

A szerkesztő bizottság elnöke: HORVÁTH IMRE

Szerkesztő: ANGYAL LÁSZLÓ

SZERKESZTŐ BIZOTTSÁG

BHG

Laczkó Endre
Bernhardt Richárd
Dr. Eisler Péter
Dr. Gosztony Géza
Honli Ottó
Klug Miklós
Tölgyesi László

ORION

Jakubik Béla
Csernoch János
Froemel Károly
Sass Károly
Szabó Károly
Szász Gerő

TEHTA

Bánsági Pál
Baján Tibor
Benedek Elek
Halmi Gábor
Hutter Mihály

BHG ORION TERTA MŰSZAKI KÖZLEMÉNYEK

XXVIII. évfolyam

1982

1. szám

A megbízhatóság és karbantarthatóság egyensúlyi feltételei működő nagyberendezésekben

KESSELYÁK PÉTER
BHG

1. A funkcionális hatáskeresztmetszet és hatások fogalma

A számítástechnika, távbeszélő technika és más hasonló alkalmazási területek nagyberendezéseire általában jellemző a beléjük épített jelentős mértékű áramköri redundancia, vagyis annak az elvnek az érvényesítése, hogy egy adott funkciót szükség esetén több, egymással egyenértékű áramkör képes legyen végrehajtani és így egy adott áramkör foglaltsága vagy meghibásodása ne járjon együtt a megkívánt funkció teljesíthetlenségével.

Azokat a rendszereket, amelyekben minden áramkör nélkülözhetetlen láncszemet képez egy adott funkció végrehajtása szempontjából, soros megbízhatóságú rendszereknek nevezzük. A telefontechnika nagyberendezései — a vezérlő egységet és bizonyos részeket leszámítva — általában nem soros megbízhatóságú áramköri rendszerekből, hanem belső tartalékokkal rendelkező úgynevezett *r e d u n d á n s* áramköri rendszerekből épülnek fel és ez együtt jár azzal, hogy egy adott áramkör meghibásodása még nem okoz üzemkiesést. Következésképpen a hiba jelenléte — az üzemeltetés szemüvegén keresztül nézve — közvetlenül nem ismerhető fel. A hiba jelenlétére a funkciók elvégzési sebességének lassulásából, az elvégzendő feladatok torlódásából lehet következtetni annak függvényében, hogy az adott áramkör kiesése milyen mértékben szűkítette le az adott funkció ellátására szolgáló alternatív lehetőségek körét, vagyis milyen mértékben csökkentette a berendezés funkcionális hatáskeresztmetszetét.

Másfelől a nagyberendezések működőképességét általában abból mérik le, hogy a bemeneteken jelentkező funkcionális igényeket milyen hatásokkal dolgozzák fel a megkívánt kimeneti jelekké. Ez a funkcionális hatások szoros összefüggésben van egyrészt a bemeneteken jelentkező funkcionális igények mennyiségével és minőségével, másrészt az igények kielégítéséhez rendelkezésre álló funkcionális hatáskeresztmetszet nagyságával. A to-

vábbiakban a bemeneten jelentkező igények A mennyiségét és összetételét hallgatólagosan tekintjük állandónak.

2. Redundáns áramköri rendszerek hibaérzékenysége

Vizsgáljuk meg a most bevezetett két új fogalom, a funkcionális hatáskeresztmetszet és a funkcionális hatások egymáshoz való viszonyát.

A redundáns rendszerek egyik általános és alapvető sajátossága az, hogy funkcionális hatásokuk a hatáskeresztmetszet szűkülésével eleinte csak alig érzékelhetően csökken, majd egyre rohamosabban kezd csökkenni — ún. letörési karakterisztika jellegűt mutat. Pl. egy 10 párhuzamos csatornából álló teljes elérhetőségű rendszerben 1, 2 vagy 3 csatorna kiesése — a névlegesnél jelentősen alacsonyabb forgalom mellett — a hatásokot még alig befolyásolja, de ha 4–5 vagy annál több csatorna esik ki, akkor a hatások rohamosan csökkenni kezd. Vagyis a hatások eleinte érzéketlen a hibák keletkezésére.

Következésképpen a funkcionális hatások küszöbértékének figyelésére alapozott működőképesség-ellenőrzési és riasztási stratégia — ami pedig jelenleg a nagyberendezések üzemeltetésére elterjedten jellemző — csak *k é s l e l t e t v e* nyújt felvilágosítást a rendszer hatáskeresztmetszetének csökkenéséről, olyankor, amikor ez a hatáskeresztmetszet már jelentősen leszűkül.

Így mindazok a hibák, amelyek még nem vezetnek a funkcionális hatások riasztási küszöbértékig való leromlására, *f e l h a l m o z ó d h a t n a k* a rendszerben. Amikor a hibák felhalmozódása következtében a riasztás bekövetkezik, az üzemeltető hiba-diagnosztikai eljárásokat foganatosít, amelyektől joggal azt várjuk, hogy a rendszerben az addig felhalmozódott hibákat maradéktalanul tárják fel. A valóság azonban az, hogy a diagnosztikai eljárások *η* hiba-feltárási hatásoka — részben műszaki,

részben emberi tényezők miatt — csak ideális esetben száz százalékos. Általában mindig számolni kell azzal, hogy a karbantartói beavatkozás után is maradnak benn hibák a rendszerben, sőt új hibákat is okozhat a karbantartói beavatkozás.

