

IPARI RENDSZEREK MEGBÍZHATÓSÁGA

Szász Gábor

ÖSSZEFOGLALÁS

A megbízhatóság az ipari rendszerek egyik komplex jellemzője, és ugyanolyan fontos, mint a névleges teljesítmény, a hatásfok, a pontosság stb. A megbízhatóság kialakításában a mérnök a kulcsszerep. Ha a döntések során nincsenek tekintettel erre a körülményre, akkor nem várható optimális eredmény. Előírt megbízhatósági szinten az SSI-modell segítségével határozható meg az igénybevétel megengedhető szórása, illetve az igénybevétel ingadozásának ismeretében a teherbírás megengedett szórása is. A modell nemcsak mechanikai szerkezeteknél, hanem más technikai berendezéseknél, sőt társadalmi konfliktusok modellezésénél is hatásos lehet. A matematikai alakfelismerés lehetővé teszi bonyolult berendezések megbízhatóságának előrejelzését. E cikk ipari berendezések karbantartását elősegítő szabályozási körrel zárul. A kimenőjelet megfigyelve a rendszer aktuális állapotára lehet következtetni a matematikai alakfelismerést alkalmazva, és eme állapotnak megfelelően lehet beavatkozni.

SUMMARY

Reliability is an equipment property just as important as are nominal performance, load capacity, productivity, precision, etc., so the designer is in a key position to develop and increase reliability. If decisions do not observe this fact, then no optimal result can be expected. At the stipulated level of reliability the acceptable dispersion of stress can be determined by means of the SSI model, while the acceptable dispersion of strength can be determined knowing the fluctuation of stress. The model can be efficient not only for mechanical structures but also for other types of mechanical equipment, and even for modelling social conflicts. The general principle of a reliability prediction procedure using mathematical pattern recognition methods is given. In the paper a feedback control scheme for running and maintenance of industrial equipment is developed, where only input and output signals of the control loop are observable, the actual state of the system will be estimated from the output signals using pattern recognition.

1. A MEGBÍZHATÓSÁG FOGALMA

A XIX. század második felében számos vasúti katasztrófát idézett elő egy-egy váratlan tengelytörés. A Német Birodalmi Vasút rohamos műszaki fejlődése a sebesség növekedésével oda vezetett, hogy a vasúti tengelyek igénybevételének ciklusszáma is lényegesen megnőtt, és ez kifáradásos töréshez¹ vezetett. Wöhler² kísérleti úton megállapította, hogy milyen kapcsolat van az igénybevételi ciklusszám és a megengedhető igénybevétel között, valamint azt is, hogy vannak olyan szerkezeti anyagok, amelyeknek van kifáradási határa, azaz olyan ciklikus igénybevétel, amelyet végtelen ciklusszám esetén is törés nélkül elvisel. Az acél ilyen anyag, de pl. az alumínium nem. Éppen ezért nem szabad a korrózióknak jól ellenálló és kis fajsúlyú alumíniumból emlékművet készíteni, mert a szél hatására a róla leváló örvények³ kicsiny, de sokszor ismétlődő igénybevételnek tennék ki, amely viszonylag hamar kifárasztaná. A repülőgépek teherviselő elemeit, mint pl. a főtartó, acélból készítik, a burkolatot pedig ötvözött alumíniumból. Az élettartamot a kifáradási jelenség határozza meg, ha nem következik be katasztrófa (váratlan és tragikus kimenetelű meghibásodás). A forgást megkönnyítő gördülő csapágyakat már több mint száz éve élettartamra méretezik, illetve annak megfelelően választják ki a csapágygyárak katalógusából. Vannak extrém hosszú élettartamú ipari gyártmányok és használati tárgyak is, mint pl. a 110 éve világító izzólámpa [i1].

A XX. század első felében megbízhatóságon a hibamentes működés valószínűségét értették. A megbízhatóság növelésére való törekvés mellett már az 1920-as években megkezdődött az élettartam szándékos csökkentése is, üzleti megfontolásból [i2]. A II. világháború idején a *megbízhatóság* és az ún. *hadra-*

¹ Mindenki ismeri azt a jelenséget, hogy egy darab drótot hajlítgatással el lehet törni (a hajlítgatás helyén felmelegszik, berepedezik és eltörik). Arra azonban nem gondoltak 150 évvel ezelőtt, hogy egy edzett acéltengely is kifáradhat.

² August Wöhler (1819–1914) német vasútépítő mérnök 1856-tól végzett kísérleti és elméleti vizsgálatokat az anyagtudomány terén. A francia-porosz háború után Strassburgban császári vasútigazgató, 1874-től 1889-ig.

³ Kármán-féle örvénysor.

foghatóság roppant fontossá vált. (Pl. a német repülőgép-tervezők felfigyeltek az alkatrészsorszám és a meghibásodás gyakorisága közti kapcsolatra, de nem volt ellene hatásos eszközük.)

Később más tényezők jelentőségét is felismerték; a megbízhatóság fogalma komplexsége vált. Az 1970-es években pl. az MSZ KGST 292-76 szabvány a megbízhatóságot az alábbi jellemzők együtteseként határozta meg: *hibamentesség, tartósság, javíthatóság és tárolhatóság*.

A ma is hatályos MSZ IEC 50(191): 1992 szabvány *definíciója szerint a megbízhatóság gyűjtőfogalom, amelyet a használhatóság és az azt befolyásoló tényezők, azaz a hibamentesség, a karbantarthatóság és a karbantartás-ellátás leírására használnak.*

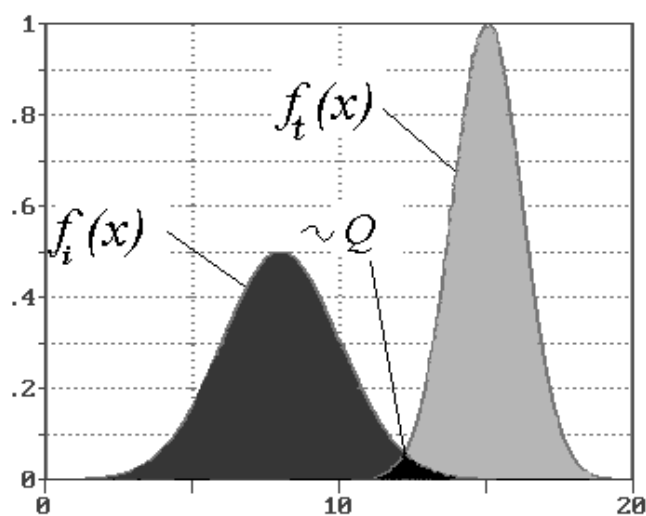
2. AZ SSI-MODELL

2.1 Az SSI-modell elve

A tervezés és az üzemeltetés során a szakembernek szüksége van egy olyan elméletre, amely kapcsolatot teremt a szerkezeti és a működési paraméterek között, miközben előre meghatározott működési valószínűségekre kell törekednie. Az nyilvánvaló, hogy a használati tárgyak akkor hibásodnak meg, ha az igénybevétel pillanatnyi értéke túllépi a teherbírását.

