Pokorádi László[1]

KOMPLEX KAPCSOLATÚ RENDSZEREK MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK MODULÁRIS ÉRZÉKENYSÉGELEMZÉSE [2]

Napjainkban a komplex kapcsolatú rendszerek vagy komplex rendszerek vizsgálata fontos szerepet játszik a műszaki és társadalomtudományok különböző területein. Az egyik legfontosabb kérdés e rendszerek megbízhatósága, illetve a megbízhatóságuk érzékenysége. A Szerző munkájának fő célja a repülőgép sárkány rendszerek és gázturbinás hajtóművel matematikai diagnosztikai módszerének adaptálása véges, komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatósági érzékenységelemzésére. A tanulmány a kidolgozott eljárást mutatja be elméletileg, valamint annak alkalmazási lehetőségét egy egyszerű komplex kapcsolatú rendszer példáján keresztül

MODLULAR SENSITIVITY ANALYSIS OF RELIABILITY OF SYSTEMS WITH COPMLEX INTERCONNECTIONS

In our age, investigations of Systems with Complex Interconnections or Complex Systems are important parts of several fields of technical and social sciences. One of the most important questions is the reliability and sensitivity of reliability of these systems. The main goal of Author's work is to adapt mathematical diagnostic methodology of airframe systems and gas turbine engines to investigate sensitivity of reliability of finite Systems with Complex Interconnections. The paper shows the proposed method theoretically and its applicability to investigate Systems with Complex Interconnections sensitivity by a simple example.

BEVEZETÉS

Napjaink tudományában egyre nagyobb szerepet kap a bonyolult, integrált rendszerek, különféle hálózatok struktúrájával és a bennük lejátszódó folyamatok több-szempontú vizsgálatával foglalkozó tudomány, a rendszertechnika alkalmazása. Rendszereket a tudomány jóformán minden területén lehet értelmezni. Az integrált rendszerekkel kapcsolatos problémák megoldásában nagymértékben segítenek a korszerű rendszerelmélet rendező elvei.

A moduláris megközelítésű érzékenységvizsgálat lényege, hogy a rendszert részegységekre bontjuk és azok érzékenységi együtthatóit külön-külön determináljuk, majd a későbbiekben részletesen leírt mátrixalgebrai eljárással adjuk meg a rendszer kimenő jellemzőjének, jellemzőinek érzékenységi együtthatóit.

A Szerző számára jelentős támpontot adott kutatómunkájához Myers könyve, mely a komplex rendszerek megbízhatóságát, és megbízhatóság-elemző módszereit írja le. Myers megfogalmazása szerint az a rendszer, mely nem csak egyszerű kölcsönös kapcsolatokkal bír tekinthetőek komplex rendszereknek [1].

Myers megfogalmazásában a komplex kapcsolatú (SwCI – **S**ystem **w**ith **C**omplex **I**nterconnections) rendszerek a többcsatornás, redundáns részeket tartalmazó hálózatok. Megállapítja, az úgynevezett

---

[1] egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu

[2] Lektorálta: Prof. Dr.Szabolcsi Róbert, egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, szabolcsi.robert@bgk.uni-obuda.hu

egyszerű kapcsolatokkal bíró rendszerek megbízhatósági elemzései során előszeretettel használt blokk-diagrammos modellezési módszerek közvetlenül nem alkalmazhatóak a komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatósági elemzése során, viszont, ismeretük elengedhetetlen [1]. Myers ezen megállapítása tette szükségessé az eredetileg „csak" adaptálni tervezett elemző eljárás módosítási lehetőségének keresését, valamint az átdolgozott érzékenységvizsgálati módszer alkalmazhatóságának megállapítását vagy elvetését.

A kutatómunka során adaptálásra tervezett lineáris diagnosztikai modellek repülőműszaki tudományokon belüli alkalmazásának eredményei Pokorádi [2], Rác [6], valamint Rohács és Simon [7] publikációiban lelhetők fel.

