

Pokorádi László

KARBANTARTÁSI FOLYAMAT SZIMULÁCIÓS ÉRZÉKENYSÉG ELEMZÉSE

Technikai rendszerek üzemeltetése egy, a berendezésekre, azok üzemeltetését, karbantartását, előkészítését és javításukat végző személyekre és eszközökre, illetve annak irányítására szolgáló utasításokra épülő sztochasztikus folyamat. Matematikai szempontból az üzemeltetés egy diszkrét állapotterű, utóhatásmentes sztochasztikus folyamat, így azt Markov-lánccal lehet matematikailag leírni. Az átmeneti valószínűségi mátrix felállítása után, mátrix-algebrai eszközök segítségével tudjuk a vizsgált folyamatot rendszerszemléletű megközelítéssel elemezni. A tanulmány célja bemutatni az úgynevezett beállt karbantartás folyamatok sztochasztikus modelljének felhasználásának történő érzékenységelemzésének lehetőségeit egy esettanulmányon keresztül.

Kulcsszavak: üzemeltetés; rendelkezésre állás; sztochasztikus modell; Markov-folyamat; érzékenységelemzés

1. BEVEZETÉS

A műszaki gyakorlat egyik fő területe a különböző technikai berendezések, rendszerek és létesítmények üzemeltetése, karbantartása. Az üzemeltetés tágabb értelemben a technikai eszközök használatának, különböző szintű kiszolgálásának és javításának összetett folyamata. Egy technikai eszköz üzemeltetése az eszközzel, vagy annak valamely rendszerével, berendezésével a gyártás és a kiselejtezés között történnék összessége. Ez a valós, technikai folyamat matematikai szempontból sztochasztikus (véletlen) folyamatnak tekinthető.

Az olyan sztochasztikus folyamatot, amelynek jövőbeli alakulását a múltbeli alakulása csak a jelen állapoton keresztül befolyásolja, azaz amely utóhatásmentes, Markov folyamatnak nevezzük [4]. Másképpen megfogalmazva: amikor az adott véletlen folyamat jövőbeni lefolyását csak a jelen állapot határozza meg [11].

Az üzemeltetési folyamatok rendszerszemléletű vizsgálata esetén megállapítható, hogy az egyes, jól definiált állapotokból való távozások (például meghibásodások) függetlenek az előzőekben történnéktől. Ezen tulajdonság alapján a technikai eszközök üzemeltetési folyamata Markov folyamatnak tekinthető és így matematikailag úgynevezett Markov-lánccal modellezhető [10].

Egy üzemeltetési rendszerről vagy annak valamely belső folyamatáról, illetve azok irányításának hatékonyságáról bizonyos jellemzők ismeretében dönthetünk. Ilyen jellemző lehet például az egységnyi üzemidőre eső karbantartási, javítási költség, kiszolgálási munkaigény, vagy az eszköz rendelkezésre állásának mértéke. Ezen jellemzők meghatározása az adott üzemeltetési folyamat rendszerszemléletű esetén, annak folytonos idejű, diszkrét állapotterű markovi modelljeinek segítségével történhet [6]. Erre láthatunk különböző példákat Békési és szerzőtársai [1], [2] és [3] publikációiban.

Az üzemeltetési folyamatok valószínűségi modellezéséhez szükséges matematikai ismeretek, többek közt, Bharucha-Reid [4], Karlin és Taylor [5], Wentzel és Ovcsarov [11], valamint Pokorádi [7] könyveiben olvashatóak.

Az üzemeltetési folyamat sztochasztikus matematikai modellje felhasználható a vizsgált üzemeltetési rendszer szimulációs érzékenységvizsgálatának elvégzésére. Ezen elemzés lényege, hogy a független változók értékeinek megváltoztatásával szimuláljuk az üzemeltetési körülmények, technológiák vagy az üzemeltetett technikai rendszer konstrukciójának megváltozását, pontosabban azok hatását az üzemeltetési állapotváltásokra. Ekkor a felállított matematikai modell felhasználásával meghatározható, hogy miként fognak változni a függő változók, azaz a vizsgált rendszer kimenő jellemzői. Így az elemzés megmutatja a rendszer (a névleges értékhez viszonyított) relatív érzékenységét a különféle modellezett paraméter-eltérésre, vagy eltérésekre.

Jelen tanulmány az üzemeltetési folyamatok, rendszerek érzékenységvizsgálatának szimulációs módszerének mutatja be egy esettanulmányon keresztül. A Szerző célja egy olyan korszerű elemzési eljárás kidolgozása a gyakorló karbantartási szakemberek számára, mellyel meg tudják határozni, hogy a konstrukció vagy a javítási, karbantartási technológiai változtatással lehet eredményesen növelni a karbantartás, üzemeltetés hatékonyságát, illetve gazdaságosságát.

