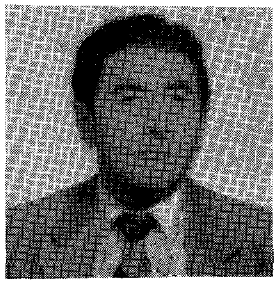
Megbízhatóságnövelési program és annak matematikai modellje

DR. BALOGH ALBERT
Mikroelektronikai Vállalat

Összefoglalás

A tanulmány a megbízhatóságnövelésre alkalmazott módszereket ismerteti. Az alapvető fogalmakat, a tervezés alapelveit foglalja össze. A megbízhatóságnövelést abban az esetben vizsgálja a szerző, ha a meghibásodási folyamat időfüggvénye hatványfüggvénnyel közelíthető. A megbízhatósági jellemzők számítását a közlemény példákkal illusztrálja.



DR. BALOGH ALBERT

Matematikus. 1961 óta foglalkozik a megbízhatóságvizsgálatok elméleti és gyakorlati kérdéseivel. Több mint 50 publikációt jelentetett meg a műszaki tudomány kandidátusa, MTESZ és Puskás Tivadar-díjas.

1. Bevezetés

A rendszerek megbízhatóságának folytonos növelése elengedhetetlen követelmény napjaink elektronikai iparában. Ennek a folyamatnak a gyakorlatban való megvalósítása szükségessé teszi a megbízhatóság növelésével kapcsolatos alapvető fogalmak, alapelvek és irányítási-szevezési teendők megismerését, a megbízhatóságnövelési program megtervezésére vonatkozó ismeretek megszerzését és a program matematikai modellezését. A jelen közlemény a Nemzetközi Elektronikai Bizottság (IEC) 56 (CO)122 és 56(CO) 150 ([1], [2]) dokumentumai alapján kívánja összefoglalni a legfontosabb tudnivalókat.

2. A megbízhatóságnövelési program célja és alapfogalmai

A megbízhatóságnövelési program alapvető célkitűzése a rendszerben lévő szisztematikus meghibásodások kiküszöbölése és a többi meghibásodási fajta előfordulási valószínűségének csökkentése. Itt kell megjegyezni, hogy általánosabb értelemben a megbízhatóságjavítási programról is szokásos beszélni. Ez esetben a megbízhatóságnövelési program és a megbízhatóság szűrési program alkotja együttesen a megbízhatóságjavítási programot. A megbízhatóság szűrés a korai meghibásodások szakaszát vágja le (a szűréssel külön közleményben kívánunk foglalkozni), a megbízhatóságnövelési program pedig az eredő meghibásodási intenzitást csökkenti a rendszer felhasználásának időtartama alatt. A megbízhatóságnövelési program (MNP) elektronikai berendezések esetében akkor alkalmazandó, ha ismeretessé válik, hogy a tervezés (a konstrukció) nem eléggé kiforrott és így a termék nem fog megfelelni az ellenőrző vizsgálat követelményeinek.

A program során laboratóriumi, vagy üzemi körülmények közötti vizsgálatot végzünk annak érdekében, hogy előhívjuk a rendszer, berendezés, alkatrész gyengeségéből (gyenge pontjaiból) adódó meghibásodásokat és ezáltal javítsuk a megbízhatóságot. A vizsgálat során megfigyelt meghibásodások okait elemezve meghatározzuk, hogy a rendszer és annak elemei konstrukciójában, gyártásában milyen javító (korrigáló) módosítások végzendők el. Ezért megkülönböztetünk ún. korrigáló módosítást még a vizsgálat során és ún. késleltetett módosítást, amikor ezt a vizsgálat végén (rendszerint üzemi vizsgálat után) építik be a rendszerbe.