Jelen kutatómunka célja a repülőgép-rendszerek és gázturbinás hajtóművek lineáris diagnosztikai elemzéseinél már jól alkalmazott rendszerérzékenységi, modellvizsgálati eljárások módosításának kidolgozása úgy, hogy azok alkalmassá váljanak a komplex kapcsolatú (például híd struktúrájú) hálózatok és rendszerek megbízhatóságának, megbízhatóság-érzékeny-ségének, valamint bizonytalanságának megfelelő minőségű leírására, elemzésére. Ezen moduláris, csomóponti megközelítésű, könnyen algoritmizálható módszerek módisításával új eljárások dolgozhatók ki hálózatok és rendszerek megbízhatósági, valamint paraméter érzékenységi és bizonytalansági elemzésére.

A moduláris, csomóponti megközelítés következtében a vizsgálati módszerekhez tipizált, vagy tipizálható modellblokkokat tudunk meghatározni, melyek segítségével egy konkrét vizsgált hálózat érzékenységi, paraméterbizonytalansági modellje könnyen, jól algoritmizálható eljárással állítható fel. Ennek következtében olyan elemzési módszereket, technikákat kaphatunk, melyek nem igénylik az alkalmazó mély, megalapozott matematikai ismereteit. A moduláris érzékenység elemzési eljárás előnyei a következőkben fogalmazhatóak meg:

- jól algoritmizálható;
- a rész-érzékenységi együtthatók – az egyszerű függvények következtében – viszonylag könnyen meghatározhatóak;
- a tipikus, vagy tipizálható részegységek érzékenységi együtthatói struktúrája azonos, így csak a paramétereik behelyettesítésével egyszerűen kiszámíthatóak;
- az érzékenységi mátrix megadja a részrendszerek, elemcsoportok érzékenységi együtthatóit is, nem csak a teljes rendszer kimenő jellemzőjének, jellemzőinek.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: A második fejezet a komplex kapcsolatú rendszerek igazságtáblázat alkalmazásával történő megbízhatóság elemzési módszerét mutatja be. A harmadik fejezetben az előzőekben felállított megbízhatósági modell moduláris érzékenységvizsgálata kerül leírásra. A negyedig fejezetben a modelleredményekből levonható következtetések olvashatók. Végezetül a Szerző összegzi a tanulmány eredményeit és megfogalmazza a jövőbeni kutatási célkitűzéseit.

2. KOMPLEX KAPCSOLATÚ RENDSZEREK MEGBÍZHATÓSÁGA

A komplex kapcsolatú rendszerekben az elemek közt található összetett kapcsolatok következtében a hibafa elemzés során a közbülső események nem tekinthetőek független eseménynek – azaz a [3] és [4] irodalmakban leírt moduláris megközelítésű érzékenységelemzési eljárás –

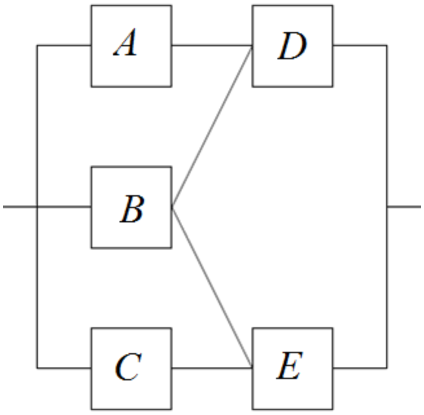
abban a formájában – nem megfelelő. Az ilyen rendszer vagy hálózat megbízhatóságának meghatározására egyik megoldásként a Boole-féle igazságtáblázatot célszerű alkalmaznunk.

Szemléltetésképpen vizsgáljuk meg a [1] irodalomban található rendszert és határozzuk meg annak R_{sys} megbízhatóságát (hibamentes működésének valószínűségét).