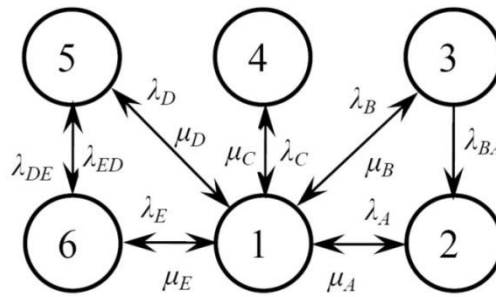
A dolgozat az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet a beállt üzemeltetési folyamatok sztochasztikus modelljének felállítását mutatja be röviden. A 3. fejezetben a szimulációs érzékenységelemzés módszere ismerhető meg egy vizsgált üzemeltetési folyamat példáján keresztül. A 4. fejezet a szimulációs érzékenységelemzés eredményeit, valamint az eredményekből levonható következtetéseket írja le. Végezetül a Szerző összegzi a tanulmányt.

2. KARBANTARTÁSI FOLYAMAT SZTOCHASZTIKUS MODELLEZÉSE

Az úgynevezett beállt üzemeltetési, karbantartási folyamatokat stacioner Markov folyamattal tudjuk matematikailag modellezni [7]. Beállt üzemeltetési folyamaton olyan folyamatot értünk, ahol a különféle állapotváltási – főleg a meghibásodási – valószínűségek időben nem (vagy csak elhanyagolható mértékben) változnak. Ilyen üzemeltetési folyamatot tapasztalhatunk a bejáratási és a kiöregedési szakaszok között, ha már nem lép fel jelentős változás az üzemeltetési körülményekben [9]. A kidolgozott vizsgálati eljárást egy mintapélda megoldásán keresztül szemléltetjük.

A karbantartási folyamat stacioner valószínűségi modelljének felállítását a gráf modell felrajzolásával kezdjük. A folyamatot súlyozott élű, irányított gráffal tudjuk szemléltetni, ahol az élek súlyát az állapotváltási valószínűség sűrűségek (meghibásodási, illetve javítási ráták) adják meg [8]. A folyamatot az 1. ábrán látható súlyozott élű, irányított gráffal szemléltetjük.

Egy speciális rendszer egyik berendezésének üzemeltetése során négy eltérő fő típusú – adott részegységekhez köthető – meghibásodást tapasztaltak (**A**; **B**; **D**; **E**), melyek a leállások körülbelül 94 %-t okozzák. A többi, nem szignifikáns mértékű meghibásodások javítását a **C** típusú meghibásodás javításaként kezeljük. A **B** típusú hiba javítása közben gyakran feltárták a szereplők, hogy az **A** típusú hiba fellépése is hamarosan bekövetkezhet. Hasonló (de „oda-vissza”) jelenségeket tapasztaltak a **D** és az **E** típusú meghibásodások javítása során is. Ekkor, megelőzési céllal, a másik típusú hibát kiváltó részegység javítását is elvégezték a karbantartók. A üzemeltetési adatok statisztikai elemzése kimutatta, hogy a meghibásodások bekövetkezési gyakoriságai exponenciális jellegű eloszlásokkal bírnak és a gyártósor működési idejétől függetlenek. A meghibásodások és a javításaik statisztikai főbb adatait az 1. táblázat tartalmazza.



1. ábra A folyamat gráf modellje

1 – rendeltetésszerű használat; 2 – A típusú meghibásodás javítása;
3 – B típusú meghibásodás javítása; 4 – C típusú meghibásodás javítása;
5 – D típusú meghibásodás javítása; 6 – E típusú meghibásodás javítása

Az adatok elemzése alapján kijelenthető a folyamatról, hogy annak úgynevezett sztochasztikus modellje felállítható, és azzal elemezhető. A gráf modell szerint a Kolmogorov-féle differenciál-egyenletrendszer – mely az állapotokban való tartózkodás valószínűségeinek időbeni változását írja le – az alábbi módon adható meg:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{d\tau} &= m_{11}P_1 + m_{12}P_2 + m_{13}P_3 + m_{14}P_4 + m_{15}P_5 + m_{16}P_6 \\ \frac{dP_2}{d\tau} &= m_{21}P_1 + m_{22}P_2 + m_{23}P_3 \\ \frac{dP_3}{d\tau} &= m_{31}P_1 + m_{33}P_3 \\ \frac{dP_4}{d\tau} &= m_{41}P_1 + m_{44}P_4 \\ \frac{dP_5}{d\tau} &= m_{51}P_1 + m_{55}P_5 + m_{56}P_6 \\ \frac{dP_6}{d\tau} &= m_{61}P_1 + m_{65}P_5 + m_{66}P_6 \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

ahol: m_{ij} az állapotváltási intenzitások, melynek értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

Meghibásodás	A	B	C	D	E
Meghibásodások közti átlagidő MTTF [óra]	1316,3	892,8	1339,4	1410,1	1396,4
Meghibásodási ráta λ [óra ⁻¹]	$7,597 \cdot 10^{-4}$	$1,1201 \cdot 10^{-3}$	$7,466 \cdot 10^{-4}$	$7,0917 \cdot 10^{-4}$	$7,1613 \cdot 10^{-4}$
Javítási átlagidő MTTR [óra]	7,08	9,63	2,14	8,21	7,62
Javítási ráta μ [óra ⁻¹]	0,14124	0,10384	0,46729	0,1218	0,13123
Átl. javítási költség rc_i [€]	150,2	115,4	98,7	210,8	352,4
Átlagos munkaigény rw_i [munkaóra]	14,16	14,45	5,35	24,63	17,5
λ_{ij} [óra ⁻¹]	–	0,427	–	0,613	0,524