A redundáns rendszereknek jellemző sajátossága az, hogy a bennük keletkező (hardware-) hibák huzamosan benne élhetnek a rendszerben anélkül, hogy az üzemeltető konkrét tudomást szerezne róluk. Különösen nagy mértékű hibafelhalmozódás állhat elő hanyag, laza karbantartás esetén, amikor a funkcionális határfokot a megengedett riasztási küszöbérték alá engedik romlani. A kampány-szerű hibaelhárítások, a gyártónak címzett jogtalan reklamációk rendszerint ilyen esetekre vezethetők vissza.

3. Hibafelhalmozódási modell

A redundáns rendszerek áramköreit legegyszerűbb esetben 3 állapotú Markov-moddellel lehet leírni.

- Az áramkörök — vagy hibátlanok (0 állapot);
 — vagy feltáratlan hibás állapotban vannak (1 állapot);
 — vagy feltárt hibás állapotban vannak (2 állapot).

A $0 \rightarrow 1$ átmenetet a λ meghibásodási ráta, az $1 \rightarrow 2$ átmenetet a λ' hibafelderítési ráta és a $2 \rightarrow 0$ átmenetet a μ hibaelhárítási ráta jellemzi. Mindhárom rátát időben állandónak tekintjük.

Ebben a $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 0$ állapotok közti ciklikus folyamatban a meghibásodás, vagyis a $0 \rightarrow 1$ átmenet rejtett esemény, hiszen a hibáról csak a feltáráskor, vagyis az $1 \rightarrow 2$ átmenetkor veszünk tudomást. Éppen ezért a λ' hibafelderítési rátát a tiszta átlagos meghibásodási rátának is nevezhetjük.

A megfelelő állapot-valószínűségeket jelölje $P_0(t)$, $P_1(t)$ és $P_2(t)$. A redundáns konfigurációban résztvevő (legegyszerűbb esetben párhuzamosan kapcsolt) azonos funkciót végző áramkörök darabszáma legyen N .

Mivel a rendszer valamelyik állapotában mindig megtalálható, azért általánosan igaz, hogy

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) \equiv 1. \quad (1)$$

A Markov-modellben szereplő fontosabb mennyiségek gyakorlati értelmezését az alábbiakban adjuk meg.

3.1. A 0 állapotra vonatkozóan:

(0.1) $P_0(t)$: Annak valószínűsége, hogy egy tetszőleges áramkör a t időpontban hibátlan állapotban van (állapot valószínűség). Leggyakoribb kezdőfeltétel: a $t=0$ időpontban $P_0(0)=1$ (Megbízhatósági-elméleti szempontból $P_0(t)$ jelenti a megbízhatósági függvényt és egyúttal a redundáns, párhuzamos kapcsolású rendszer relatív funkcionális hatás keresztmetszetét).

(0.2) λ : 1 áramkör hibátlan állapotban való átlagos tartózkodási idejének reciproka,

azaz egységnyi idő alatt való meghibásodásának valószínűsége, feltéve, hogy az áramkör éppen hibátlan állapotban van. (λ a Markov-modell szempontjából a $0 \rightarrow 1$ állapotok közti ún. átmeneti valószínűség, megbízhatóságelméleti szempontból pedig pillanatnyi meghibásodási ráta, amelynek értéke itt időben állandó).

(0.3) $\lambda \cdot P_0(t)$: Annak valószínűsége, hogy egy tetszőleges áramkör a t időpontot követő egységnyi idő alatt meghibásodik (megbízhatósági-elméleti szempontból a meghibásodás sűrűségfüggvénye).

(0.4) $N \cdot P_0(t)$: A t időpontban hibátlan áramkörök várható darabszáma.

(0.5) $\lambda N \cdot P_0(t)$: A t időpontot követő egységnyi idő alatt meghibásodó áramkörök várható darabszáma (pillanatnyi eseménysűrűség).

$$(0.6) r_0(\theta, t) = \lambda N \int_0^t P_0(x) \cdot dx:$$

A (θ, t) időszakaszban összesen meghibásodó áramkörök várható darabszáma. ($\theta \rightarrow 1$ átmenetek száma).

$$(0.7) \Delta_0(\theta, t) = \frac{r_0(\theta, t)}{Nt} = \lambda \frac{1}{t} \int_0^t P_0(x) \cdot dx:$$

A (θ, t) időszakaszban időegységenként 1 tetszőleges áramkör átlagos meghibásodási valószínűsége (átlagos sűrűségfüggvény — nem szabatos, de elterjedt szóhasználat: átlagos meghibásodási ráta).

3.2. Az 1 . állapotra vonatkozóan:

(1.1) $P_1(t)$: Annak valószínűsége, hogy egy tetszőleges áramkör a t időpontban feltáratlan hibaállapotban van (állapot-valószínűség). Leggyakoribb kezdőfeltétel: a $t=0$ időpontban $P_1(0)=0$.

(1.2) λ' : 1 áramkör feltáratlan hibaállapotban való átlagos tartózkodási idejének reciproka, azaz a hiba egységnyi idő alatti felfedezésének valószínűsége, feltéve, hogy az áramkör feltáratlan hibaállapotban van. (λ' a Markov-modell szempontjából az $1 \rightarrow 2$ állapotok közti átmeneti valószínűség, megbízhatóság-elméleti szempontból pedig pillanatnyi hibafelderítési ráta, amelynek értéke itt időben állandó.)