Az 1. ábrán látható rendszer öt elemet tartalmaz, melyeket az *A*; *B*; *C*; *D* és *E* betűkkel jelölünk, és az alábbi két paraméterrel jellemzünk:

- az $r_i \;\; i \in L$ megbízhatóságukkal, azaz a hibamentes működésük valószínűségével;
- a $p_i \;\; i \in L$ meghibásodási valószínűségükkel,

ahol: *L* az *A*; *B*; *C*; *D* és *E* latinbetűk által alkotott halmaz.



1. ábra Egy egyszerű komplex kapcsolatú rendszer[3]

Mivel az elemek eme két állapota alkotja a teljes valószínűségi eseményteret, továbbiakban a

$$p_i = 1 - r_i \tag{1}$$

egyenletet, valamint az elemek

$$\mathbf{r}^T = \begin{bmatrix} r_A & r_B & r_C & r_D & r_E \end{bmatrix} \;; \tag{2}$$

megbízhatósági valószínűségvektorát fogjuk használni.

A teljes rendszer lehetséges állapotait, illetve ezen állapotok bekövetkezési valószínűségeinek meghatározását szemlélteti az 1 táblázat, ahol az állapotokat jelző oszlopokban az 1 üzemképes, a 0 pedig hibás, működésképtelen állapotot jelöl.

A rendszer a 10; 11; 12; 14; 15; 16; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 26; 27; 28; 29; 30; 31 és 32 sorszámú állapotok valamelyikének fennállása esetén működőképes. Ezen események egymástól függetlenek – egy időben csak az egyik állapotban lehet a rendszer –, ezért a rendszer megbízhatósága az

$$\begin{aligned} R_{sys} = {} & Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16} + Q_{19} + Q_{20} + Q_{21} + Q_{22} + Q_{23} + \\ & + Q_{24} + Q_{26} + Q_{27} + Q_{28} + Q_{29} + Q_{30} + Q_{31} + Q_{32} \end{aligned} \tag{3}$$

egyenlettel számítható ki.

3 Forrás: [1].

Állapot i	Elemek állapota					Rendszer állapota	Q_i
	A	B	C	D	E		
1	0	0	0	0	0	0	
2	1	0	0	0	0	0	
3	0	1	0	0	0	0	
4	1	1	0	0	0	0	
5	0	0	1	0	0	0	
6	1	0	1	0	0	0	
7	0	1	1	0	0	0	
8	1	1	1	0	0	0	
9	0	0	0	1	0	0	
10	1	0	0	1	0	1	$r_A p_B p_C r_D p_E$
11	0	1	0	1	0	1	$p_A r_B p_C r_D p_E$
12	1	1	0	1	0	1	$r_A r_B p_C r_D p_E$
13	0	0	1	1	0	0	
14	1	0	1	1	0	1	$r_A p_B r_C r_D p_E$
15	0	1	1	1	0	1	$p_A r_B r_C r_D p_E$
16	1	1	1	1	0	1	$r_A r_B r_C r_D p_E$
17	0	0	0	0	1	0	
18	1	0	0	0	1	0	
19	0	1	0	0	1	1	$p_A r_B p_C p_D r_E$
20	1	1	0	0	1	1	$r_A r_B p_C p_D r_E$
21	0	0	1	0	1	1	$p_A p_B r_C p_D r_E$
22	1	0	1	0	1	1	$r_A p_B r_C p_D r_E$
23	0	1	1	0	1	1	$p_A r_B r_C p_D r_E$
24	1	1	1	0	1	1	$r_A r_B r_C p_D r_E$
25	0	0	0	1	1	0	
26	1	0	0	1	1	1	$r_A p_B p_C r_D r_E$
27	0	1	0	1	1	1	$p_A r_B p_C r_D r_E$
28	1	1	0	1	1	1	$r_A r_B p_C r_D r_E$
29	0	0	1	1	1	1	$p_A p_B r_C r_D r_E$
30	1	0	1	1	1	1	$r_A p_B r_C r_D r_E$
31	0	1	1	1	1	1	$p_A r_B r_C r_D r_E$
32	1	1	1	1	1	1	$r_A r_B r_C r_D r_E$

1. táblázat A vizsgált rendszer lehetséges állapotai és azok bekövetkezési valószínűségei[4]

[4] Forrás: [1].