1. táblázat Statisztikai elemzés főbb adatai

$m_{11} = -(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E)$	$m_{12} = \mu_A$
$m_{13} = \mu_B$	$m_{14} = \mu_C$
$m_{15} = \mu_D$	$m_{16} = \mu_E$
$m_{21} = \lambda_A$	$m_{22} = -\mu_A$
$m_{23} = \lambda_{BA}$	$m_{31} = \lambda_B$
$m_{33} = -(\mu_B + \lambda_{BA})$	$m_{41} = \lambda_C$
$m_{44} = -\mu_C$	$m_{51} = \lambda_D$
$m_{55} = -(\mu_D + \lambda_{DE})$	$m_{56} = \lambda_{ED}$
$m_{61} = \lambda_E$	$m_{65} = \lambda_{DE}$
$m_{66} = -(\mu_E + \lambda_{ED})$	

2. táblázat Állapotváltási sűrűségek

Mivel az általunk vizsgált folyamatot beálltnak, azaz időben változatlanak tekintjük, így az állapotokban való tartózkodási valószínűségek időszerinti deriváltjainak zérusnak kell lenniük, azaz:

$$\frac{dP_1}{d\tau} = \frac{dP_2}{d\tau} = \frac{dP_3}{d\tau} = \frac{dP_4}{d\tau} = \frac{dP_5}{d\tau} = \frac{dP_6}{d\tau} = 0 \quad . \quad (2)$$

Ekkor az (1) egyenlet mátrixalakban is felírható:

$$\mathbf{0} = \mathbf{M}\mathbf{p} \quad , \quad (3)$$

ahol:

$\mathbf{0}$ – null vektor:

$$\mathbf{0}^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad ;$$

$\mathbf{M}$ – az (1) lineáris egyenletrendszer együtthatómátrixa:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 \\ m_{41} & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & 0 & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} \end{bmatrix} \quad , \quad (4)$$

$\mathbf{p}$ – az állapotokban való tartózkodások valószínűségvektora:

$$\mathbf{p}^T = [P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5 \quad P_6] \quad . \quad (5)$$

A megoldás további feltétele az is, hogy

$$\sum_{i=1}^6 P_i(\tau) = 1 \quad , \quad (6)$$

amely azt fejezi ki, hogy az üzemeltetés tárgya csak a fenti hat állapot (melyek esetünkben a

teljes eseményteret alkotják) valamelyikében tartózkodhat.

Az egyenletrendszer megoldásakor problémaként jelentkezett, hogy a numerikus algoritmusok könnyen a $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ triviális megoldást adják (vagy adhatják) meg. Mivel a Szerző kutatási célja egy könnyen algoritmizálható vizsgálati eljárás kidolgozása volt, ezért a fenti eljárást módosította – lásd a [6] és [7] irodalmak. Az N -ismeretlenes (esetünkben hat-ismeretlenes) egyenletrendszert $N+1$ -ismeretlenesre alakította át. Az állapotokban tartózkodások valószínűségeinek vektora $N+1$ -edik elemének a teljes eseménytér bekövetkezésének valószínűségét – a (6) egyenletet – tekintve. Így a (3) egyenlet az alábbi alakura módosult:

$$\begin{bmatrix} & & 1 \\ & \mathbf{M} & \vdots \\ & & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_N \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} . \quad (7)$$

Ez a lineáris egyenletrendszer már bármely ismert numerikus módszerrel kapott eredménye a (3) egyenlet triviálistól eltérő megoldása lesz.

A fenti egyenletrendszer 1. táblázat értékeinek felhasználásával történő megoldása az alábbi állapotokban való tartózkodási valószínűségeket jelenti:

$$\begin{aligned} P_1 &= 9,7399 \cdot 10^{-1}; & P_2 &= 1,1452 \cdot 10^{-2}; \\ P_3 &= 2,0551 \cdot 10^{-3}; & P_4 &= 1,5562 \cdot 10^{-3}; \\ P_5 &= 5,1048 \cdot 10^{-3}; & P_6 &= 5,8403 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

A fenti eredmény alapján elsősorban ki tudjuk jelteni, hogy a berendezés esetén 97,4%-os készenlétet tudunk biztosítani a jelenlegi karbantartási rendszerrel. Mivel ismertek a javítási költségek, illetve a javítási munkaigények, így prognosztizálhatjuk, egy adott T vizsgálati idő alatti RC_Σ javítási költséget, illetve WE_Σ munkaigényt. Ez az alábbi összefüggések segítségével oldható meg:

$$RC_\Sigma = T \sum_{i=2}^6 \frac{rc_i P_i}{\tau_i} , \quad (8)$$

illetve

$$WE_\Sigma = T \sum_{i=2}^6 \frac{we_i P_i}{\tau_i} , \quad (9)$$

ahol:

rc_i – i -edik javítás költsége;

we_i – i -edik javítás munkaigénye.