Fontos fogalomként kell tekinteni a *gyengeség* fogalmát és a *gyengeség okozta meghibásodás* fogalmát. A gyengeség a termékben eredendően meglévő, vagy a termékbe az előállítás során bevitt olyan hiba, amely a későbbiekben meghibásodáshoz vezethet. Itt kell megemlíteni a *szisztematikus gyengeségből* eredő *szisztematikus meghibásodás* fogalmát is. A szisztematikus gyengeség vagy megszüntethető, vagy hatása csökkenthető azáltal, hogy a tervezésben, a gyártásban, az üzemmódban javító módosításokat hajtanak végre. A szisztematikus gyengeségen kívüli gyengeség-fajtákat, illetve az ezek által okozott meghibásodásokat *egyéb gyengeségeknek*, illetve *egyéb (vissza megmaradt) meghibásodásoknak* nevezzük. A szisztematikus meghibásodásokat két kategóriába soroljuk: "A" kategóriájú meghibásodás esetében a vállalat vezetősége nem tervez korrigáló módosítást költség-, időtechnológiai korlátozó tényezők miatt. "B" kategóriájú meghibásodás: ezek esetében a vezetőség elhatározza a korrigáló módosítások megvalósítását.

3. A megbízhatóságnövelési program alapelvei

A megbízhatóságnövelési program a szisztematikus gyengeségek és az azokból származó meghibásodások hatásainak csökkentésére irányul csak általában. Az

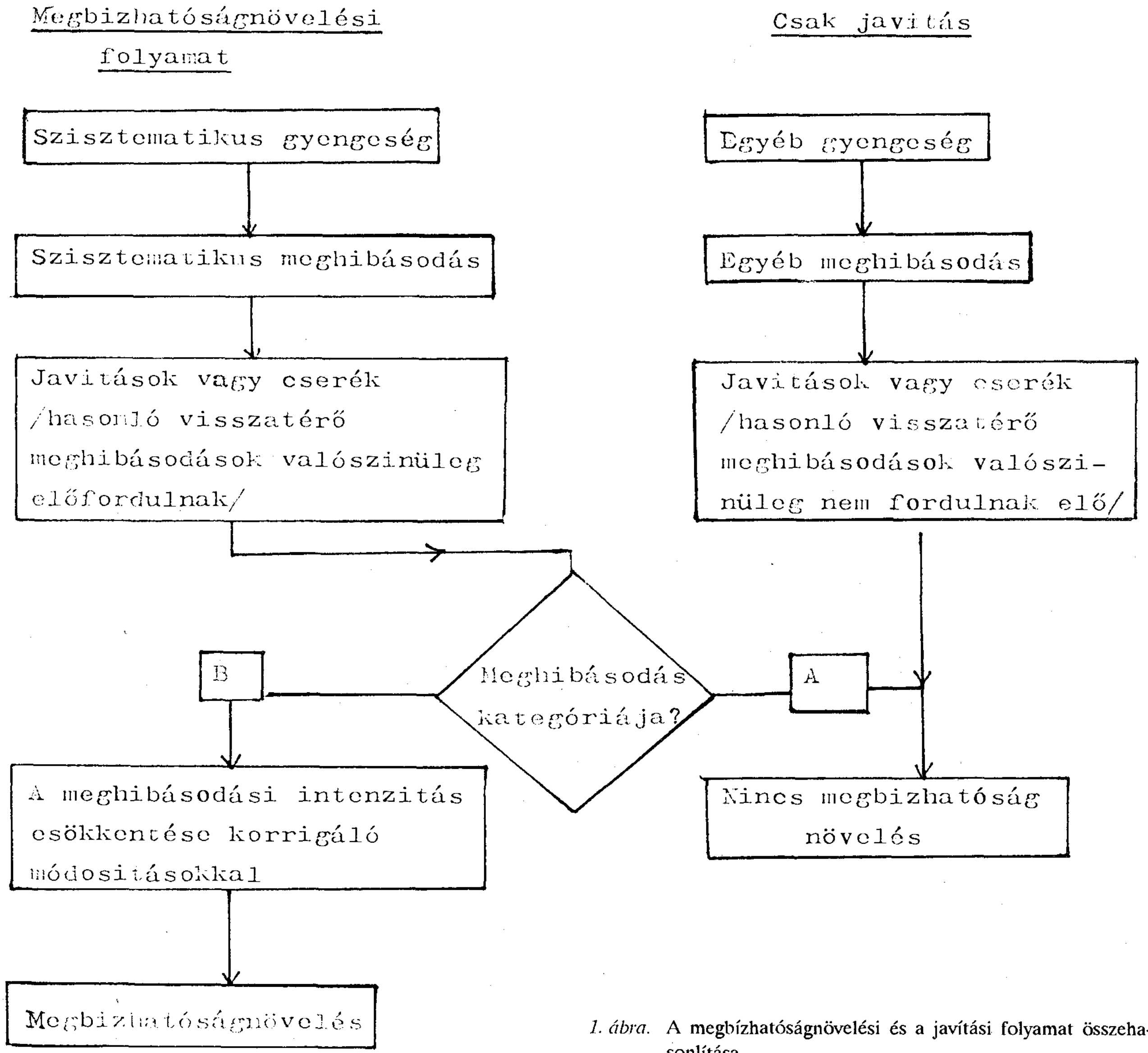
Beérkezett: 1990. II. 18. (†)