3. AZ ÉRZÉKENYSÉGI MODELL FELÁLLÍTÁSA

3.1. Általános megoldás

Egy általános, $y_j = f(x_1, x_2, ..., x_k) \quad f: \Re^k \to \Re$ alakban felírható függvény x_i független változóval szembeni érzékenységét a

$$K_{y_j x_i} = \frac{\partial f(x_1; x_2; \ldots x_k)}{\partial x_i} \frac{x_i}{f(x_1; x_2; \ldots x_k)} = \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \quad K_{y_j x_i} \subset \Re \tag{4}$$

együttható bevezetésével határozhatjuk meg, amely felhasználásával az alábbi lineáris egyenletet kapjuk:

$$\delta y_j = K_{y_j;x_1} \delta x_{y_j;x_2} + \ldots + K_{y_j;x_k} \delta x_k \quad , \tag{5}$$

amely a vizsgált rendszer paramétereinek relatív változásai közti kapcsolatot – azaz a kimenő jellemző relatív érzékenységét – írja le [2].

Következő lépésként a független és függő 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

$$\mathbf{A} \delta \mathbf{y} = \mathbf{B} \delta \mathbf{x} \tag{6}$$

mátrix-egyenlettel tudjuk leírni, ahol:

$\mathbf{A} \in \Re^{n \times n}$	–	függő események együttható mátrixa;
$\mathbf{B} \in \Re^{n \times m}$	–	független események együttható mátrixa;
$n \in \aleph$	–	függő események (lehetséges rendszer állapotok) száma;
$m \in \aleph$	–	független események (rendszerelemek) száma.

Felhasználva a

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad \in \Re^{n \times m} \tag{7}$$

mátrixalgebrai összefüggést, a rendszer $\mathbf{D}$ relatív érzékenységi mátrixát kapjuk meg, és a (10) egyenlet a

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{D} \delta \mathbf{x} \tag{8}$$

alakura módosul.

A relatív érzékenységi mátrix *i*-edik sorának *j*-edik eleme azt mutatja meg, hogy az *i*-edik függő esemény bekövetkezési valószínűségének relatív változását milyen mértékben befolyásolja a *j*-edik független esemény bekövetkezési valószínűségének (a rendszer *j*-edik elem üzemképessége) relatív változása.

A rendszer érzékenység vizsgálata során alapvetően csak a teljes rendszer megbízhatóságának érzékenységét vizsgáljuk. Ezért továbbiakban a fenti $\mathbf{D}$ érzékenységi mátrix első sorát, mint a rendszer $\mathbf{d} \in \Re^{m \times 1}$ relatívérzékenységi vektorát alkalmazzuk. Természetesen, szakmai szempontok alapján a rész események (rendszerállapotok) bekövetkezési valószínűségeinek érzékenységét is vizsgálhatóak.

3.2. A tipikus érzékenységi együtthatók meghatározása

A komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatósági modelljeiben a lehetséges rendszerállapotok bekövetkezési valószínűségei – lásd 1. Táblázat – az alábbi általános formában írhatóak fel:

$$Q_k = f_k(r_1; r_2; \ldots r_k) = \prod_{j=1}^{n} u_j(r_j) \quad , \tag{9}$$

ahol az u_j belső függvény az alábbi két forma egyikét veheti fel:

- ha a vizsgált elem üzemképes, akkor a belső függvény, illetve a (9) függvény r_j-sze-rinti érzékenységi együtthatója:

$$u_j = r_j \quad \rightarrow \quad K_{Q_k r_j} = 1 \quad ; \tag{10}$$

- ha a vizsgált elem hibás, akkor a belső függvény, illetve a (9) függvény r_j-szerinti érzékenységi együtthatója:

$$u_j = 1 - r_j \quad \rightarrow \quad K_{Q_k r_j} = -\frac{r_j}{Q_k} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n} u_k \quad . \tag{11}$$

A rendszer megbízhatóságának – lásd (3) egyenlet – az üzemképes elemállapotok bekövetkezési valószínűségei szerinti érzékenységi együtthatók:

$$K_{Ri} = \frac{Q_i}{R_{sys}} \quad . \tag{12}$$

3.3. Rendszer-megbízhatóság lineáris érzékenységi modellje

A fenti, általános meghatározások után az előző fejezetben felírt vizsgálati modellhez írjuk fel az aktuális érzékenységi együtthatókat, majd a modell lineáris érzékenységi modelljét.

A (3) függvény és belső összefüggései alapján a független események, azaz az elemek megbízhatóságai relatív változásainak vektora, esetünkben:

$$\delta \mathbf{x}^T = \delta \mathbf{r}^T = \begin{bmatrix} \delta r_A & \delta r_B & \delta r_C & \delta r_D & \delta r_E \end{bmatrix} \quad , \tag{13}$$

illetve a függő események valószínűségi relatív változásainak vektora:

$$\delta y^T = \begin{bmatrix} \delta R_{sys} & \delta Q_{10} & \delta Q_{11} & \delta Q_{12} & \delta Q_{14} & \delta Q_{15} & \delta Q_{16} & \delta Q_{19} & \delta Q_{20} & \delta Q_{21} & \delta Q_{22} & \delta Q_{23} & \delta Q_{24} & \delta Q_{26} & \delta Q_{27} & \delta Q_{28} & \delta Q_{29} & \delta Q_{30} & \delta Q_{31} & \delta Q_{32} \end{bmatrix} \tag{14}$$

a függő események együttható mátrixa:

$$
\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
1 & -K_{R10} & -K_{R11} & -K_{R12} & -K_{R14} & -K_{R15} & -K_{R16} & -K_{R19} & -K_{R20} & -K_{R21} & -K_{R22} & -K_{R26} & -K_{R27} & -K_{R28} & -K_{R29} & -K-K_{R30} & -K_{R24} & -K_{R23} & -K_{R31} & -K_{R32} \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix} \tag{15}
$$

a független események együttható mátrixa:

$$
\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & K_{10B} & K_{10C} & 1 & K_{10E} \\
K_{11A} & 1 & K_{11C} & 1 & K_{11E} \\
1 & 1 & K_{12C} & 1 & K_{12E} \\
1 & K_{14B} & 1 & 1 & K_{14E} \\
K_{15A} & 1 & 1 & 1 & K_{15E} \\
1 & 1 & 1 & 1 & K_{16E} \\
K_{19A} & 1 & K_{19C} & K_{19D} & 1 \\
1 & 1 & K_{20C} & K_{20D} & 1 \\
K_{21A} & K_{21B} & 1 & K_{21D} & 1 \\
1 & K_{22B} & 1 & K_{22D} & 1 \\
K_{23A} & 1 & 1 & K_{23D} & 1 \\
1 & 1 & 1 & K_{24D} & 1 \\
1 & K_{26B} & K_{26C} & 1 & 1 \\
K_{27A} & 1 & K_{27C} & 1 & 1 \\
1 & 1 & K_{28C} & 1 & 1 \\
K_{29A} & K_{29B} & 1 & 1 & 1 \\
1 & K_{30B} & 1 & 1 & 1 \\
K_{31A} & 1 & 1 & 1 & 1 \\
1 & 1 & 1 & 1 & 1
\end{bmatrix}. \tag{16}
$$

A rendszer-megbízhatóság érzékenységi vektorok értékeit tartalmazza a 2. Táblázat.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

4.1. A kidolgozott módszerrel kapcsolatos következtetések

Az elvégzett modellalkotás és elemzés alapján az alábbi következtetések vonhatóak le a kidolgozott módszerrel kapcsolatban [5]:

1-1. A kidolgozott eljárás alkalmas a komplex kapcsolatú rendszerek és hálózatok megbízhatóság-érzékenységi elemzésének elvégzésére.