Az előzőekben – nagy vonalakban – vázoltuk a meghibásodás okát. Most matematikailag is meghatározzuk bekövetkezési valószínűségét. A műszaki rendszerek egyetlen igénybevétel miatti meghibásodása valószínűségének meghatározására több módszert ismerünk. Ezek egyike az *igénybevétel-teherbírás átfedésszerű módszer* (ITÁ), amelynek a nemzetközi szakirodalomban [1], [2] SSI (Stress-Strength Interference technique) az ismert rövidítése.

Ha egy mechanikai szerkezet teherbírását több tényező befolyásolja (pl. a kritikus szerkezeti elem méretszóródása, az ötvözők viszonyának szóródása, a hőkezelés idejének, hőmérsékletének szóródása), akkor a központi határeloszlás-tétel alapján indokoltan feltételezhetjük, hogy a teherbírás – pl. egyenértékű mechanikai feszültségben kifejezve – egy normális eloszlású valószínűségi változó m_t várhatóértékkel és σ_t szórással. Az igénybevétel is sok hatás eredője, hiszen a szerkezet komponenseinek méret- és helyzetűrésén belül bárhol lehetnek a paraméterek, miközben az aktív terhelés maga is üzemszerűen ingadozhat, ezért mechanikai feszültségben kifejezve szintén normális eloszlású valószínűségi változóval modellezhető, amelynek paraméterei: m_i és σ_i . A hagyományos méretezés során a két várhatóérték közti különbséget valamilyen iparági szabvány, vagy más tervezési előírás szerinti biztonsági tényező alapján állapítják meg. A szóródás miatt ilyenkor is előfordulhat olyan eset, amikor a valószínűségi változók különbsége előjelet vált a feltételezethez képest. Ezt szemlélteti az **1. ábra** feketével satírozott területe, amely a meghibásodás valószínűségével arányos.



1. ábra

Az igénybevétel és a teherbírás valószínűségi sűrűségfüggvénye

2.2 Az SSI-modell képlete

Bizonyítható (a bizonyítást ismertettük e periodika korábbi számában [3]), hogy a meghibásodás valószínűsége ilyenkor

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-SM} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \Phi(-SM) = 1 - \Phi(SM)$$

ahol SM (safety margin) az ún. *biztonsági ráhagyás*:

$$SM = \frac{m_t - m_i}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_i^2}}$$

SM az üzemelés biztonságára jellemző mutató, amely az eloszlások ismeretében kiszámítható, $\Phi(x)$ értékeit táblázatból vehetjük ki. A működés valószínűsége:

$$R = 1 - Q = \Phi(SM)$$

2.3. Alkalmazási példa

A több példányban készített mechanikai berendezés mértékadó teherbírása és igénybevétele is normális eloszlású, és paramétereit egy kivételével ismerjük. A teherbírás: $m_t=500$ MPa és $\sigma_t=50$ MPa, az igénybevétele pedig: $m_i=300$ MPa, de $\sigma_i=?$ Tehát azt kell meghatározni, hogy az üzemvitel szóródásából mekkora szórású igénybevétel engedhető meg, ha például $R=0,9900$ a hibamentes működés előírt valószínűsége.

A számításhoz felhasználjuk a standard normális eloszlásfüggvény értéktáblázatának alábbi részletét.

1. táblázat

x	2,30	2,32	2,34	2,36
$\Phi(x)$	0,9893	0,9898	0,9904	0,9909

Az első lépés SM meghatározása lineáris interpolációval:

$$R = \Phi(SM)$$

$$SM \approx 2,32 + \frac{0,9900 - 0,9898}{0,9904 - 0,9898} \cdot 0,02 = 2,32 + \frac{2 \cdot 0,02}{6} \approx 2,3267$$

$$SM = \frac{m_t - m_i}{\sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_i^2}} = \frac{500 - 300}{\sqrt{50^2 + \sigma_i^2}}$$

$$\Rightarrow \sigma_i^2 = \left(\frac{200}{2,3267} \right)^2 - 2500 = 4888,89 \text{ [MPa}^2] \Rightarrow \sigma_i = \sqrt{4888,89} = 69,92 \approx 70 \text{ [MPa]}$$

Tehát az adott berendezést úgy kell üzemeltetni, hogy a 300 MPa várhatóértékű igénybevétel szórása ne haladja meg a 70 MPa-t.

2.4. Az SSI-modell egyéb alkalmazásai

Amint azt a bevezető részben említettük, az SSI-modell nemcsak mechanikai szerkezeteknél alkalmazható. Villamos berendezéseknél az „igénybevétel” és a „teherbírást” áramsűrűségben fejezhetjük ki, hi-

szén a terhelőáram az erő, vagy a nyomaték analógja. Az árvízvédelmi töltések tervezésénél a biztonsági tényező helyett jobbnak tartják az *SM* mutatót [4].

A szakértők kockázatbecslése és a laikusok veszélyérzete külön-külön szóródik, és átlaga jelentősen eltérhet egymástól. Az ebből keletkező konfliktus jellemzésére bevált egy, az SSI-vel analóg valószínűségi modell [5].

3. RENDSZERELEMRE VONATKOZÓ STRESSZ-MODELLEK

A nagy megbízhatóságú berendezések tesztelése sokáig tart, és mire eredményre vezetne a kísérlet, a berendezés már el is avulhat. Éppen ezért keresték a kutatók az *élettartam-kísérletek* gyorsításának a lehetőségeit. A statisztikailag tervezett klasszikusnak tekinthető kísérletek mellett a II. világháborúban, az USA-ban megjelent *Wald Ábrahám* szekvenciális kísérleti terve [6] is, de ma már ez is közismert, hiszen pl. a 40 évvel ezelőtt alkalmazott ESZR-szabványok is tartalmazták. A fizikai mennyiségek üzemtől eltérő, ún. forszírozott alkalmazása is elterjedt, különösen az elektronikus eszközök vizsgálatánál. A gyorsítás felső határát is meg kell határozni. Bonyolult berendezéseknél ez történhet statisztikai hipotézisvizsgálattal is.

3.1. Szedjakin-elv (GS) *Generalized Sedjakin's model* gyorsított vizsgálathoz [7]

A GS modell lényege az, hogy a berendezés rendelkezésére álló ún. *munkaképességi tartalékot* különféle módon is fölemészthetjük. Változtatva az igénybevétel frekvenciáját két statisztikai mintául választott eszközcsoportnál, statisztikai próbával lehet meghatározni, hogy melyik az a felső frekvenciahatár, ameddig a két mintát azonos sokaságba tartozónak lehet tekinteni. Az így meghatározott igénybevételi frekvenciát alkalmazva a laboratóriumi kísérlet eredményei átszámíthatók üzemi körülményekre.

3.2 Arrhenius-törvény

*Arrhenius*⁴ munkásságának egyik részeredménye a kémiai reakciósebesség hőmérséklettől való függésére vonatkozó törvénye. Ennek egyik következménye, hogy bizonyos használati eszközök várható élettartama 10 °C hőmérsékletnövekedés hatására felére csökken. Ilyenek pl. a CMOS elektronikus eszközök is. Az Arrhenius-törvénynek ezt az egyszerű összefüggését gyorsított élettartam-kísérletekre is fel szokták használni. Példaként tekintsük a következő esetet:

CMOS eszköz gyorsított vizsgálatát elvégezték egy gyár laboratóriumának klímakamrájában. A szilíciumlapka réteghőmérsékletei: $\vartheta_{üz}=75\text{ °C}$ és $\vartheta_{lab}=115\text{ °C}$.