1. ábrán látható az eseménysorozat, amely szisztematikus és egyéb (visszamaradt) meghibásodások esetében vázolja a folyamatot a kezdeti gyengeség feltárásától annak megszüntetéséig.
A szisztematikus gyengeségek általában a tervezésből, gyártásból és alkalmazásból adódnak. Ezeket a következő tényezők befolyásolják:

- az alkalmazási környezet feltételeinek szigorúsága;
- a tervezés, a gyártás vagy felhasználás újdonság jellege, bonyolultsága vagy kritikus volta;
- idő és pénzügyi korlátozó tényezők, nagyságra, súlyra vagy energiafogyasztásra vonatkozó megszorítások;
- a személyzet szakképzettsége és begyakorlottsága.

A szisztematikus gyengeségek mind a hardwareben, mind a softwareben előfordulhatnak és hatásuk nagyon jelentős lehet, mivel egyetlen gyengeségi ok hasonló gyengeségeket idéz elő minden termékben. A megszüntetésre irányuló korrigáló módosítások maguk is előidézhetnek újabb ilyen jellegű hibákat.

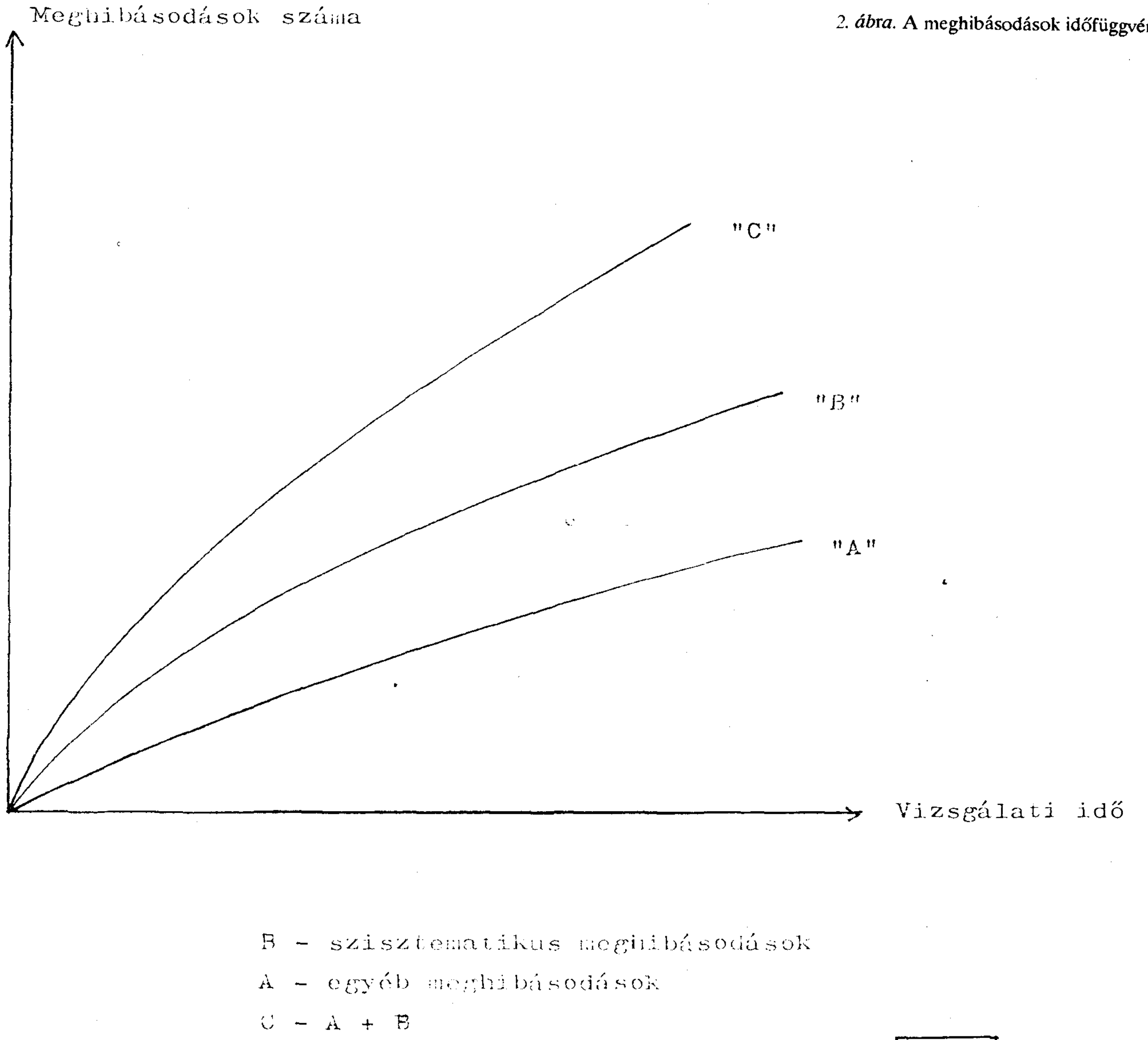
Az egyéb (visszamaradt) gyengeségek rendszerint a gyártótól származnak. Ezek a hibaokok csak a hardwareben találhatók. Hatásuk csak egy-egy termékpéldány esetében érvényesül. Jelentős részük szűréssel megszüntethető. Maradék részük a termék teljes élettartamán keresztül megfigyelhető. A meghibásodások számának változása a vizsgálati idő függvényében a *2. ábrán* látható. A "B" görbe a szisztematikus meghibásodások minden egyes fajtájának meghibásodási számát adja meg, amely az egyes hibafajták első előfordulására vonatkozik (utána korrigáló intézkedésekkel megszüntethető vagy csökkenthető). Ezért a "B" görbe exponenciális jellegű, amely azt tükrözi, hogy a meghibásodási fajták száma csökken az időben. Az "A" görbe, amely az egyéb (visszamaradt) meghibásodásokat adja meg, lineáris a korai meghibásodások szakaszát követően. A két görbe összege adja meg a