(1.3) $\lambda' \cdot P_1(t)$: Annak valószínűsége, hogy egy áramkör a t időpontot követő egységnyi idő alatt az 1. állapotból a 2. állapotba megy át, vagyis meghibásodását felfedezik (a hibafelfedezés sűrűségfüggvénye).

(1.4) $N \cdot P_1(t)$: A t időpontban feltáratlan hibaállapotban lévő áramkörök várható darabszáma.

(1.5) $\lambda' \cdot N \cdot P_1(t)$: A t időpontot követő egységnyi idő alatt felfedezett hibás áramkörök várható darabszáma (pillanatnyi esemény-sűrűség).

$$(1.6) r_1(0, t) = \lambda' N \int_0^t P_1(x) \cdot dx:$$

A $(0, t)$ időszakban összesen felfedezett hibás áramkörök várható darabszáma (az $1 \rightarrow 2$ átmenetek száma).

$$(1.7) A_1(0, t) = \frac{r_1(0, t)}{N \cdot t} = \lambda' \frac{1}{t} \int_0^t P_1(x) dx:$$

A $(0, t)$ időszakban 1 tetszőleges áramkör hibájának időegységenként átlagosan várható felfedezési valószínűsége (átlagos sűrűségfüggvény — nem szabatos szóhasználat: átlagos hibafelfedezési ráta, illetve esetünkben: látszólagos meghibásodási ráta).

3.3. A 2. állapotra vonatkozóan:

(2.1) $P_2(t)$: Annak valószínűsége, hogy egy tetszőleges áramkör a t időpontban felfedezett hibaállapotban van (de a hibát még nem javították ki). Kezdfeltétel: a $t=0$ időpontban $P_2(0)=0$.

(2.2) μ : 1 áramkör felfedezett hibaállapotban való átlagos tartózkodási idejének reciproka, azaz a hiba egységnyi idő alatti elhárításának valószínűsége, feltéve, hogy az áramkör felfedezett hibaállapotban van. (μ a Markov-modell szempontjából a $2 \rightarrow 0$ állapotok közti átmeneti valószínűség, megbízhatóságelméleti szempontból pedig pillanatnyi hibaelhárítási [felújítási] ráta, amelynek értéke időben itt állandó.)

(2.3) $\mu \cdot P_2(t)$: A t időpontot követő egységnyi idő alatt a 2. állapotból a 0. állapotba történő átmenet valószínűsége, vagyis, hogy az áramkört megjavítják. (Hibaelhárítás sűrűségfüggvénye).

(2.4) $N \cdot P_2(t)$: A t időpontban felismerten hibás, de még ki nem javított (le nem cserélt) áramkörök várható darabszáma.

(2.5) $\mu \cdot N \cdot P_2(t)$: A t időpontot követő egységnyi idő alatt megjavított (lecserélt) áramkörök várható darabszáma (pillanatnyi esemény-sűrűség).

$$(2.6) r_2(0, t) = \mu N \int_0^t P_2(x) dx:$$

A $(0, t)$ időszakban összesen elhárított hibák várható darabszáma (a $2 \rightarrow 0$ átmenetek száma).

$$(2.7) A_2(0, t) = \frac{r_2(0, t)}{Nt} = \mu \frac{1}{t} \int_0^t P_2(x) dx:$$

A $(0, t)$ időszakban 1 tetszőleges áramkör hibájának időegységenként átlagosan várható elhárítási valószínűsége. (Átlagos sűrűségfüggvény — nem szabatos szóhasználat: átlagos felújítási ráta).

A modellben szereplő fontosabb mennyiségek gyakorlati értelmezése után most tekintsük magát a modellt. A Markov-folyamatra az alábbi egyenletrendszer állítható föl:

$$\frac{d}{dt} P_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_2(t) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} P_1(t) = \lambda P_0(t) - \lambda' P_1(t) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} P_2(t) = \lambda' P_1(t) - \mu P_2(t) \quad (4)$$

Az egyenletrendszer $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ -re történő megoldásának célja az, hogy a λ , λ' és μ paraméterek függvényében áttekintést nyerjünk a rejtett hibák rendszerben való felhalmozódásának folyamatáról és arról, hogy a rendszer üzemi megfigyelése során gyakorlati úton meghatározható $A_1(0, t)$ látszólagos meghibásodási ráta (lásd az (1.7) mennyiséget) hogyan takarja el a valóságos, de rejtett meghibásodási viszonyokat jellemző — és éppen ezért ismeretlen — $A_0(0, t)$ meghibásodási rátát (lásd a (0.7) mennyiséget).