A laboratóriumi vizsgálat alapján megállapították, hogy a várható élettartama: $T_{lab}=6575\text{ h}$.

Mekkora a várható élettartam üzemi réteghőmérsékleten?

Folyamatos üzem esetén ez hány évnek felel meg?

$$T_{üz} = 2^{\frac{\vartheta_{lab}-\vartheta_{üz}}{10}} T_{lab} = 2^{\frac{115-75}{10}} \cdot 6575 = 2^4 \cdot 6575 = 16 \cdot 6575 = 105200[\text{h}]$$

$$T_{üz} = \frac{105200}{24 \cdot 365,25} \approx 12[\text{év}]$$

Tehát egy ilyen elektronikus eszköz várható élettartama üzemi körülmények között 12 év.

⁴ **Svante August Arrhenius** (szül. 1859. febr. 19. Vik, Svédország – megh. 1927. okt. 2. Stockholm), svéd fizikai kémikus. Arrhenius az uppsalai püspöki iskolába járt, majd beiratkozott az egyetemre, ahol fizikát, matematikát és kémiát tanult. Stockholmba költözött, hogy *Erik Edlund* vezetésével az elektrolízist kutassa. 1883-ban publikálta első cikkét, és 1884-ben Uppsalában megvédte doktori disszertációját, amely embrionális formában már tartalmazta disszociációs elméletét. Külföldön igen jó hírnek örvendett, de csak 1901-ben választották a Svéd Tudományos Akadémia tagjai közé, és még akkor is csak sok ellenszavazattal. 1902-ben megkapta a londoni Royal Society Davy-érmét, és 1911-ben külföldi taggá választották. 1903-ban saját honfiktársai is kárpótolták, amikor a svédek közül elsőként vehette át a kémiai Nobel-díjat.

Az Arrhenius-törvény általánosabban használható képletéhez az ún. örökifjú eszközök másik hibamentességi mutatójának, a meghibásodási rátának⁵ a hőmérsékletfüggését írják le az azt befolyásoló folyamatokra jellemző aktiválási energia segítségével. A meghibásodási ráták viszonya egyenlő a Boltzmann-eloszlások hányadosával:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{e^{-\frac{E}{kT_j}}}{e^{-\frac{E}{kT_{j0}}}}$$

ahol λ_0 a meghibásodási ráta a T_{j0} vonatkoztatási hőmérsékleten;
 k a Boltzmann-állandó;
 E az aktiválási energia, amely a hibamechanizmustól függ;
 $T_j = T_k + P \cdot R_g$ a réteghőmérséklet, amely tehát függ a
 T_k környezeti hőmérséklettől, a
 P disszipált teljesítménytől és az
 R_g termikus ellenállástól.

Az Arrhenius-törvény képletének közismert alakja:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot e^{\frac{E}{k} \left(\frac{1}{T_{j0}} - \frac{1}{T_j} \right)}$$

Pl.: a meghibásodási ráta hőmérsékletfüggő gyorsítási tényezője 50°C-ról 75°C-ra növelt réteghőmérséklet esetén a bipoláris eszköznél 3, MOS technológiával előállítottnál pedig 8,3.

A Mikroelektronika Vállalat laboratóriumában meghatározták az aktiválási energiákat különféle hibamechanizmus esetén:

2. táblázat

Hibamechanizmus	Aktiválási energia [eV]	Relatív gyakoriság \cong valószínűség
Oxidletörés	0,3	0,15
Elektronmigráció	0,5	0,1
Intermetallikus hibák	0,7	0,05
Fémezési hibák	0,8	0,1
Felületi hibák	0,9	0,4
Térfogati hibák	1,0	0,2

Példa: Mekkora a gyorsítási tényező, ha a disszipált teljesítmény $P = 14$ mW, a termikus ellenállás

$R_g = 7275$ [K/W], a vonatkozási réteghőmérséklet $T_{j0} = 320$ K, a környezeti pedig $\vartheta_k = 25^\circ\text{C}$?

Az átlagos aktiválási energia kiszámításához rendelkezésünkre áll a hibamechanizmusok relatív gyakoriságának kísérleti adatsora, ezzel kiszámítható az aktiválási energia várható értéke:

$$\tilde{E} = 0,15 \cdot 0,3 + 0,1 \cdot (0,5 + 0,8) + 0,05 \cdot 0,7 + 0,4 \cdot 0,9 + 0,2 = 0,77 [\text{eV}]:$$

⁵ Exponenciális eloszlású meghibásodási időpontok esetén a meghibásodási ráta reciproka az élettartam várható értéke.

A működéskor kialakuló réteghőmérséklet:

$$T_j = \vartheta_k + 273,15[\text{K}] + P \cdot R_g = 298,15 + 14 \cdot 10^{-3} \cdot 7275 = 400[\text{K}]$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = e^{\frac{\tilde{E}}{k} \left(\frac{1}{T_{j0}} - \frac{1}{T_j} \right)} = e^{\frac{0,77 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \left(\frac{1}{320} - \frac{1}{400} \right)} \cong 265$$

(A fizikai állandók közelítő értéke: $1\text{eV} \cong 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{J}]$ és $k \cong 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{J/K}]$)

Ebben az esetben mekkora hibát követnénk el, ha az Arrhenius-törvénynek korábban megfogalmazott, egyszerű módszerével számolnánk?

$$\Delta T_r = 80\text{K} \quad (T_{10} = 10\text{K}) \Rightarrow \frac{\lambda}{\lambda_0} \cong 2^{\frac{\Delta T_r}{T_{10}}} = 2^8 = 256$$

Tehát a relatív hiba:

$$h_{\%} \cong \frac{\text{hibás} - \text{helyes}}{\text{helyes}} \cdot 100\% = \frac{256 - 265}{265} \cdot 100\% \cong -3,4\%$$

4. RENDSZERRE VONATKOZÓ MODELLEK

4.1. Tartalékolás, hibatűrés

A számítógépek tervezésére vonatkozó egyik, *Neumann Jánostól* származó alapelv szerint kis megbízhatóságú, azaz rövid élettartamú elemekből is lehet előírt megbízhatóságú, tehát hosszú élettartamú számítógépet készíteni. Ennek az a technikája, hogy egy funkcionális elem mellé m darab ún. melegtartalékot építünk be, ahogy a természet is több idegsejtet alkalmaz ugyanarra a feladatra az agyunkban. A tartalékolásnak van ennél hatékonyabb módszere is, mégpedig az ún. hidegtartalék alkalmazása. Ilyenkor a tartalékok mindaddig ki vannak kapcsolva, ameddig az alapelem, illetve az annak helyébe lépő tartalék el nem romlik. Hiba esetén az egyik tartalék bekapcsolódik, de a többi tovább várakozik. Az ilyen tartalékcsoport működési idejének várhatóértéke a fenti gondolatmenet alapján:

$$T_{m+1}^* = (m+1)T_1$$

Sajnos a hidegtartalékolást nem mindig lehet megvalósítani, és egy ideális átkapcsoló készülékre is szükség van hozzá.