1-2. Az érzékenységi együttható mátrixok elemei jól algoritmizálhatóan meghatározhatóak.

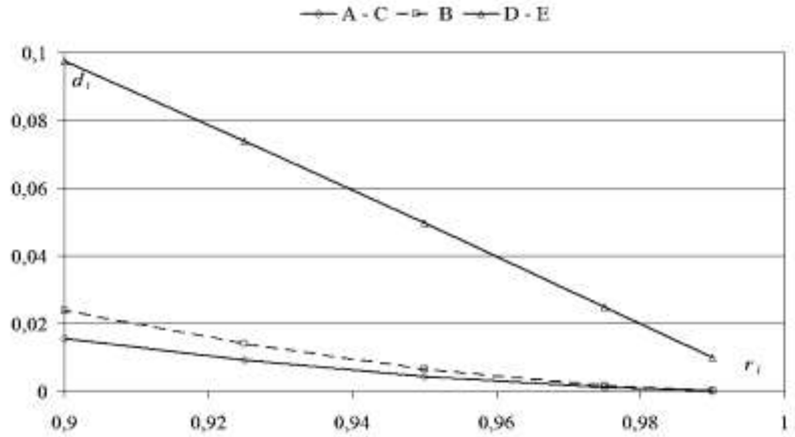
Mivel a valószínűségi egyenletek azonos struktúrájú elemeket tartalmaznak, ezért az azokhoz tartozó érzékenységi együtthatók a 3.2 alfejezetben leírt módon tipizáltan megadhatóak.

1-3. A módszer hátránya, hogy a rendszer lehetséges állapotainak száma exponenciálisan (2^m) növekszik az elemek száma függvényében.

4.2. A vizsgált rendszerrel kapcsolatos következtetések

Az elvégzett elemzések, melyek során mindegyik elem ugyanazon megbízhatósággal rendelkezett, alapján az alábbi következtetések vonhatóak le a vizsgált rendszerrel kapcsolatban:

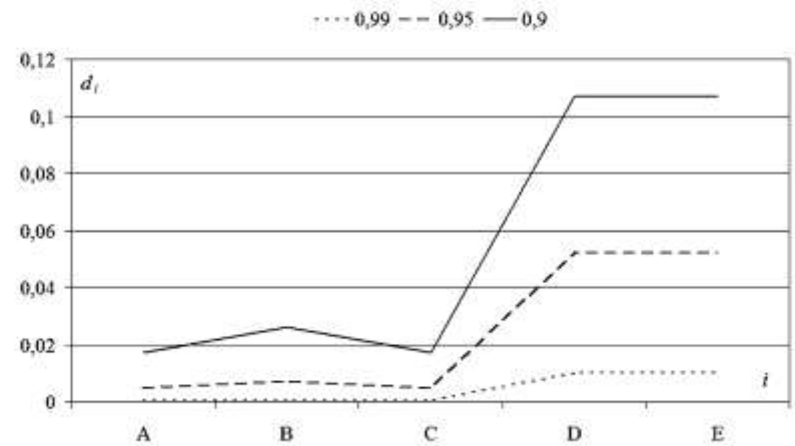
2-1. Az elemek megbízhatóságának növelése esetén csökken a rendszer megbízhatóságának relatív érzékenysége.