Az egyenletrendszer Laplace-transzformáltja a P_0 , P_1 , P_2 -re adott kezdeti feltételek figyelembe vételével:

$$sP_0(s) - I = -\lambda P_0(s) + \mu P_2(s) \quad (5)$$

$$sP_1(s) = \lambda P_0(s) - \lambda' P_1(s) \quad (6)$$

$$sP_2(s) = \lambda' P_1(s) - \mu P_2(s) \quad (7)$$

Kifejezve $P_1(s)$ értékét:

$$P_1(s) = \frac{I}{s} \lambda \frac{s + \mu}{s^2 + [\lambda + \lambda' + \mu]s + [\lambda\lambda' + \lambda\mu + \lambda'\mu]} \quad (8)$$

A (8) összefüggés nevezőjében szereplő másodfokú karakterisztikus polinom — bizonyíthatóan pozitív valós — gyökei α , β -val jelölve és a Laplace-transzformáció inverzét végrehajtva a megoldás a következő:

A rendszerben felhalmozódó rejtetten hibás áramkörök előfordulási valószínűsége:

$$P_1(t) = \frac{\lambda\mu}{\alpha\beta} + \frac{\lambda}{\alpha - \beta} \left[\frac{\mu - I}{\alpha} - I \right] e^{-\alpha t} - \frac{\lambda}{\alpha - \beta} \left[\frac{\mu - I}{\beta} - I \right] e^{-\beta t}. \quad (9)$$

Hasonlóan a látszólagos halmozott meghibásodási ráta:

$$A_1(0, t) = \frac{\lambda\lambda'\mu}{\alpha\beta} + \frac{\lambda\lambda'}{\alpha[\alpha - \beta]} \left[\frac{\mu - I}{\alpha} - I \right] [I - e^{-\alpha t}] \frac{1}{t} - \frac{\lambda\lambda'}{\beta[\alpha - \beta]} \left[\frac{\mu - I}{\beta} - I \right] [I - e^{-\beta t}] \frac{1}{t} \quad (10)$$

$P_1(t)$ (9) alatti kifejezésében a második és harmadik tag az idő múlásával nullához tart, ily módon

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) = \frac{\lambda \mu}{\alpha \beta} = \frac{\lambda \mu}{\lambda' \lambda + \lambda' \mu + \lambda \mu}. \quad (11)$$

Vagyis a rendszerben felhalmozódó rejtetten hibás áramkörök előfordulási valószínűsége — üzembebevezetéskor hibátlan áramkörök esetén θ -ról indulva — aszimptotikusan a (11) összefüggés szerinti határértékhez tart.

Hasonló igaz a látszólagos halmozott meghibásodási rátára vonatkozóan is:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A_1(\theta, t) = \frac{\lambda \lambda' \alpha}{\alpha \beta}. \quad (12)$$

Az (5)–(7) egyenletrendszerből meghatározható a hibamentes állapot $P_0(t)$ valószínűsége és a valódi halmozott $A_0(\theta, t)$ meghibásodási ráta is:

$$P_0(t) = \frac{\lambda' \mu}{\alpha \beta} + \frac{1}{\alpha - \beta} \left\{ \alpha - \mu + \lambda' \left[\frac{\mu}{\alpha} - I \right] \right\} e^{-\alpha t} - \frac{1}{\alpha - \beta} \left\{ \beta - \mu + \lambda' \left[\frac{\mu}{\beta} - I \right] \right\} e^{-\beta t} \quad (13)$$

$$A_0(\theta, t) = \frac{\lambda \lambda' \mu}{\alpha \beta} + \frac{\lambda}{\alpha [\alpha - \beta]} \left\{ \alpha - \mu + \lambda' \left[\frac{\mu}{\alpha} - I \right] \right\} \cdot [1 - e^{-\alpha t}] \frac{1}{t} - \frac{\lambda}{\beta [\alpha - \beta]} \left\{ \beta - \mu + \lambda' \left[\frac{\mu}{\beta} - I \right] \right\} [1 - e^{-\beta t}] \frac{1}{t}. \quad (14)$$

$P_0(t)$ (13) szerinti kifejezésében is igaz az, hogy a második és harmadik tag az idő múlásával nullához tart, vagyis

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\lambda' \mu}{\alpha \beta} = \frac{\lambda' \mu}{\lambda' \lambda + \lambda' \mu + \lambda \mu}. \quad (15)$$

Hosszú távon vizsgálva a rejtett hibás és a hibátlan áramkörök aránya a (11) és (15) összefüggések figyelembe vételével a

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{P_1(t)}{P_0(t)} = \frac{\lambda \mu / \alpha \beta}{\lambda' \mu / \alpha \beta} = \frac{\lambda}{\lambda'} \quad (16)$$

arányhoz fog tartani.

Ez azt jelenti, hogy ha a karbantartás hatékony, vagyis a hibák feltárásának λ' intenzitása jóval nagyobb a hibák keletkezésének λ intenzitásánál, akkor a $\lim_{t \rightarrow \infty} P_1[t]$ hibafelhalmozódási valószínűség

elhanyagolhatóan kicsiny marad a $\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t)$ hibátlan állapothoz tartozó valószínűséghez képest. Ellenkező esetben viszont a hibafelhalmozódás és vele együtt a rendszer funkcionális hatás keresztmetszetének csökkenése igen jelentős lehet. Ha a $P_0(t)$ hatás keresztmetszet csökkenése ebben a folyamatban a rendszer funkcionális hatásfokát kritikus értékig csökkenti, akkor rendszerint kampányszerű hibafelderítés és hiba elhárítás következik, melynek során a $P_1(t)$ rejtett hibavalószínűséget nullához közeli értékre redukálják, vagyis a rendszert kiindulási állapotához közeli állapotba térítik vissza és a hiba-

felhalmozódás kezdődhet előlről. Ha a $P_0(t)$ relatív hatás keresztmetszet csökkenése nem vezet a funkcionális hatásfok kritikus szintjének eléréséhez, akkor a rejtett hibák a rendszerben bennmaradhatnak és valószínűségük elérheti a (11) összefüggés által megadott határértéket.