Példánk esetén 10 000 órával számolva a javítási költség: 7405,1 Euro, illetve a munkaigény: 586,05 munkaóra.

3. SZIMULÁCIÓS ÉRZÉKENYSÉGELEMZÉS

Az előző fejezetben felállított sztochasztikus matematikai modell felhasználható a vizsgált üzemeltetési rendszer szimulációs érzékenységvizsgálatának elvégzésére. A felállított matematikai modell felhasználásával, a (7)–(9) egyenletek megoldásával, meghatározható, hogy miként fognak változni a vizsgált üzemeltetési rendszer kimenő jellemzői.

Egy általános, $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ alakú függvény i -edik független változó szerinti érzékenységi együtthatóját analitikusan a

$$K_{x_i} = K_i = \frac{\partial f(x_1; x_2; \dots x_n)}{\partial x_i} \frac{x_i}{f(x_1; x_2; \dots x_n)} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \quad (10)$$

differenciálhányadossal határozhatjuk meg. A modell sajátosságait figyelembe véve az üzemeltetési folyamat érzékenység vizsgálatát a (10) egyenlet felhasználásával nem tudjuk elvégezni. Ezért a (10) differenciálhányadosokat

$$K_{x_i} = K_i = \frac{\Delta y}{\Delta x_i} = \frac{y(x_{i0} + \Delta x_i) - y_0}{y_0} \quad (11)$$

differencia hányadosokká módosítjuk, ahol a 0 indexek a névleges értékeket jelölik. Az előző fejezetben kiindulásként felvett és meghatározott értékeket névleges értéként kezelve a független változókat 1%-al módosítjuk, majd a kapott eredmények alapján – a (11) egyenlet felhasználásával – határozzuk meg az üzemeltetési rendszer adott független változó szembeni relatív érzékenységét.

Vizsgálatunk során a független változók a különböző a meghibásodási és javítási átlagidők. Független változók pedig az állapotban tartózkodási valószínűségek, a várható javítási költség, valamint munkaigény.

Elsőként a meghibásodásig eltelt átlagidőket módosítottuk, növeltük, így szimulálva, hogy az adott meghibásodást okozó technikai rendszerelem megbízhatóságának növelését. A szimulációkkal kapott eredmények összehasonlításával meghatározhatjuk, mely elem vagy részegység megbízhatóságának javításával érhetjük el a teljes rendszer megbízhatóságának, rendelkezésre állásának legnagyobb mértékű növelését, a javítási költségének, illetve munkaigényének csökkentését. A meghibásodásig eltelt átlagidők 1%-os csökkentésének hatását – %-ban kifejezve – a teljes rendszer rendelkezésre állásának változásait szemlélteti a 2. ábra. A 3. és 4. ábrák pedig a javítási költség, valamint a javítási munkaigény érzékenységét ábrázolja.

A következő elemzés során 1%-al csökkentettük a javítási átlagidőket, így szimulálva azt, hogy – például a javítási technológia korszerűsítésével, vagy jobb munkaszervezéssel – azok hatékonyabbá válását. A kapott eredmények alapján meg tudjuk mondani, mely karbantartási, javítási technológia korszerűsítése eredményezi leghatásosabban a rendelkezésre állás javulását, a javítási költség, vagy munkaigény csökkenését. Az 5. ábrán szemléltethetjük az üzemeltetett rendszer üzemképességi valószínűségének javítási idővel szembeni érzékenységét. A 6. és 7. ábrák grafikonjai pedig a javítási költség, illetve munkaigény relatív változásait mutatja meg, a javítási idő 1%-os csökkenése esetén.

A grafikonok jól szemléltetik a vízszintes tengelyen elhelyezett, adott függő változó (kimenő rendszerjellemező) vizsgált független változóval szembeni érzékenységének mértéke (%-ban kifejezve), valamint előjele, azaz, hogy az a jellemző csökkenni vagy növekedni fog a szimulált esetben.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az előző fejezetekben bemutatott modellalkotási munka, majd a modell alkalmazásával elvégzett szimulációs elemzések eredményei alapján szakmai következtetéseket tudunk levonni, melyek két fő – a vizsgált rendszerrel és folyamattal, illetve a kidolgozott módszerrel kapcsolatos – csoportra oszthatóak.