4.1.1. Boole-modellek [14]⁶

Példaként a tekintsük a 100%-os melegtartalékolt rendszer várható élettartamának meghatározását azonos, állandó meghibásodási rátájú elemek esetén. Nem javítható rendszer meghibásodásáig eltelt idő várható értéke az alábbi impropius integrállal számítható ki:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \left[1 - \left(1 - e^{-\lambda t} \right)^n \right] dt,$$

ahol $\lambda > 0$, $t \geq 0$ és $n = m + 1$.

⁶ Id. mű pp. 44-47.

Bevezetjük az $x=1-e^{-\lambda t}$ helyettesítést:

$$\begin{aligned} T_{m+1} &= \int_0^{\infty} \left[1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1} \right] dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} dx = \\ &= \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{(1-x)(1+x+x^2+\dots+x^m)}{1-x} dx = \\ &= \frac{1}{\lambda} \int_0^1 (1+x+x^2+\dots+x^m) dx = \frac{1}{\lambda} \left[\sum_{i=1}^{m+1} \frac{x^i}{i} \right]_0^1 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{i} \end{aligned}$$

A harmonikus sor nem konvergens, mert a sorösszeg végtelenhez tart. Ha sok tagra kell a részösszeget kiszámítani, akkor az alábbi közelítést alkalmazhatjuk. A reciprokfüggvény integráljához 1-et hozzáadunk és levonunk háromszögeket:

$$\sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{i} \approx 1 + \int_1^{m+1} \frac{dx}{x} - \frac{1 - \frac{1}{m+1}}{2} = \ln(m+1) + \frac{m+2}{2(m+1)}, \text{ ha } m \geq 0$$

Ezzel hibát követünk el, mert a hiperbola csak nagyobb számoknál közelíthető egyenes szakaszokkal. Ezt úgy korrigáljuk, hogy $m=5$ -ig a pontos sorösszeggel számolunk:

$$\sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{i} \approx 2,45 + \int_6^{m+1} \frac{dx}{x} - \frac{\frac{1}{6} - \frac{1}{m+1}}{2} = 2,45 + \ln(m+1) - \ln 6 - \frac{m-5}{12(m+1)}, \text{ ha } m \geq 5$$

Ennek a korrekciónak nagy m -eknél érvényes aszimptotikus értéke:

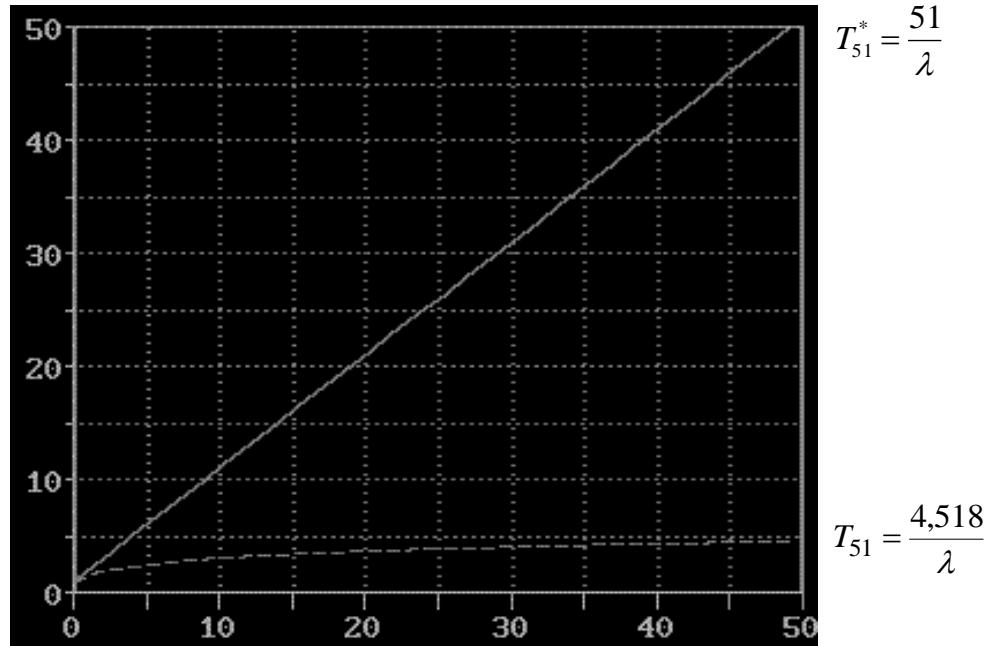
$$2,45 - \ln 6 - \frac{1}{12} \approx 0,57491$$

Ha ezt a törtet két egészszám hányadosaként próbáljuk felírni, akkor az közelítőleg $\frac{15}{26}$ -dal egyenlő.

Az $m=0$ -tól érvényes képletbe 2 helyére ennek reciprokát írva:

$$\sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{i} \approx \frac{15m+26}{26(m+1)} + \ln(m+1).$$

Például $m < 51$ esetén a meleg- és a hidegtartalékolást összehasonlító grafikon a **2. ábrán** látható. Ha az $m^*=50$ -nél hidegtartalékkal elérhető időtartam-növekedést melegtartalékkal szeretnénk elérni, akkor ahhoz kb. $m=7,915 \cdot 10^{21}$ tartalékelemre lenne szükség (!).



2. ábra

Az élettartam növekedése meleg- (---) és hidegtartaléknál (____)

4.1.2. Tartaléktípusok

A tartalékolás lehet *szerkezeti*, *terhelési*, *algoritmusbeli* és *időbeli*. A terhelési tartalék elvileg az élettartam-kísérleteknél alkalmazott forszírozás fordított alkalmazása. Ha szerkezeti tartalékolással együtt alkalmazzuk úgy, hogy a csökkentett terhelésnél egy tartalék elem meghibásodási rátája λ , az eredeti terhelésűé pedig λ_1 , és $\lambda < \lambda_1$, akkor a rendszer várható élettartama:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{1}{\frac{\lambda_1}{\lambda} + i}$$

Látszik, hogy $\lambda \rightarrow \lambda_1$ esetben a fenti képlet átmegy a 100%-os képletébe.

Az *algoritmusbeli tartalékolás* témája egy külön cikket érdemelne, de a lényege a megnevezéséből kiolvasható. A *szerkezeti tartalékolásra*⁷ már láttunk néhány példát. Hibátűrés szempontjából is roppant tanulságos a részleges tartalékolás, amikor n párhuzamosan kapcsolt elem közül h számú meghibásodását tűri a rendszer, illetve $m=n-h$ működése is elegendő a rendszerfunkció teljesítéséhez.

Függetlenül meghibásodó, azonos típusú elemekből álló rendszer működési valószínűsége:

$$P(M) = \sum_{k=0}^h \binom{n}{k} p^{n-k} q^k \equiv \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} p^k q^{n-k},$$

ahol p egy-egy elem működési valószínűsége meghatározott körülmények (küldetési idő, igénybevételi szint stb.) esetén;

$q=1-p$ egy-egy elem meghibásodásának valószínűsége.

