet, Polygon, Szeged, 1997., pp. 174.

[2] **CSIBA J.**: Sensitivity Analysis of the Reliability Computed by Using the Failure Tree Method, Proc. Of the 11th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, 2008., Budapest, 749–760.

[3] **FAZEKAS F.**: Alkalmazott matematika II., egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979., pp. 347.

[4] **FERDOUS R.**, et al. Methodology for Computer-Aided Fault Tree Analysis, Trans IChemE Part B, Process Safety and Environmental Protection, 2007, 85 (B1): 70-80.

[5] IEC (1990), Standard IEC 1025 Fault tree analysis (FTA), International Electrotechnical Commission, 39.

[6] MSZ EN 1050 1999, Gépek biztonsága. A kockázatértékelés elvei, Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, 1999., pp. 22.

[7] **POKORÁDI L.**: Rendszerek és folyamatok modellezése, Campus Kiadó, Debrecen, 2008., 242.

[8] **POKORÁDI L.**: Sensitivity Investigation of Fault Tree Analysis with Matrix-Algebraic Method, Theory and Applications of Mathematics & Computer Science (ISSN: 2067-2764), 2011 Spring (April), Volume 1, Number 1, p. 34-44.

[9] **POKORÁDI L.**: Hibafa-elemzés mátrixalgebrai érzékenységvizsgálata, Repüléstudományi Közlemények 2011. április 15. (HU ISSN 1789-770X) pp.10. http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2011_cikkek/Pokoradi_Laszlo.pdf.