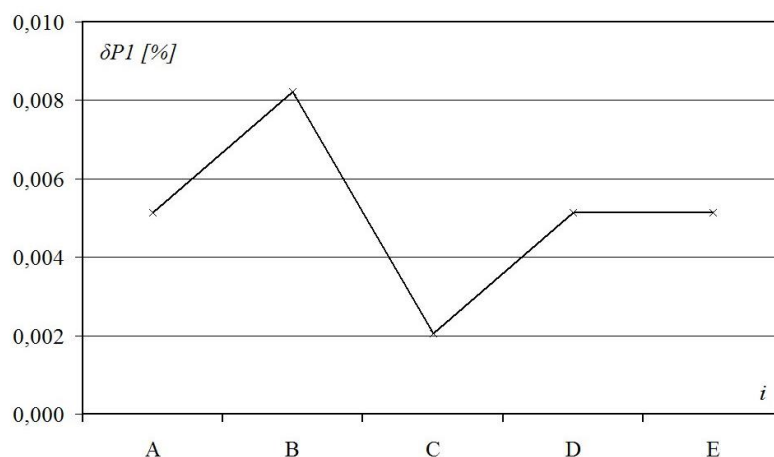
A konklúziók levonásához, a 2–7. ábrák diagramjain túl, célszerű ábrázolni a különböző javítási állapotban való tartózkodások valószínűségeinek a kiválasztott meghibásodási MTTF paraméterrel (8. ábra), illetve MTTR javítási paraméterrel (9. ábra) szembeni érzékenységét. Más szóval, a 8. ábra azt mutatja meg oszlopdigrammok formájában, hogy ha, valamelyik típusú meghibásodásig eltelt átlagidő 1%-al növekszik, hány százalékkal változnak a meghibásodási állapotokban való tartózkodások valószínűségei. A 9. ábra lényegében ugyanezt szemlélteti, de a javítások átlagidejének 1%-os csökkenése esetén.

4.1. A vizsgált rendszerrel kapcsolatos következtetések

Az elvégzett elemzések alapján az alábbi következtetések vonhatóak le a vizsgált rendszerrel kapcsolatban:

Fontos felhívni arra a figyelmet, hogy az ábrázolt paraméterek abszolút értékeit kell vizsgálnunk az érzékenység mértékének megállapításakor. Ezt követően célszerű meghatározni a változás matematikai, majd a szakmai előjelét. Az ábrákon a δ az adott paraméter relatív változását jelenti %-ban kifejezve.

- 1.1. A rendszer rendelkezésre állása a **B** típusú meghibásodásig eltelt átlagidőre a legérzékenyebb (2. ábra).

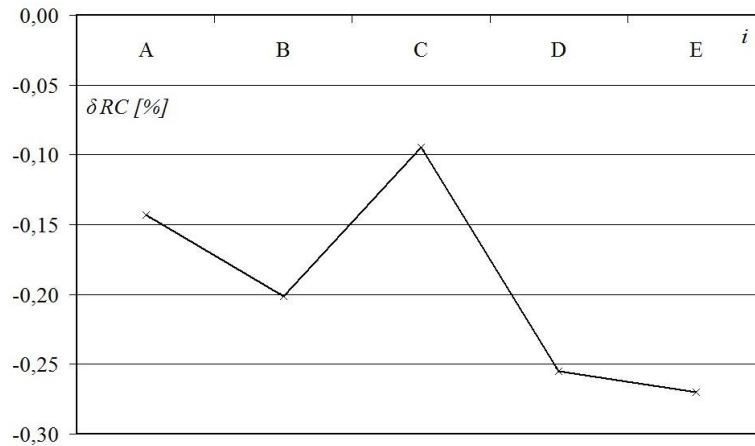


2. ábra Rendelkezésre állás érzékenységdiagramja az MTTF-ek függvényében

Az is megállapítható, hogy a MTTF-ek növekedése mindegyik szimulált esetben a rendszer üzemképességének növelését, javítását okozza.

- 1.2. A rendszer javítási költsége az **E** típusú meghibásodásig eltelt átlagidőre a legérzékenyebb (3. ábra).

Jelen esetben MTTF-ek növekedése mindegyik szimulált esetben a rendszer javítási költségének csökkenését okozza, ami – szakmai szempontból – pozitívnak mondható.

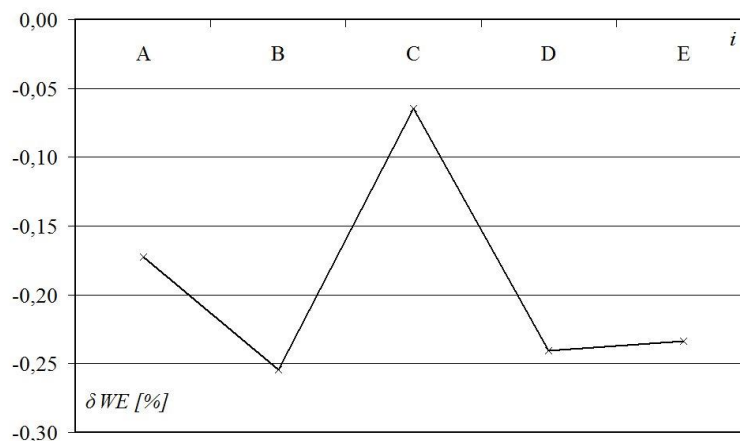


3. ábra Javítási költség érzékenységdiagramja az MTTF-ek függvényében

- 1.3. A rendszer javítási munkaigénye a **B** típusú meghibásodásig eltelt átlagidőre a legérzékenyebb (4. ábra).