⁷ Szokásos megnevezése még a strukturális redundancia

Ez a képlet $h=0$ esetén átmegy a soros Boole-modellébe: $P(M)=p^n$, $h=n-1$ esetén pedig a párhuzamosra: $P(M)=1-q^n$. Ha az elemek meghibásodása függetlenségének kritériuma nem teljesül, akkor a tartalékhoz fűzött remények sem. Pl. a szovjet N1 holdrakéta kudarcának az a matematikai magyarázata, hogy a máig korszerűnek tekinthető, ún. zárt ciklusú rakétahajtómű, ha meghibásodott, akkor a négyszeres kamranyomás⁸ következtében rendszerint felrobbant, és a repeszhatás az egész úrrakétát megsemmisítette. A szovjet tervezők az N1 holdrakéta első fokozatába 30 db NK-15-ös hajtóművet építettek két kör kerületén elhelyezve. Feltételezték, hogy három hajtómű meghibásodása esetén is képes teljesíteni a küldetését. Ha a függetlenség kritériuma teljesült volna, akkor a hajtóműrendszer működési valószínűsége kb. 0,97 lett volna, de a valóságban még a 0,3-at sem érte el. A **3. táblázat** különböző p -nél tartalmazza a $h=3$ és a $h=0$ esetre számított rendszerműködési valószínűséget.

3. táblázat

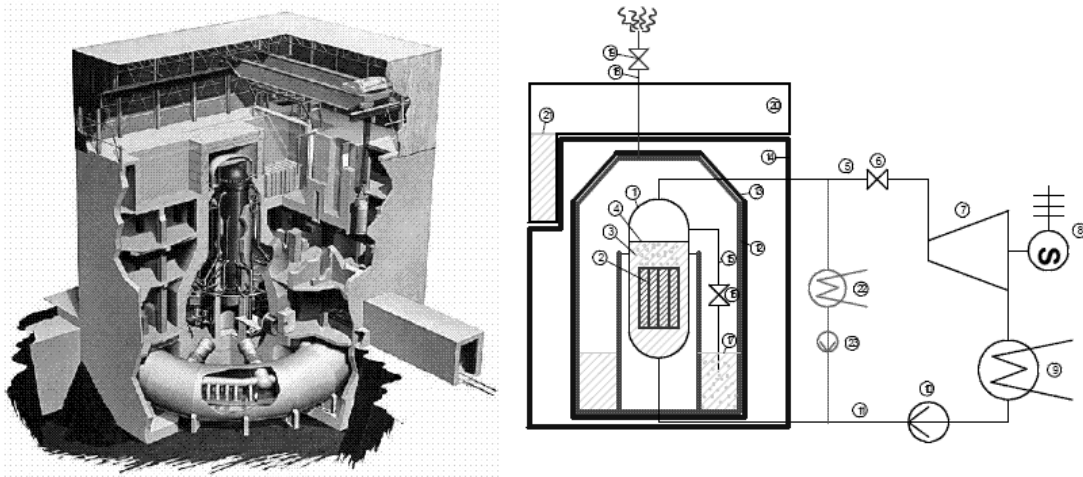
p	$P(M)$ 30-ból legalább 27 működik	p^{30}
0,90	0,64744	0,04239
0,92	0,78421	0,08197
0,94	0,89738	0,15626
0,95	0,93923	0,21464
0,96	0,96941	0,29386
0,98	0,99711	0,54548
0,99	0,99978	0,73970

Az *időbeli tartalékolás*nak is több módszere van [8]. Ezek lényege az, hogy az egyes részfunkciók minimális időigényénél többet hagyunk, hogy a tranzienis jelenségek biztonsággal befejeződhessenek, és a következő funkció folyamata tervezett állapotából indulhasson. Javítható rendszereknél a szükséges tartalékidő biztosítása nyilvánvaló. Van olyan eset is, amikor katasztrofális esemény következményének elhárításához van szükség többletidőre, főleg a gondolkodáshoz, de ehhez a konstrukciót úgy kell kialakítani, hogy a tartalékidőnek a fizikai lehetősége is be legyen építve a szerkezetbe. Példaként a Fukushima Daiichi japán atomerőmű tavaszi földrengés és cunami utáni esetét érdemes megemlíteni, mint aktuális témát. Amikor ezt az atomerőművet tervezték, több mint 40 évvel ezelőtt, akkor a BME Gépészmérnöki Karán, dr. Heller László akadémikus a *Hőenergetika* előadáson ismertette azt az angol javaslatot, amely szerint a reaktor fölé nagytömegű jeget kell tenni, amelynek olvadáshője elodáztatja a zónaolvadást. Ez nagyon drága technika, de indokolt esetben roppant hasznos lehet. Pl. Finnországban a VVER-440-es blokkok⁹ fölé helyeztek jégkocka-tartót, amely a hűtőkör legveszélyesebb meghibásodásakor (ezt kettős harántrepedésnek nevezik) jégesővel árasztja el a gépházat. A kb. 300 C°-os nagynyomású víz kiszabadulásakor keletkező gőzt a jég kondenzálja, és így csökkenti a gépház nyomását. Ha a fukushimai atomerőműbe is tettek volna jégtartályt, akkor a hűtővíz keringetésének kimaradása után több idő maradt volna a szükséges intézkedések megtételéhez. Valószínűleg elkerülhető lett volna a részleges zónaolvadás és a víz pirolízise is, illetve a felszabaduló durranógáz kémiai robbanása. A **3. ábrán** jól látszik, hogy a reaktor fölött volt hely a jégtartály és a hűtőgép részére.

Az időbeli tartalékolásnak két hátránya lehet: csökkenti a pillanatnyi termelékenységet, vagy növeli a létesítési és az üzemeltetési költséget. Szükségességéről ezért nehéz meggyőzni a döntéshozókat.

⁸ A Laval-fúvóka kiáramlási sebessége légüres térben csak az égési hőmérséklettől függ, de a légkörben a kamranyomástól is. A nyíltciklusú rakétahajtómű kamranyomásának négyszerese kb. 14%-kal nagyobb kiáramlási sebességet eredményezett az NK-15 hajtóműnél, de a meghibásodás jellege is megváltozott. (Az új elvből következő előny a továbbfejlesztett, és az USA-ba is exportált RD-180-as rakétahajtóművel ma is hasznosul.)

⁹ Ilyenek vannak a paksi atomerőműben is.