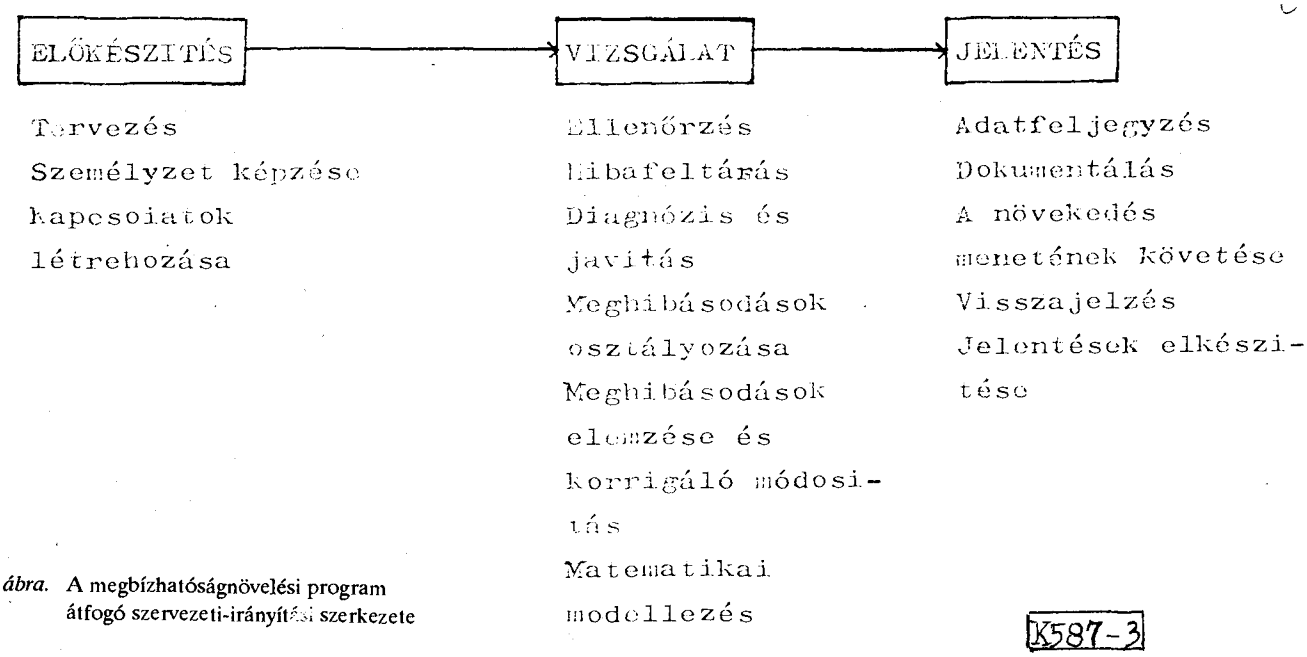
1. ábra. A megbízhatóságnövelési és a javítási folyamat összehasonlítása