Ebben az esetben is kimondható, hogy MTTF-ek növekedése mindegyik szimulált esetben a rendszer javítási munkaigényének csökkenését okozza, ami – üzemeltetési szempontból – pozitív. Továbbá az is megállapítható, hogy a **D** és az **E** meghibásodásokig eltelt átlagidők növekedése, növelése is jelentős mértékű rendszerszintű rendelkezésre-állás növekedés eredményezhet.

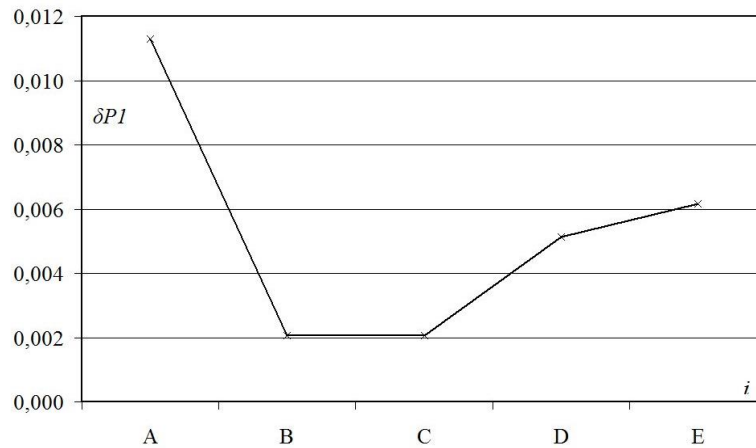
Az 1.1–1.3. következtetések azt jelentik, hogy ha a részegységek megbízhatóságának (MTTF) – például konstrukciós változtatással történő – javításával tervezzük növelni a rendszer megbízhatóságát, rendelkezésre állását, vagy csökkenteni javítási költségét, illetve javítási munkaigényét, akkor a legjobb eredményt az adott típusú hibát okozó részegység konstrukciós vizsgálatával célszerű kezdeni.



4. ábra Javítási munkaigény érzékenységi diagramja az MTTF-ek függvényében

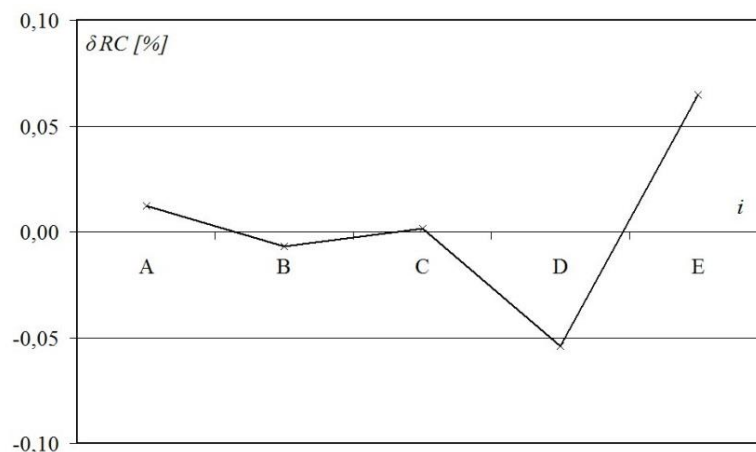
- 1.4. A rendszer rendelkezésre állása az **A** típusú meghibásodás javítási átlagidejére a legérzékenyebb (5. ábra).

Ez szakmai szempontból ez úgy értelmezhető, hogy az **A** meghibásodás javítási idejének – például a javítási technológia korszerűsítésével történő – csökkentése okozza a rendszer rendelkezésre állásának legnagyobb mértékű növekedését. Továbbá az is megállapítható az 5. ábrából, hogy a MTTR-ek csökkenése mindegyik szimulált esetben a teljes rendszer üzemképességének növelését, javítását okozza.



5. ábra Rendelkezésre állás érzékenységdiagramja az MTTR-ek függvényében

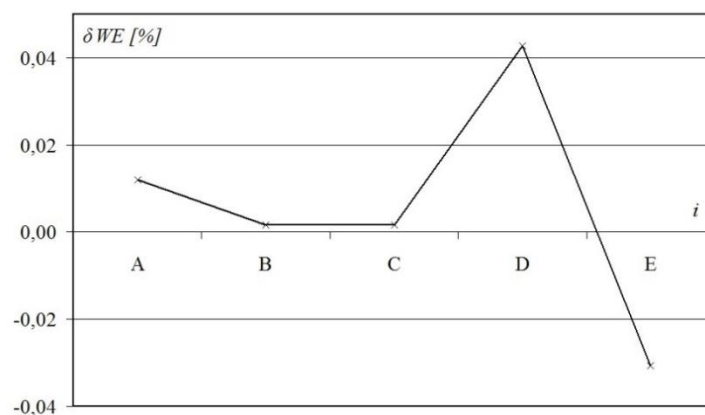
- 1.5. A rendszer javítási költsége az **E** típusú meghibásodás javítási átlagidejére a legérzékenyebb, de „negatív irányban” (6. ábra).