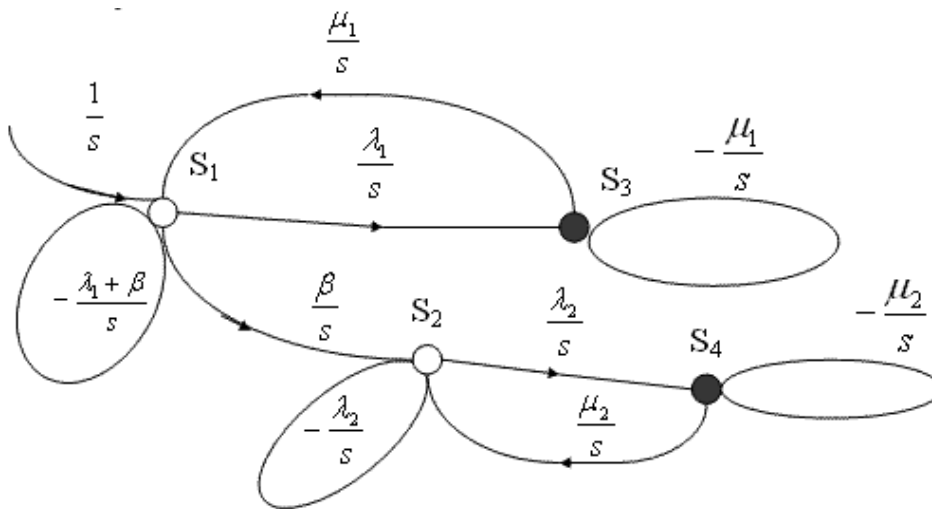


3. ábra

A Fukushima Daiichi forralóvízes atomreaktor sémája [9]

4.1.3. Markov-modellek [14]¹⁰

Példaként egy bejáratandó¹¹, javítható rendszer Markov-modelljét elemezzük. A modell jelfolyam-gráfiával adott (4. ábra).



4. ábra

Markov-folyamat jelfolyam-gráfja

A folyamat az S_1 állapotból indul, amelyben még nincs bejáratva. Innen átkerülhet az S_2 bejáratott állapotba, vagy még be nem járva az S_3 hibaállapotba, ahonnan javítással visszakerülhet S_1 -be. A bejáratott berendezés is meghibásodhat és így átkerül az S_4 hibaállapotba, ahonnan javítással visszakerülhet S_2 -be. Az egyes állapotokban tartózkodás valószínűségét rendre x_i időfüggvénnyel jelölhetjük. Ezek leírására alkalmas differenciálegyenlet-rendszer:

¹⁰ Id. mű, pp. 144-145.

¹¹ Elektronikus berendezések bejáratási folyamatát „égetésnek” (aging) nevezik. Ebben az esetben a Markov-modell csak közelíti az adekvát modellt, amely nem lehet Markov-folyamat, mivel a meghibásodási ráta időben változik (csökken) a bejáratás során.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -(\beta + \lambda_1)x_1 + \mu_1 x_3 \\ \dot{x}_2 = \beta x_1 - \lambda_2 x_2 + \mu_2 x_4 \\ \dot{x}_3 = \lambda_1 x_1 - \mu_1 x_3 \\ \dot{x}_4 = \lambda_2 x_2 - \mu_2 x_4 \end{cases}$$

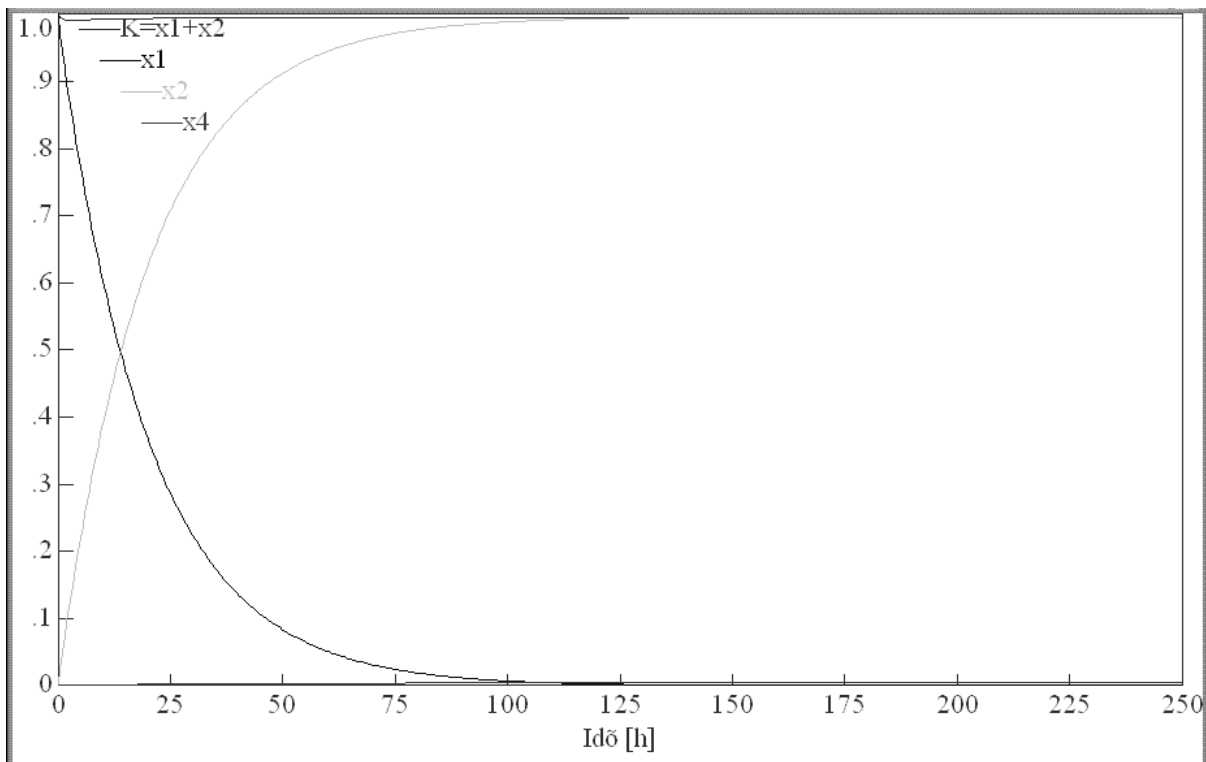
ahol β a bejáratási idő várható értékének reciproka,

λ_1 a bejáratási meghibásodási ráta,

μ_1 a bejáratáskor szükséges javítási idő várható értékének reciproka,

λ_2 a bejáratás utáni meghibásodási ráta,

μ_2 a bejáratott berendezés javításához szükséges idő várható értékének reciproka.



5. ábra

A differenciálegyenlet-rendszer VisSimFAP30 programmal szimulált megoldásának grafikonja

A működő állapotokban tartózkodás valószínűségösszegét *készüléti tényezőfüggvénynek* nevezik. Ha ennek csak az aszimptotikus értéke (jele: K) van szükség, akkor a differenciálegyenlet-rendszer helyett algebrai egyenletrendszert kell megoldani. A lehetséges állapotokban tartózkodás teljes eseményrendszer, ezért a valószínűségek összege mindig 1-gyel egyenlő.

Állandósult állapotban a deriváltak értéke zérus. Az egyik egyenlet helyére téve a fenti egyenlőséget kifejezőt, megszűnik a lineáris függőség, és az inhomogén, lineáris algebrai egyenletrendszernek lesz egyértelmű megoldása:

$$\begin{cases} \beta x_1 - \lambda_2 x_2 + \mu_2 x_4 = 0 \\ \lambda_1 x_1 - \mu_1 x_3 = 0 \\ \lambda_2 x_2 - \mu_2 x_4 = 0 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1 \end{cases}$$

A példánál alkalmazott paraméterek:

$$\beta = \frac{1}{20h}, \quad \lambda_1 = \frac{1}{50h}, \quad \lambda_2 = \frac{1}{1000h}, \quad \mu_1 = \frac{2}{h} \text{ és } \mu_2 = \frac{1}{4h}$$

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x_2(t) \cong 0,996$$

4.2. Megbízhatóság előrejelzése matematikai alakfelismerés (statisztikai osztályozás) segítségével [10], [11]

Tegyük fel, hogy egy berendezéstípus műszaki állapota (kondíciója) egy adott időpontban jellemezhető az $\boldsymbol{\eta} \in \mathfrak{R}_q$ valószínűségi változó vektorral (η_i valamelyik berendezés i -edik állapotjellemzője), amely berendezésenként más és más konkrét \mathbf{y}_j ($j=1, 2, \dots, N$) értéket vehet fel. Az N berendezés minden műszaki állapotvektora a q -dimenziós tér más és más pontjába mutathat.