K587-I

2. *ábra.* A meghibásodások időfüggvénye



K587-2



3. *ábra.* A megbízhatóságnövelési program átfogó szervezeti-irányítási szerkezete

K587-3

”C” görbét, amely hosszabb vizsgálati idő után lineáris. A *2. ábra* görbéit a következő feltételek mellett határoztuk meg:

- a korai meghibásodások szakaszát a vizsgálatokból kizárják (különben az ”A” görbe kezdeti szakasza nem lenne lineáris);
- a program során keletkező új hibatípusokat nem veszik figyelembe (azaz azokat a hibákat, amelyeket a módosítások vagy a javítások idéznek elő);
- az igénybevételi és környezeti feltételek a vizsgálat során állandóak;
- a vizsgálati időt pontosan ellenőrzik.

4. Szervezési-irányítási feladatok

A vállalat vezetőségének meg kell határoznia azokat a szervezési és irányítási tevékenységeket, amelyek a program megtervezésére és végrehajtására szolgálnak. Meg kell állapítani azt is, hogy milyen kapcsolat van a vizsgálati tevékenységet irányítók és a korrigáló módosításokért felelősök között.

A *3. ábrán* látható az irányítási-szervezési folyamat. Az előkészítési szakaszban kell elvégezni a tervezést, a vizsgáló személyzet képzését, valamint a kapcsolat létrehozását a különböző részlegek között. A vizsgálati szakasz az ellenőrzésre, a meghibásodások felkutatására, a korrigáló módosításokra és ezek matematikai modelljére terjed ki. A jelentéskészítés az adatok rögzítésén túlmenően a visszacsatolást és a végső jelentés elkészítését is magában foglalja.