6. ábra Javítási költség érzékenységdiagramja az MTTR-ek függvényében

- 1.6. A rendszer javítási munkaigénye a **D** típusú meghibásodás javítási átlagidejére a legérzékenyebb, de „negatív irányban” (7. ábra).

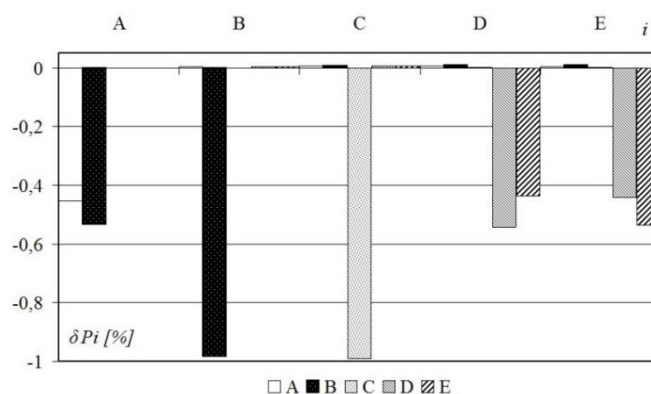
Ez a két paradox következtetés annak folyamánya, hogy bármely, a rendszer megbízhatóságát növelő lépés megváltoztatja a különböző meghibásodások javításának arányát. A **D** és az **E** típusú meghibásodások során nagy valószínűséggel szükségessé válik a másik részegység meghibásodás megelőző javítása is. Mint az a 8. és 9. ábrákon látható, a **D** és az **E** meghibásodások bekövetkezései és javításuk jelentős kereszthatást gyakorolnak egymásra. A két meghibásodás javítási költsége és munkaigénye jelentős mértékű – lásd 1. táblázat. Ráadásul „fordított”. A **D** meghibásodás igényli a leghosszabb javítási időt és a nagyobb munkaigényt, míg az **E** típusú hibához köthető a legnagyobb javítási költség.



7. ábra Javítási munkaigény érzékenységi diagramja az MTTR-ek függvényében

1.7. A javítási költség számottevő csökkentését csak a **D** típusú meghibásodás átlagidejének csökkentésével tudjuk elérni (8. ábra).

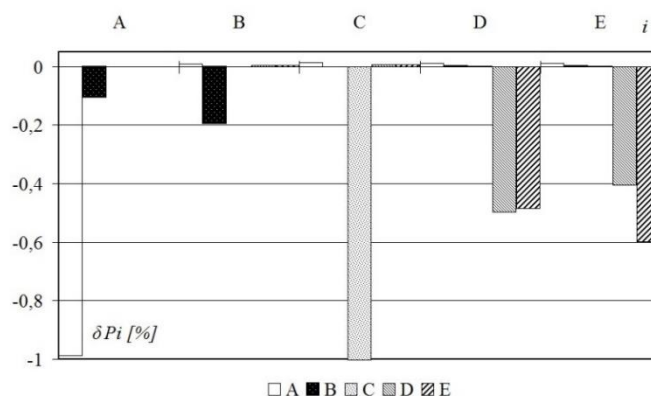
Ennél az elemzésnél azt tapasztalhatjuk, hogy az A és az E meghibásodások javítási átlagidejének csökkenése – ha kis mértékben is –, de a teljes javítási költség növekedését okozza, míg a C típusú javítás nincs hatással a rendszer javítási költségére.



8. ábra Az állapotokban való tartózkodások érzékenység diagramja az MTTF-ek függvényében

1.8. A javítási munkaigény csökkentését csak az **E** típusú meghibásodás átlagidejének csökkentésével tudjuk elérni (9. ábra).

Ebben az esetben a többi meghibásodás javítási idejének csökkenése minimális mértékben növeli a teljes javítási munkaidőt.



9. ábra Az állapotokban való tartózkodások érzékenység diagramja az MTTR-ek függvényében

4.2. A kidolgozott módszerrel kapcsolatos következtetések

Az elvégzett modellalkotás és elemzések, valamint a fentiekben levont konklúziók alapján az alábbi következtetések vonhatóak le a kidolgozott módszerrel kapcsolatban:

2.1. Helyes döntésnek bizonyult a modellalkotás során, hogy a nem szignifikáns mértékű meghibásodásokat egy (C) üzemeltetési állapotnak tekintettük.

A 2 – 7. ábrák grafikonjain látható, a C típusú meghibásodással szemben bírnak a legkisebb érzékenységgel a rendszer kimenő paraméterei. Ezzel egy időben a 8. és 9. ábrák oszlopdiagramjai egyértelműen szemléltetik, hogy a C meghibásodás MTTF és MTTR paramétereinek változása gyakorlatilag nincsenek hatással a többi javítási állapotban való tartózkodások valószínűségeire.