A megbízhatósági viszonyok elemzésekor nem hagyhatjuk figyelmen kívül a P_0 , P_1 , P_2 állapot valószínűségek belső összefüggését sem, amely szerint bármely t időpontban igaz a

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) \equiv 1 \quad (17)$$

azonosság.

Mivel a feltárt hibákat a hibamentes üzemi időnél általában nagyságrenddel rövidebb idő alatt elhárítják, azért az áramkörök 2. állapotban való tartózkodásának valószínűsége, $P_2(t)$ is nagyságrenddel kisebb $P_0(t)$ -nél (és $P_1(t)$ -nél), következésképpen a (17) összefüggésben elhanyagolható, így

$$P_0(t) + P_1(t) \approx 1. \quad (18)$$

Másrészt, ha t elég nagy, akkor (16) szerint

$$P_1(t) \approx \frac{\lambda}{\lambda'} P_0(t) \quad (19)$$

amit (18)-ba helyettesítve azt kapjuk, hogy

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) \approx \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'}}. \quad (20)$$

Vagyis a $P_0(t)$ relatív funkcionális hatás keresztmetszet az üzemi idő előrehaladtával csak a hibakeletkezés és felfedezés intenzitásának arányától fog függni.

4. A megbízhatóság és karbantarthatóság egyensúlyi feltételei

Jelöljük a rendszer mérhető funkcionális hatásfokát (a telefontechnikában pl. a sikeres hívások részarányát) az $f(x, A)$ függvénnyel, ahol az x argumentum a rendszer relatív funkcionális hatás keresztmetszetét jelenti, $x = P_0(t)$, A pedig a rendszer bemenetén jelentkező funkcionális terhelést (a távbeszélő technikában pl. a forgalmat) reprezentálja. Ez utóbbit tekintsük most rögzített paraméternek.

Legyen az f funkcionális hatásfok megengedett kritikus szintje

$$f_{\text{krit}} = f(P_{0\text{krit}}, A) \quad (21)$$

ahol $P_{0\text{krit}}$ a kritikus funkcionális hatásfokhoz tartozó funkcionális hatás keresztmetszetet jelenti.

A rendszer megbízhatósága és karbantarthatósága akkor lesz egyensúlyban, ha az f funkcionális hatásfok nem süllyedhet az f_{krit} érték alá. Ehhez pedig szükséges, hogy (20) alapján

$$P_{0\text{krit}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\lambda'}} \text{ legyen} \quad (22)$$

amiből a hibafeltárás λ' intenzitására vonatkozóan az alábbi követelmény adódik:

$$\lambda' \approx \frac{P_{0krit}}{1 - P_{0krit}} \cdot \lambda \quad (23)$$

A karbantartás hatékonyságának tehát olyannak kell lennie, hogy a (23) követelményt teljesítse.

Legyen egy adott redundáns áramköri rendszerben $P_{0krit} = 0,8 = 80\%$ (=20% hatás keresztmetszet csökkenés). Legyen továbbá a rendszer áramköreinek meghibásodási intenzitása $\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ hiba·óra⁻¹. Akkor (23) szerint a hibafeltárás intenzitása

$$\lambda' \approx \frac{0,8}{0,2} \cdot 10^{-5} \text{ hiba} \cdot \text{óra}^{-1} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ hiba} \cdot \text{óra}^{-1}$$

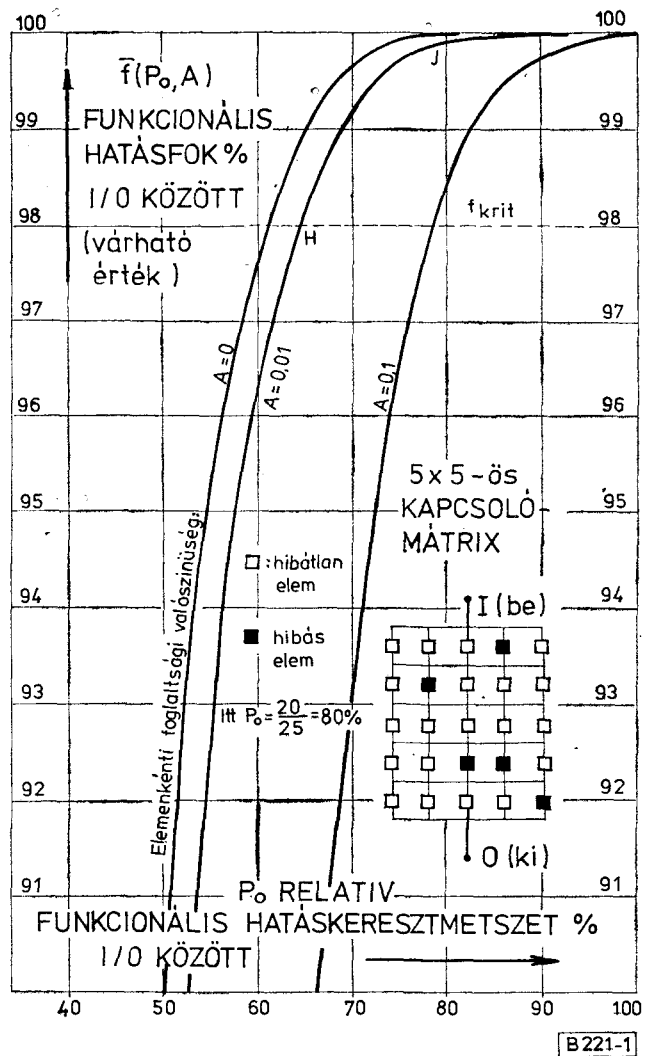
kell hogy legyen, vagyis a meghibásodott áramkörök felfedezetlenül legfeljebb átlagosan $T_1 = 1/\lambda' = 25\,000$ óra ideig maradhatnak a rendszerben. Ez közel 3 évet jelent.