Az általunk ismert történetű berendezéseket jellemző q -dimenziós vektorokból, vagy pontsorozatokból archívumot hozunk létre. A hasonló berendezéseknek egymáshoz közel fekvő térbeli pontok felelnek meg, és a hasonlóság mértékét távolságként felfogva, minél közelebb esik két q -dimenziós térbeli pont egymáshoz, annál hasonlóbbak a nekik megfelelő berendezések.

Az ismert történetű berendezésekre vonatkozó adatokból álló archívum a következő alakú:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= [\mathbf{y}_1, \delta_1] \\ \mathbf{a}_2 &= [\mathbf{y}_2, \delta_2] \\ &\vdots \\ \mathbf{a}_N &= [\mathbf{y}_N, \delta_N] \end{aligned}$$

ahol \mathbf{a}_j a j -edik berendezést valamely időpontban jellemző adatvektor archívumbeli realizációja, amely az \mathbf{y}_j státuszvektoron kívül tartalmazza a pillanatnyi műszaki állapot δ_j minősítését is.

Az állapotvektorok komponenseit a $t=0, t_1, t_2, \dots, t_M$ időpontokban regisztráljuk. A néhány időpontban ismert $N+1$ -edik berendezés utóéletét kell meghatározni. Ehhez a primer archívumot nem közvetlenül használjuk, mert hatékonyabb a hasonlóság felismerése, ha az alakfelismeréshez használt archívumban már csak a lényegét tükröző adatokat helyezzük el.

A matematikai alakfelismerés fő lépései (vázlatosan) a következők:

1. Mérés

A szükséges műszaki karakterisztikák felvétele, pl. villamos jellemzők mérésével vagy a működési és állásidők regisztrálásával (részrendszerekre és az egész berendezésre).

2. Mintavétel

Meghibásodási kritérium definiálása, a hibák detektálása, megbízhatósági mutatók meghatározása; a rendelkezésre álló adathalmazból primer archívum létrehozása.

3. Lényegkiemelés

Hasonlósági kritériumok definiálása, kritikus részrendszerek kiválasztása (alakzatvektor konstruálása). A lényeges karakterisztikákat (vagy valamilyen célszerű transzformáltjukat) tartalmazó alakzatvektor és egy céltulajdonság (pl. készenléti tényező) kerül az archívumba.

4. Döntés

Osztályba sorolás a döntésfüggvény segítségével. Pl. a leghasonlóbb objektum alapján az ún. legközelebbi társ (NN) módszer segítségével kiválasztjuk az előzőleg elkészített archívumból az alkalmazott metrika szerint a vizsgált objektum alakzatvektorával jellemzett ponthoz legközelebbi lévő objektumot, amelynek hosszabb ideje ismerjük a viselkedését. Részrendszerekre is végrehajthatjuk ezt a kiválasztást és összeállíthatunk a hasonló részegységekből egy fiktív berendezést, amelynek megbízhatósági mutatóit kiszámítva becslést adhatunk a rövidebb ideje működő rendszer utóéletére.

A fizikai jellemzőkre vonatkozó megfigyelések hiányában magát a gyártmányt használhatjuk célszerűen megválasztott funkcionális bontásban oly módon, hogy kritikus részrendszereihez hozzárendeljük megbízhatósági mutatóinak alakulását az idő függvényében. Ezzel az eljárással egyedileg jellemezhető minden olyan objektum, amelyre rendelkezésre áll a főbb alkatrészek szintjéig regisztrált mutatók idősora. Ezek lehetnek kísérleti működtetések eredményei, kiértékelt szervizadatok vagy üzemi hibanaplók adatai.

A BME finommechanikai-optikai tanszékén (a mai MOGI tanszék) az 1970-es és '80-as években DP nyomtatókkal végzett egyedi előrejelzések beválásának hibáját sikerült 15% alá szorítani a lényegkiemelés célszerű alkalmazásával. Ez két lépésből állt:

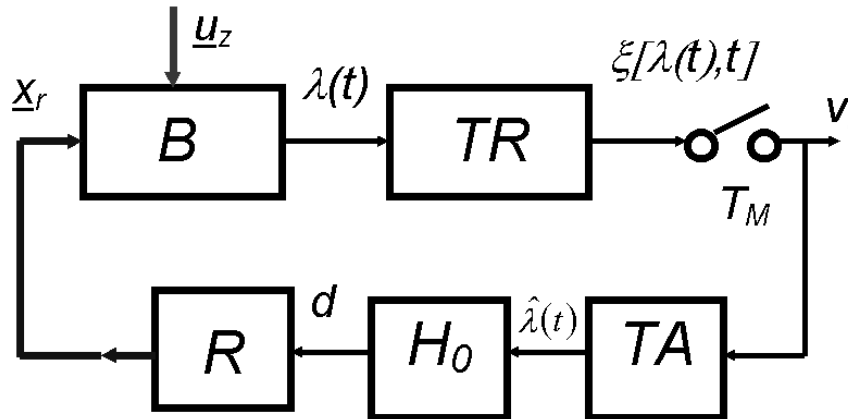
- a. A kritikus részrendszerek kiválasztása előzetes műszaki elemzés alapján történt. Ehhez kikérték a számítógép-perifériák specialistáinak és a szervizelést végző műszerészeknek a véleményét.
- b. Az alakzatvektor komponenseihez úgy választottak megfelelő súlyozó faktort, hogy a tesztanyagon a δ_i minősítések az egymástól kis távolságra lévő berendezéseknél kevésbé térjenek el egymástól.

A másik alkalmazási példát a biztonság szempontjából kritikus repülés területéről vettük. A MALÉV TU-154-es utasszállító repülőgépe BAP6 típusú robotpilótájának hagyományos műszaki diagnosztikai vizsgálatához több mint száz mérést kellett elvégezni. Matematikai alakfelismeréssel (műszaki jellegű lényegkiemeléssel és diszkriminancia-analízissel) a szükséges mérések számát az eredeti tizedére lehetett csökkenteni. [12]

A megoldás egyik sajátossága, hogy az ún. **rizikomátrix** antiszimmetrikus. Ez a matematikai megfogalmazás azt jelenti, hogy súlyosabb a hiba, ha jónak minősítünk egy hibás berendezést, mintha feleslegesen küldjük javításra. A **másodfajú hiba** a repülés biztonságát veszélyeztetné, az **elsőfajú** pedig csak a fenntartási költségeket növelné. A felesleges javítás ún. **bolygató hatása** is hibaokozó, éppen ezért ezt a hibafajtát a biztonság érdekében is csökkenteni kell.