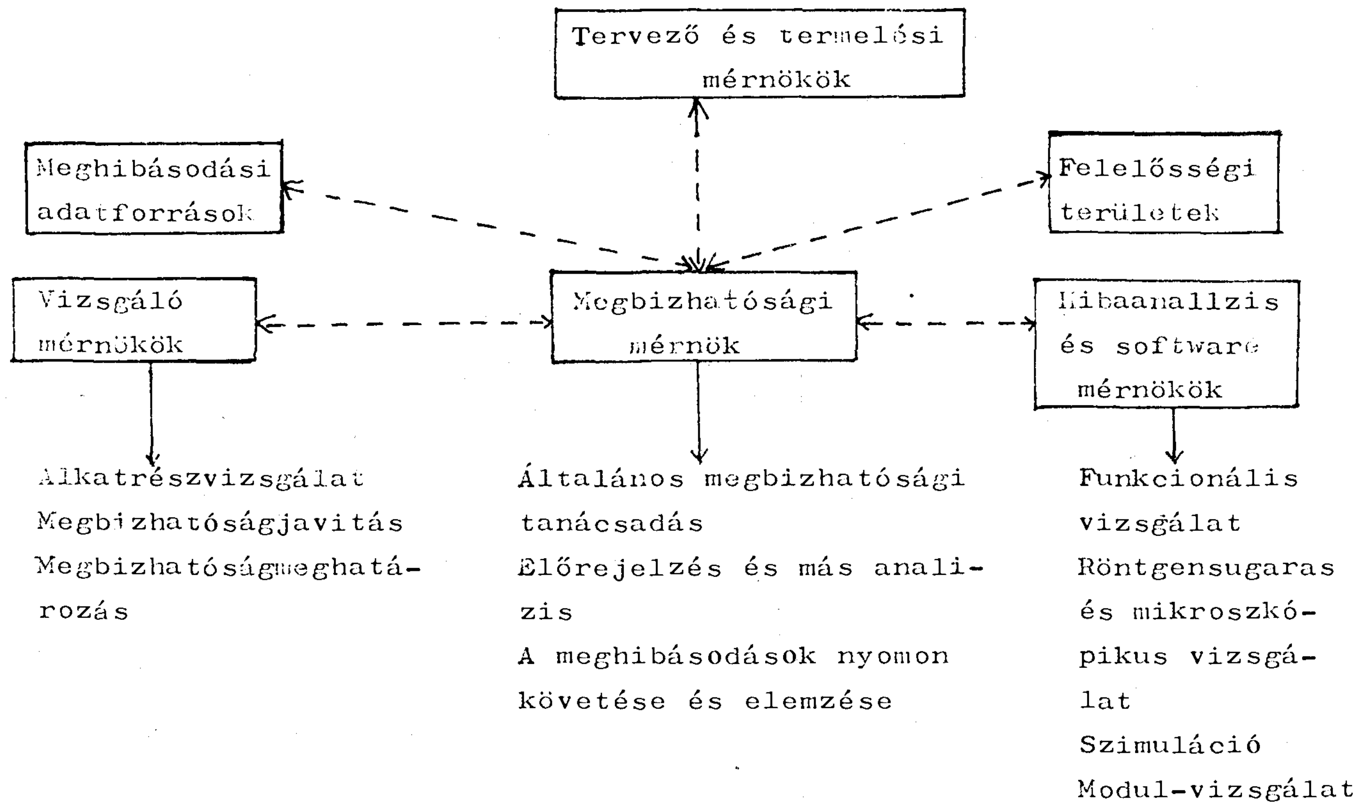
A *4. ábrán* látható az egyes részlegek közötti kapcsolatot bemutató folyamat ábrája. A korrigáló módosítások arra irányulnak, hogy a szisztematikus meghibásodások okait kiküszöböljék. Ezt a tevékenységet személyesen a megbízhatóságért felelős mérnöknek (megbízhatósági mérnöknek) kell elvégeznie, mert csak így lesz hatékony a tevékenység. Ez a mérnök szoros kapcsolatot tart fenn a különböző meghibásodási információkat szolgáltató adatforrásokkal és a szisztematikus meghibásodások okainak megszüntetéséért felelős személyekkel.

A legfontosabb adatforrások a következők:

- Megbízhatóságjavító vizsgálat (ez az egyik legfontosabb forrás, mert külön erre a célra hozták létre és a környezeti feltételek folyamatos ellenőrzését is megköveteli);
- Megbízhatóságszűrés;
- Megbízhatóság-meghatározás;
- Környezeti minősítő vizsgálat;
- Átvételi vizsgálat;
- Üzemi próba;
- Üzemeltetés.