A rejtett hibák élettartama a redundáns rendszerekben általában év nagyságrendű lehet, ami első pillanatra túl hosszú időnek tűnhet. A hibák azonban sokfélék lehetnek és nincs mindenfajta hiba felderítésére megfelelően hatékony diagnosztikai eljárás; ha van eljárás, alkalmazását nem mindig írják elő kötelezően a karbantartási utasítások olyan esetekben, amikor arra szükség lenne; végül sok esetben a karbantartó személyzet elhanyagolja az előírt vizsgálatok elvégzését. Így azután előfordulhat, hogy a bajra csak a funkcionális hatásfok kritikus szint alá csökkenése hívja fel a figyelmet riasztás vagy panasz formájában.

5. Gyakorlati példa

Tekintsünk egy 5×5-ös kapcsolómátrixot az 1. ábra szerint. A mátrix tulajdonképpen felfogható 5 db egymást követő, 5 bemenetű és 5 kimenetű, teljes elérhetőségű kapcsolófokozat egyszerűsített modelljének, amelyen keresztül egy tetszőleges időpontban, tetszőlegesen kiválasztott szabad BE bemenetről kiindulva kapcsolási utat akarunk felépíteni egy tetszőlegesen kiválasztott szabad KI kimenet felé és a felépítés sikerességének a valószínűségét vizsgáljuk, miközben a mátrix minden egyes kapcsoló eleme A valószínűséggel foglalt lehet más kapcsoló utak számára, bizonyos elemei pedig hibásak lehetnek, leszűkítve a mátrix hatás keresztmetszetét. Hibamentes állapotban egyidejűleg 5 párhuzamos kapcsolat építhető fel. A modell szerint az 5 fokozat mindegyikében a kapcsolni kívánt mátrixelem kijelölése véletlenszerű. Ha tehát az 5 fokozat bármelyikében a kapcsolási út felépítése hibás vagy foglalt mátrixelemet érint, akkor a kapcsolás sikertelen minősül.

Erre a modellre, mint redundáns áramköri rendszerre vonatkozóan az 1. sz. ábra a kiválasztott BE és KI pontok közötti szabad út valószínűségét mutatja, mint $f(P_0, A)$ funkcionális hatásfokot az áramköri konfiguráció P_0 hatás keresztmetszetének függvé-



1. ábra. 5 db egymást követő 5 bemenetű és 5 kimenetű, teljes elérhetőségű kapcsolófokozat egyszerűsített modelljének funkcionális hatásfoka a hatás keresztmetszet függvényében

nyében, különböző A áramköri foglaltság értékek, mint paraméter mellett.

A mátrix P_0 relatív hatás keresztmetszetén értjük itt a mátrixelemek funkcióképes állapotának valószínűségét, vagy másként fogalmazva a mátrix funkcióképes elemeinek darabszámát az összes elemek darabszámához viszonyítva. Ez a definíció párhuzamosan kapcsolt áramkörökből álló egyszerű rendszer esetében kézenfekvő, ha azonban a redundáns áramkörök bonyolultabb konfigurációt alkotnak — mint a példaként felhozott 5×5-ös mátrixban is — akkor a funkcionális hatásfok számításakor figyelembe kell venni az áramköröknek a rendszerben elfoglalt helyét is, valamint a funkció végrehajtásával kapcsolatos elérhetőségi és prioritási szabályokat.

Az 1. sz. ábrán bemutatott, 25 elem alkotta redundáns mátrixban pl. a hatásfok szempontjából nem mindegy, hogy melyik 5 áramkör hibásodik meg, amikor a rendszer hatás keresztmetszete éppen

$$P_0 = 20/25 = 80\%.$$

Legyen pl. k_5 a funkció elvégzése szempontjából különböző hatásfokozat eredményező, 5 elemű hibás elem-konfigurációk lehetséges száma, $p_1 \dots p_{k_5}$ az egyes konfigurációk előfordulási valószínűsége az összes lehetséges 5-ös konfiguráció között, $f_1 \dots f_{k_5}$ pedig a megfelelő funkcionális hatások sorozata. Akkor a $P_0 = 80\%$ hatáskeresztmetszethez tartozó átlagos funkcionális hatások az

$$\bar{f}_5 = \sum_{i=1}^{k_5} p_i f_i \quad (24)$$

összefüggésből számítható és ezt az átlagos \bar{f} hatásfokot rendelhetjük csak egyértelműen hozzá P_0 -hoz. Az 1. sz. ábrán bemutatott karakterisztikák ily módon készültek.