2.2. A kidolgozott eljárás alkalmas a beállt üzemeltetési folyamatok szimulációs érzékenységvizsgálatának elvégzésére.

A szimulációs vizsgálat eredményei rámutatnak arra, hogy a rendszerben komplex jellegű egymásra-hatások, kölcsönös függőségek találhatók. Könnyen lehetséges, hogy ezek kapcsolatok egy „lineáris elemzéssel”, egyszerű szemrevételezéssel rejtve maradnak, és így nem megfelelő döntések születnek.

2.3. A bemutatott eljárás továbbfejleszthető.

Például a termelési nyereség ismeretében nem csak a rendelkezésre állás, hanem a várható bevétel változása, érzékenysége is meghatározható. Ebben az esetben egy üzemeltetési költség-bevétel érzékenységelemzés is elvégezhető. Jelen tanulmányban, az adatok hiánya miatt ettől eltekintettünk.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány bemutatta a beállt üzemeltetési folyamatok sztochasztikus szimulációs érzékenységelemzésének módszerét. A javasolt elemzési eljárás alkalmas a karbantartási rendszer hatékonyságának növeléséhez szükséges döntések támogatására. Továbbá felhasználható a technikai rendszer konstrukciójának az üzemeltetése szempontjából történő javítási feladatainak meghatározására.

A rövid elméleti leíráson túl, egy minta példán keresztül, az eljárás gyakorlati alkalmazási lehetőségét is szemléltettük és leírtuk a szimulációs elemzés eredményeiből levonható szakmai következtetéseket.

A Szerző célja az üzemeltetési, karbantartási menedzsment döntéshozatalát támogató további matematikai modellezésen alapuló rendszerelemzési eljárások kidolgozása.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BÉKÉSI BERTOLD, ZSIGMOND GYULA: An applicable method of analysis of the failures of aircraft systems. Proceedings of the 11th International Conference: Transport Means 2007. Kaunas, Technologija, 2007. pp. 226-229.
- [2] BÉKÉSI BERTOLD, NOVÁK MÁTYÁS, KÁRPÁTI ATTILA, ZSIGMOND GYULA: Investigation of the Reliability of UAVs. Proceedings of the 16th International Conference: Transport Means 2012. Kaunas, Technologija, 2012. pp. 101-103.
- [3] BÉKÉSI BERTOLD, NOVÁK MÁTYÁS, KÁRPÁTI ATTILA, ZSIGMOND GYULA: Egyszerűsített

- UAV irányító rendszer megbízhatósági vizsgálata. Repüléstudományi Közlemények 2013/2, pp. 224-231.
- [4] BHARUCHA-REID A.T.: Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications, McGraw-Hill, New York, 1960.
- [5] KARLIN S., TAYLOR H.M.: Sztochasztikus folyamatok, Gondolat, Budapest, 1985.
- [6] POKORÁDI LÁSZLÓ: AvailabilityAssessmentBasedonStochasticMaintenanceProcessModeling”, Debreceni Műszaki Közlemények 2013/1, pp 37-46. (e-dok.) url: http://www.eng.unideb.hu/userdir/dmk/docs/20131/13_1_04.pdf (2015.12.20)
- [7] POKORÁDI LÁSZLÓ: Rendszerek és folyamatok modellezése, Campus Kiadó, Debrecen, 2008.
- [8] POKORÁDI LÁSZLÓ: Üzemeltetési folyamat gráfmodellezése, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2014/2, pp. pp. 224-231. (e-dok.) url: http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-19-0114_Pokoradi_Laszlo.pdf (2015.12.20)
- [9] POKORÁDI LÁSZLÓ: Markovian Modeling Wartime Operation of Military Aircraft, "International Aerospace Congress 1997", Sydney, Australia, Volume 2, p. 537–549.
- [10] ROHÁCS JÓZSEF, SIMON ISTVÁN: Repülőgépek üzemeltetési zsebkönyve. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1989.
- [11] WENTZEL E., OVCHAROV L.: Applied Problems in Probability Theory, Mir Publisher, Moscow, 1986.
-

SIMULATION-BASED SENSITIVITY ANALYSIS OF MAINTENANCE PROCESS

The operation of a technical system is a stochastic process based upon the equipment, its maintenance, its preparation, and also the personnel carrying out repair, and the regulations for the whole process. From the mathematical point of view, maintenance of manufacturing equipment is a discrete state space stochastic process without after-effects, so it can be modeled as a Markov-chain. After determination of probability densities of changes of operational states and setting up the transition probability matrix, a matrix-algebraic method can be used for investigating these processes with systems approach analysis. This paper is aimed to discuss the possibilities of the use of simulation-based sensitivity analysis of maintenance systems and processes. The proposed method can help decision making in maintenance management.

Keywords: maintenance; availability; stochastic modeling; Markov-process sensitivity analysis

POKORÁDI László (CSc)
egyetemi tanár
Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki
Kar
pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0003-2857-1887

POKORÁDI László (CSc)
Full professor
Óbuda University
Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety
Engineering
pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0003-2857-1887



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2016_2/2016-2-04-0256-Pokoradi_Laszlo.pdf