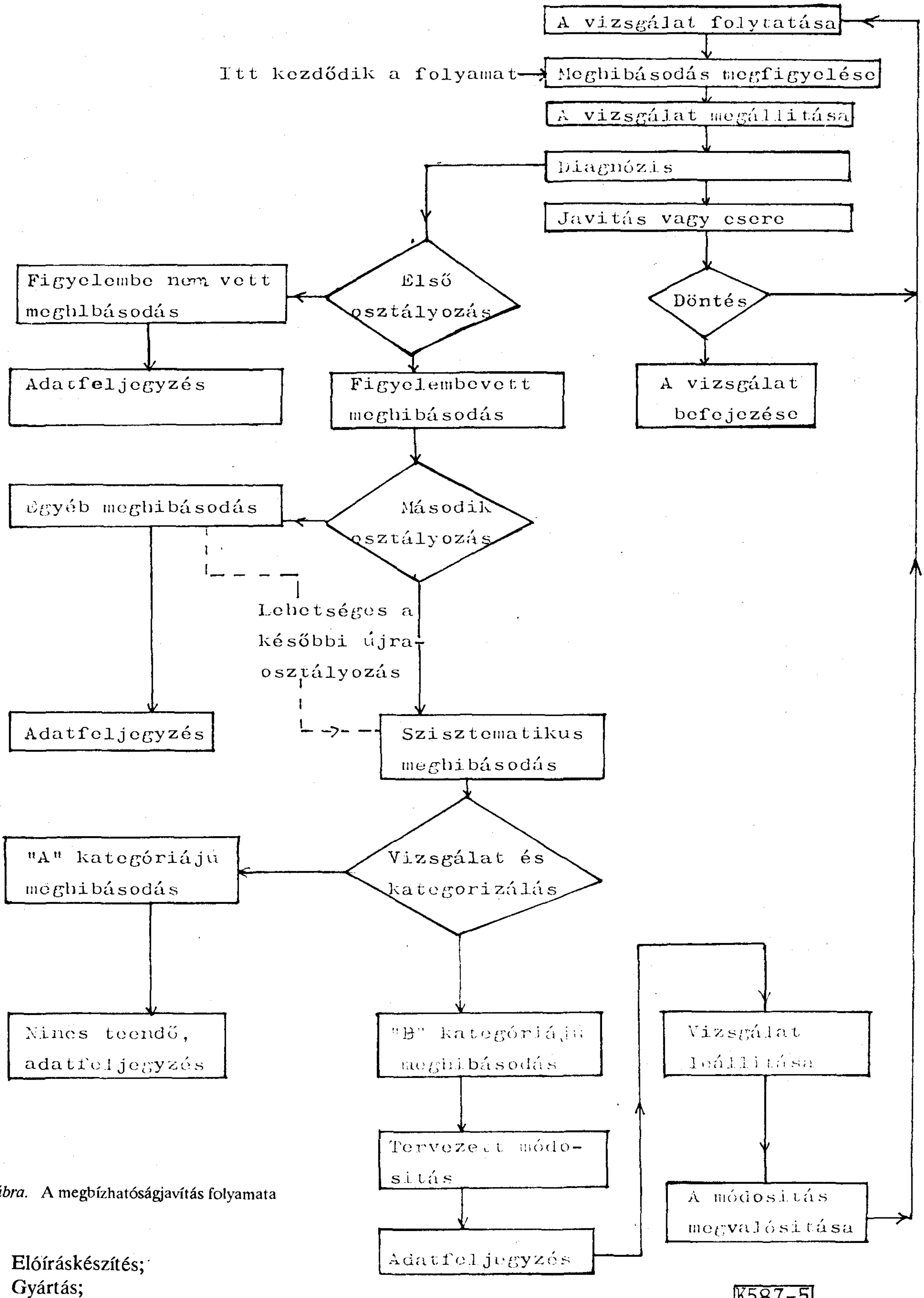
A következő területekre terjedhetnek ki az intézkedések:

- Tervezés és fejlesztés;
- Alkatrészszállítók és alvállalkozók;
- Gyártástervezés;



4. ábra. A funkciók és részlegek közötti kapcsolat

K587-4



5. ábra. A megbízhatóságjavítás folyamata

- Előíráskészítés;
- Gyártás;
- Vizsgálat;
- Üzemeltetés és karbantartási utasítások elkészítése;
- Felhasználók.

Az *5. ábrán* látható a megbízhatóság javítás folyamata. Ez a következő sorozatból áll: meghibásodás diagnózis, javítás vagy csere, meghibásodások osztályozása és további vizsgálat, valamint korrigáló módosítás (ha lehetséges).

A megszakítások hosszának rövidítése érdekében a vizsgálatot meghibásodás esetén csak annyi ideig szabad szüneteltetni, amennyi elegendő a diagnózis és a javítás vagy csere elvégzésére. Ha lehetséges, akkor a szisztematikus meghibásodások elemzését és a módosítások bevezetését a vizsgálattal párhuzamosan kell elvégezni, vállalva azt a kockázatot, hogy ugyanazon típusú meghibásodás, amelyet éppen megszüntetni akartak, fog megismétlődni.

A "B" kategóriájú szisztematikus meghibásodást mindig korrigáló módosítás követi. Ha a módosítást szükséges elvégezni, akkor a legkorábbi alkalmas leállási pontban (másik meghibásodás vagy megszakítás bekövetkezésekor) kell ezt végrehajtani. Hatékonyabb működtetés érhető el, ha a programot időszakaszokra osztjuk fel és a módosításokat elhalasztjuk az egyes szakaszok végpontjáig.