A karakterisztikákból leolvasható, hogy pl. alacsony áramköri kihasználtság mellett ($A=0,01$) a hatáskeresztmetszet $P_0=64\%$ -ig lecsökkenhet anélkül, hogy az átlagos funkcionális hatások a kritikusnak tekintett $f_{krit}=98\%$ alá csökkenne. (Lásd az ábrán a H pontot). A 64%-os hatáskeresztmetszet azt jelenti, hogy ekkor 25 áramkörből már csak 16 üzemképes, 9 áramkör hibás. Ha a 9 hibás áramkörből 4-et megjavítanak, a rendszer átlagos funkcionális hatásfoka máris 99,9%-ra emelkedik, jöllehet hatáskeresztmetszete csak 80%-ig nőtt. (Lásd a J pontot). Ha ezen a ponton a karbantartás megelégszik a funkcionális hatások „rendbetételével”, akkor tulajdonképpen 5 hibát bennehagyott a rendszerben és csak 4 hiba újratermelődésére kell várni az f_{krit} hatásfok újbóli eléréséig, vagyis az újbóli riasztásig vagy panaszig. Ily módon a rendkívüli karbantartói beavatkozások közötti átlagidő megrövidül — lényegében a hibaelhárítás η hatásfokával arányosan [itt $\eta=4/9$] — és a valóságosnál rosszabb képet nyújt a berendezés karbantartathóságáról. A sűrű karbantartói beavatkozás tehát nemcsak a hibáknak, hanem éppúgy az alacsony hibaelhárítási hatásfoknak is következménye lehet.

A redundáns rendszerekből felépülő nagyberendezések karbantartását gyakran jellemzi ez a mechanizmus. Mindez a hibadiagnosztikai eljárások η hatásfokának növelése felé irányítja a figyelmet.

6. Megbízhatóság a karbantartás ill. a szolgáltatások oldaláról nézve

A redundáns rendszerek karbantartását jellemző Markov-folyamatnak egy másik paradox tulajdonsága az, hogy a tapasztalati megbízhatósági adatgyűjtés által szolgáltatott $A_1(0, t)$ látszólagos meghibásodási ráta (lásd 1.7 fogalom) mindaddig alacsonyabbnak mutatkozik a tényleges, de tapasztalati úton közvetlenül meghatározhatatlan $A_0(0, t)$ átlagos meghibásodási rátánál, amíg a $P_0(t)$ állapotvalószínűség a P_{0krit} értékig nem csökken. Mihelyt $P_0(t) = P_{0krit}$, az addig felhalmozódó, rejtve maradt hibák a karbantartói beavatkozás folytán felszínre kerülhetnek és a kedvező megbízhatósági összkép egy csapásra kedvezőtlené válhat. A hibák felhalmozódása természetesen a karbantartás színvonalával is összefüggésben van.

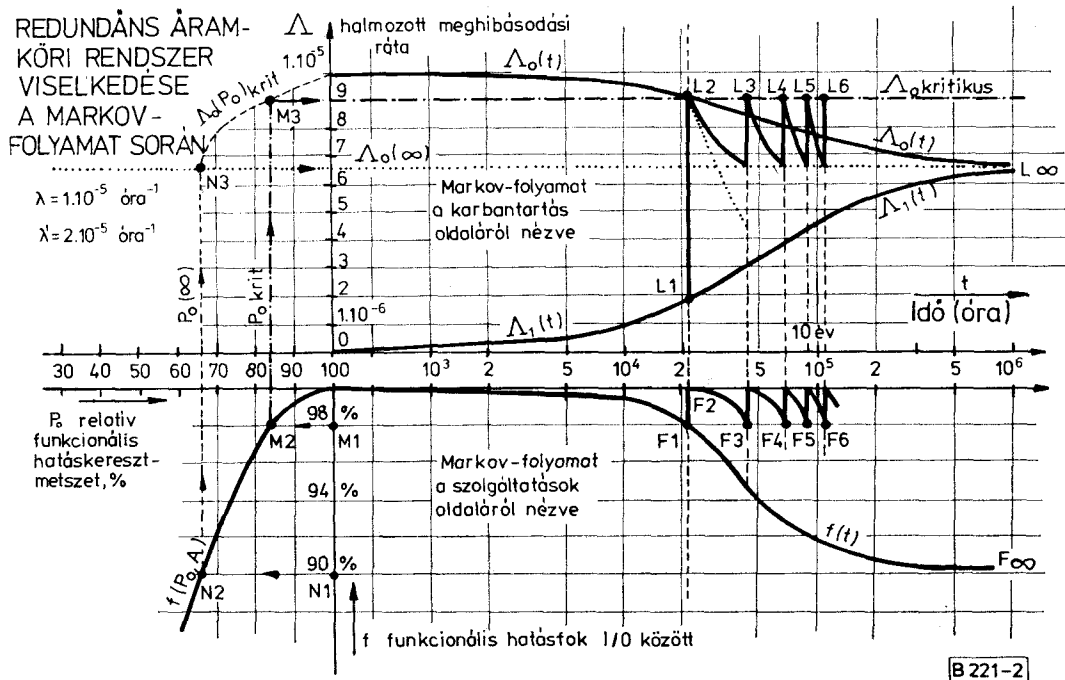
Ha azonban a karbantartás színvonala (λ' értéke) olyan, hogy $P_0(t)$ sohasem csökken le a P_{0krit} értékig, akkor a megbízhatósági összkép hirtelen megváltozásától nem kell tartani és ráadásul a tapasztalt összkép valamivel jobb lesz, mint a valóság.