A fenti példák olyan esetre vonatkoztak, amikor sok ipari gyártmányról áll rendelkezésünkre adat. Ilyenkor a „más kárán tanul az okos” elvet követik. Előfordul, hogy az ipari rendszer egyedi, legfeljebb 2-3 van belőle a világon. Ilyenkor saját élettörténetének szakaszolásával készítik az archívumot, vagyis a „saját kárán tanul a buta” elvet követik. A Csepel Művek Hőerőmű és Szolgáltató Közös Vállalat egyes gépipari nagyberendezéseinek állapotfüggő karbantartását a megbízhatósági szint szerint végezte. A Csepel Művek néhány gépipari nagyberendezése esetén a rendszer-megbízhatóság előzetes számítások és model-

lek alapján történő meghatározása nem volt célszerű, mert a berendezések egyedisége és bonyolultsága miatt a vizsgálatok költsége és a kapott eredmények használhatósága nem állt arányban. A folyamatos ellenőrzést és előrejelzést üzemi körülmények között végzett megbízhatósági vizsgálatok tették lehetővé. A megbízhatósági jellemző a hibamentesség volt, amelyet egyik mutatója, a meghibásodási ráta tapasztalati értékei alapján szabályoztak, mégpedig a tendencia statisztikai előrejelzése alapján.



6. ábra

Megbízhatóság-szabályozási folyamat hatásvázlata [13]

A gyártási folyamatot irányító B berendezésnek két bemenete van: karbantartás (ez szándékos) és különféle zavarások (ez spontán keletkezik). Ezek hatására a berendezés valamilyen használhatósági tulajdonságra tesz szert, amelyet a $\lambda(t)$ hibamentességi mutatóval jellemeztek. A TR technológiai alrendszer kimenete egy *sztochasztikus folyamat*, amelynek realizációját T_M mintavételi periódusidőnként megmérték. Ennek számítógépes feldolgozását egy TA tanuló algoritmus végezte el¹², amely becslést adott a hibamentességi mutatóra, különösen annak tendenciájára vonatkozóan. Ennek alapján a H_0 hipotézisvizsgáló modul előállította a d értékű döntést, amely az R karbantartó modul bemenőjele volt. Az R adatbázisból önműködően kikeresték az adott helyzetben tanácsolható legjobb megoldást, vagyis azt, hogy *ki, mit, mikor, hol, mivel, hogyan és mennyiért* tegyen meg.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a cikk áttekintette az ipari gyártmányok megbízhatóságának néhány klasszikus módszerét, és kitért a mesterséges intelligencia eredményeit alkalmazó, egyedi előrejelzést megkísérlőkre is. Az ismertetett technikák alkalmasak a termékek élettartamának növelésére, de csökkentésére is, ha azt üzleti szempontból szükségesnek tartják a vállalkozók.

A bemutatott példák között vannak magyar kutatási eredményekre támaszkodók is. E példák különösen alkalmasnak bizonyultak a Gábor Dénes Főiskolán a megbízhatóság-elmélet gyakorlati hasznosságának kidomborítására a szakmérnöki és az alapképzés során.

IRODALOM

- [1] R. L. DISNEY, C. LIPSON and N. J. SHETH: *The determination of the Probability of Failure by Stress/Strength Interference Theory*. IEEE Symposium on Reliability, Jan. 1968. in: DR. PETRIK OLIVÉR: *Berendezések megbízhatóságra tervezésének néhány kérdése*, Finommechanika-Mikrotechnika, 28. évf. 1989. március, pp. 65-72
- [2] J. DAVIDSON: *The reliability of mechanical systems*, ImechE Guides for the Process Industries, Mechanical Engineering Publications Limited for Institution of Mechanical Engineers London, 1968 in: DR. GAÁL ZOLTÁN, DR. KOVÁCS ZOLTÁN: *Megbízhatóság, karbantartás*, 1994. Veszprémi Egyetem, Kiadói Iroda p. 342

¹² Az idősor-analízis különféle módszereit alkotó módon továbbfejlesztve alkalmazták.

- [3] GÁBOR SZÁSZ: *Application of Taguchi-quality assurance method in case of mechanical structures, on the basis of SSI model*, INFORMATIKA, vol. XII. No. 2. July 2010 pp. 20-21
- [4] NAGY LÁSZLÓ: *Az árvízi biztonság fejlődése*, Hidrológiai Közlöny, 80. évf. 2. szám, 2000. pp. 114-115
- [5] DR. BENEDIKT SZVETLÁNA, DR. KUN ISTVÁN, DR. SZÁSZ GÁBOR: *SSI modellel analóg kockázatelemzés*, INFORMATIKA, IX. évf. 2. szám. 2007. május, pp. 33-36.
- [6] WALD, ABRAHAM: *Sequential Analysis*, Wiley, New York, 1947.
- [7] SEDYAKIN, N. M. (1966). *On one physical principle in reliability theory*, Technical Cybernetics, 3, pp. 80-87.
- [8] KOCSIS J., FETYISZOV V.: *Az automatizált rendszerek működési megbízhatósága növelésének egyik módszeréről* (oroszul) Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Bp., No. 3. 1984.
- [9] RÓNAKY JÓZSEF, LUX IVÁN: *Tájékoztató a Fukushima Daiichi japán atomerőmű földrengés utáni baleseti helyzetéről*, OGY Fenntartható fejlődés bizottság, 2011.03.17. (Készült az Országos Atomenergia Hivatalban) Prezentáció: japan_lux.pdf További információ: www.oah.hu
- [10] Gy. BARTA, G. SZÁSZ and Gy. SZÖLLŐSSY: *Reliability of integrated material and data processing systems (IMDP)* Periodica Polytechnica (Mechatronic) Vol. 31. Nos 2-3. 1987 pp. 235-240.
- [11] GYÖRGY BARTA, ISTVÁN KUN and GÁBOR SZÁSZ: *A Reliability Control Model Using Pattern Recognition*, EQC Journal and Newsletter for Quality and Reliability Vol. 7. No. 4. pp. 233-261 (1992)
- [12] Tóth Erika (1989) *Repülőgép vezérlő berendezés diagnosztikája matematikai alakfelismerő módszer alkalmazásával* Szakmérnöki dolgozat (BME Gépészmérnöki Kar) Budapest
- [13] SCHÖNFELD TIBOR (1985) *Gépipari nagyberendezések néhány megbízhatóság-szabályozási kérdése* Egyetemi doktori értekezés (BME Gépészmérnöki Kar) Budapest
- [14] DR. SZÁSZ GÁBOR, DR. KUN ISTVÁN, DR. ZSIGMOND GYULA: *Minőség és megbízhatóság*, II. kötet, LSI Oktatóközpont, Bp., 2002. p. 150

INTERNETES IRODALOM:

- [i1] <http://www.centennialbulb.org/cam.htm> Letöltve: 2011. VIII. 20. 6:50
- [i2] *A Villanykörte Összeesküvés – A Tervezett Elavulás története*
<http://www.youtube.com/watch?v=UmatL75dO3c> Letöltve: 2011. VIII. 20. 6:58