2. ábra A rendszer-megbízhatóság relatív érzékenysége az elem-megbízhatóságok függvényében

r_{inom}	d_{pinom}
0,99	$\mathbf{d}_{0,99} = [0{,}000197 \quad 0{,}000296 \quad 0{,}000197 \quad 0{,}010097 \quad 0{,}010097]$
0,95	$\mathbf{d}_{0,95} = [0{,}004631 \quad 0{,}007006 \quad 0{,}004631 \quad 0{,}052131 \quad 0{,}052131]$
0,90	$\mathbf{d}_{0,9} = [0{,}017100 \quad 0{,}026100 \quad 0{,}017100 \quad 0{,}107100 \quad 0{,}107100]$

2. táblázat A rendszer-megbízhatóság érzékenységi vektorai



3. ábra Rendszer-megbízhatóság relatív érzékenységei különböző elem-megbízhatósági értékek esetén

2-2. A rendszer érzékenysége alapvetően „szimmetrikus”.

A rendszer mindegyik modellezett esetben ugyanazon mértékű érzékenységgel bírt az **A** *és* **C**, *illetve a **D** és **E** elemek paramétereire. Ez a következtetés a rendszer fizikailag is szimmetrikus voltából várható is volt. Teljes szimmetrikusságot csak az elemek azonos megbízhatóságai esetén tapasztalunk.*

2-3. A rendszer érzékenyebb a „második sorban" található ***D*** és ***E*** elemek megbízhatósági paramétereinek változására.

2-4. Az „első sor" elemei közül a középső, ***B*** elem megbízhatóságával szemben nagyobb érzékenységet mutat a rendszer megbízhatósága, mint a másik két elem esetén.

Ennek az az oka, hogy az „első sor" középső eleme két irányban is „dolgozik", így hatását is két irányban fejti ki a rendszer megbízhatóságára, illetve működésképtelenségi valószínűségére.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány egy moduláris megközelítésű megbízhatóság-érzékenységelemzési eljárást mutatott be, mely az alkalmas komplex kapcsolatú véges hálózatok és (például híd struktúrájú) rendszerek megbízhatóságának, megbízhatóság-érzékenységének, valamint bizonytalanságának megfelelő minőségű leírására, elemzésére. A kitűzött célokból, és az elért eredményekből adódóan általánosítható eredmények születtek a komplex kapcsolatú rendszerek és hálózatok modellezései feltételeinek, valamint a felállított modellek, algoritmusok gyakorlati alkalmazási módjainak leírására. Az elemzési módszer kidolgozása során szerzett tapasztalatok felhasználhatóak anyag-, és/vagy energia, illetve közlekedési, logisztikai hálózatok és rendszerek megbízhatóságának érzékenység és parametrikus bizonytalanság elemzéseire.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] MYERS, ALBERT Complex System Reliability. Springer-Verlag, London, 2010.
[2] POKORÁDI LÁSZLÓ Rendszerek és folyamatok modellezése, Campus Kiadó, Debrecen, 2008.
[3] POKORÁDI LÁSZLÓ Sensitivity Investigation of Fault Tree Analysis with Matrix-Algebraic Method, Theory and Applications of Mathematics & Computer Science. Vol. 1, pp. 34-44.
[4] POKORÁDI LÁSZLÓ Hibafa érzékenységelemzése, Szolnoki Tudományos Közlemények. Vol. Különszám, pp. 150-157.
[5] POKORÁDI LÁSZLÓ Sensitivity Analysis of Reliability of Systems with Complex Interconnections, Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2014), doi: 10.1016/j.jlp.2014.09.017.
[6] RÁC TAMÁS Gázturbinás repülőgép hajtóművek üzemszerű elhasználódási törvényszerűségeinek vizsgálati módszerei, kandidátusi értekezés, MTA TMB, Budapest, 1978
[7] ROHÁCS JÓZSEF - SIMON ISTVÁN Repülőgépek üzemeltetési zsebkönyve. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1989.