A 2. sz. ábra a $A_1(0, t)$ látszólagos halmozott meghibásodási ráta és a $A_0(0, t)$ valóságos halmozott meghibásodási ráta változását mutatja a rendszer üzemideje során, $\lambda = 1 \cdot 10^{-5}$ óra⁻¹ hibakeletkezési és $\lambda' = 2 \cdot 10^{-5}$ óra⁻¹ hibafelderítési intenzitás értékek mellett. Az ábra lényegében egy négyes-diagram, amely összefüggéseiben mutatja egy redundáns rendszer f funkcionális hatásfokának és A halmozott meghibásodási rátájának viszonyát a Markov-folyamat során.

Ha az f funkcionális hatások romlását nem korlátozzuk megfelelő karbantartói beavatkozással, akkor — a diágramból láthatóan — ez a hatások az adott példában kb. 1 év üzemidő után rohamosan csökkenni kezd és hosszabb idő múltán 90% határértékhez tart. Ha az üzemeltető megelégszik 90%-os hatásfokkal, akkor a rendszer látszólagos halmozott meghibásodási rátája mindvégig a $A_1(t)$ görbe szerint fog növekedni a $0-L1-L\infty$ „útvonalon”, és mindig jelentősen alacsonyabb marad a valódi, de közvetlenül nem tapasztalható $A_0(t)$ meghibásodási rátánál. A rendszer megbízhatóságát hibádrabszámban kifejezve jobbnak fogjuk találni a valóságosnál, ennek „ára” azonban az, hogy a feltáratlan hibák a rendszerben felhalmozódnak és a funkcionális hatásfokot lerontják. Ha viszont megköveteljük, hogy az f funkcionális hatások ne csökkenjen pl. 98% alá, akkor az $f(t)$ görbén az $F1$ pontba érve soronkívüli karbantartói beavatkozást kell foganatosítani, feltárva és elhárítva (elvileg) az addig keletkezett és rejtve maradt összes hibát. Ennek az akciónak a hatására a meghibásodás tapasztalt intenzitása a $A_1(t)$ görbéről a $A_0(t)$ görbére tevődik át (a rendszer az $L1$ pontból az $L2$ pontba jut). A hibadarabszámban kifejezett megbízhatóság ugrásszerűen leromlik, ugyanakkor ennek ellentétéleként az f funkcionális hatások ugrásszerűen megjavul (a rendszer az $F1$ pontból az $F2$ pontba jut). A soronkívüli karbantartási akciók azután a rejtett hibák újratermelődése miatt periódikusan ismétlődnek. Az $f(t)$ görbe az $F1-F2-F3-F4-F5-F6-\dots$ pontokon át halad, míg a $A(t)$ görbe az $L1-L2-L3-L4-L5-L6-\dots$ pontokon át. A tapasztalati $A(t)$ görbe ily módon lényegesen kedvezőtlenebb lesz, mint a $A_1(0, t)$ görbe, ugyanakkor ennek ellentétéleként a rendszer funkcionális hatásfoka mindvégig jobb lesz a megengedett 98%-os alsó határnál.

Az $f(t)$ funkcionális hatások és a $A(t)$ halmozott meghibásodási ráta közötti kapcsolatot két karakterisztika közvetíti: az egyik a már ismertetett $f(P_0, A)$ karakterisztika, amely a redundáns rendszer áramköri konfigurációjának függvénye, a másik pedig a $A_0(P_0)$ karakterisztika, amely a Markov-folyamat jellemzője.

A funkcionális hatások megengedett szintjéből, mint követelményből kiindulva az ábrán az $N1-N2-N3$, illetve $M1-M2-M3$ útvonalon juthatunk el a A_{0krit} hibaráta értékig, amely az $L1-L2$ ugrást és az azt követő ugrásokat meghatározza.



2. ábra. Redundáns áramköri rendszer viselkedése a karbantartást jellemző Markov-folyamat során

7. Következtetések

Összegezőképpen megállapítható, hogy a redundáns áramköri rendszerek és a belőlük felépülő berendezések megbízhatóságát nem lehet függetlenül szolgáltatás-oldalról és karbantartás-oldalról vizsgálni: a szolgáltatások jósága, vagyis a funkcionális hatások szorosan összefügg a rendszerben felhalmozódó hibákkal és bizonyos ellenütemű fluktuáció jellemzi a kettő viszonyát. A hiba-felhalmozódás ideje alatt a funkcionális hatások romlik, a karbantartási hibastatisztika javul, majd a folyamat hirtelen megfordul: a felhalmozódott hibák kiküszöbölésével a funkcionális hatások meg-

javul, a karbantartási hibastatisztika pedig leromlik. A fluktuáció annál nagyobb amplitúdójú lehet, minél nagyobb a redundáns áramköri rendszer „hibafelvevő kapacitása” (gyakorlatilag a P_{1krit} állapot-valószínűség), a funkcionális hatások megtört f_{krit} értéke mellett. Lényegében tehát a redundáns áramköri rendszerek megbízhatóság szempontjából kapacitív viselkedést mutatnak, amit eddig a megbízhatóság komplex értékelésében a gyakorlat nem vett figyelembe. Mivel a nagyberendezések zömmel redundáns áramköri rendszerekből épülnek fel, megbízhatóságukat csak a szolgáltatás és karbantartás oldaláról egyidejűleg vizsgálva lehet reálisan megítélni.