A program elvégzéséhez szükséges munkaerőigény a vizsgált terméktől függ. Kis rendszerek esetében a megbízhatósági mérnök munkaidejének csak egy részét tölti el ennek a terméknek a vizsgálatával, más esetekben szükséges lehet jelentős létszámú személyzet alkalmazása a vizsgálat elvégzésére. A megbízhatóságnövelési program költségei az üzemi karbantartás költségeinek csökkenése területén térülnek meg.

5. A program tervezése

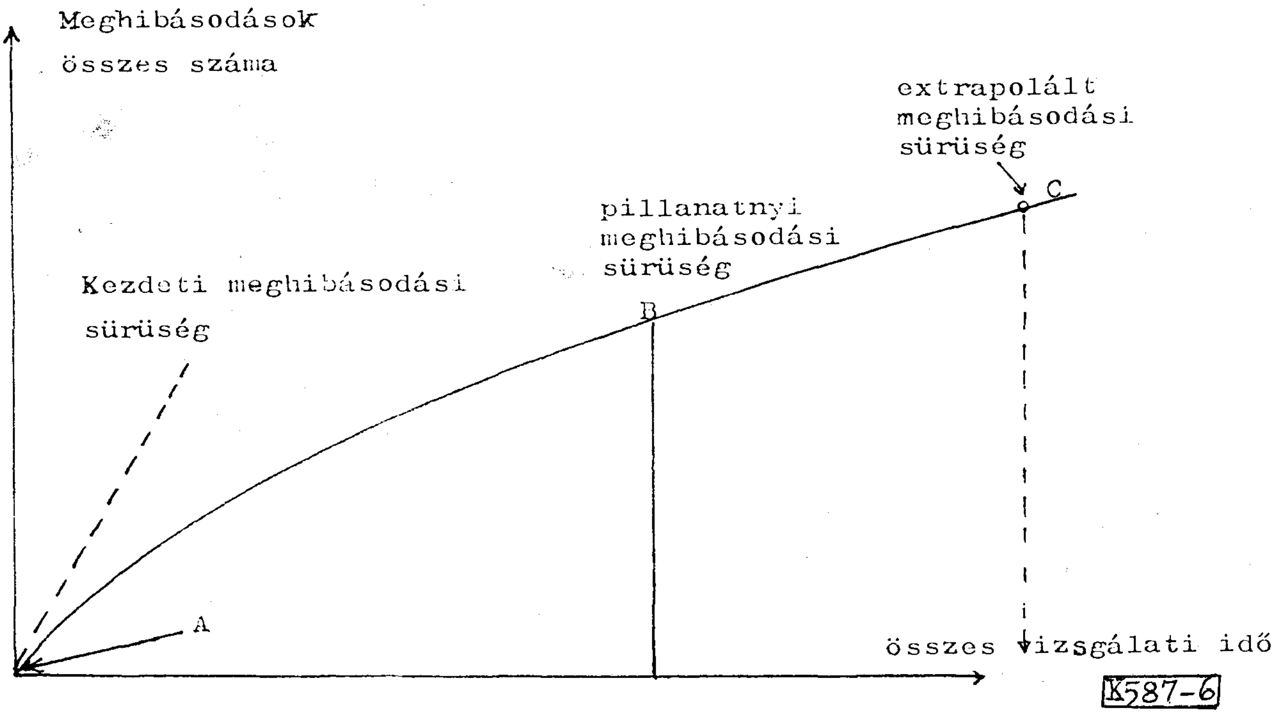
Általánosan elfogadott, hogy egy gyakorlatilag indokolt és gazdaságos időtartományon belül kell elvégezni a vizsgálatokat. Az előírt javítás mértékétől függően ez néhány ezer eszközóra megfigyelését teszi szükségessé. A vizsgálat elvégzése után is megmaradnak az egyéb meghibásodások és a szisztematikus meghibásodások egy része is. Ezek a tényezők határozzák meg az üzemeltetésre vetített meghibásodási intenzitást.

A tervezéskor a következő tényezőket kell meghatározni:

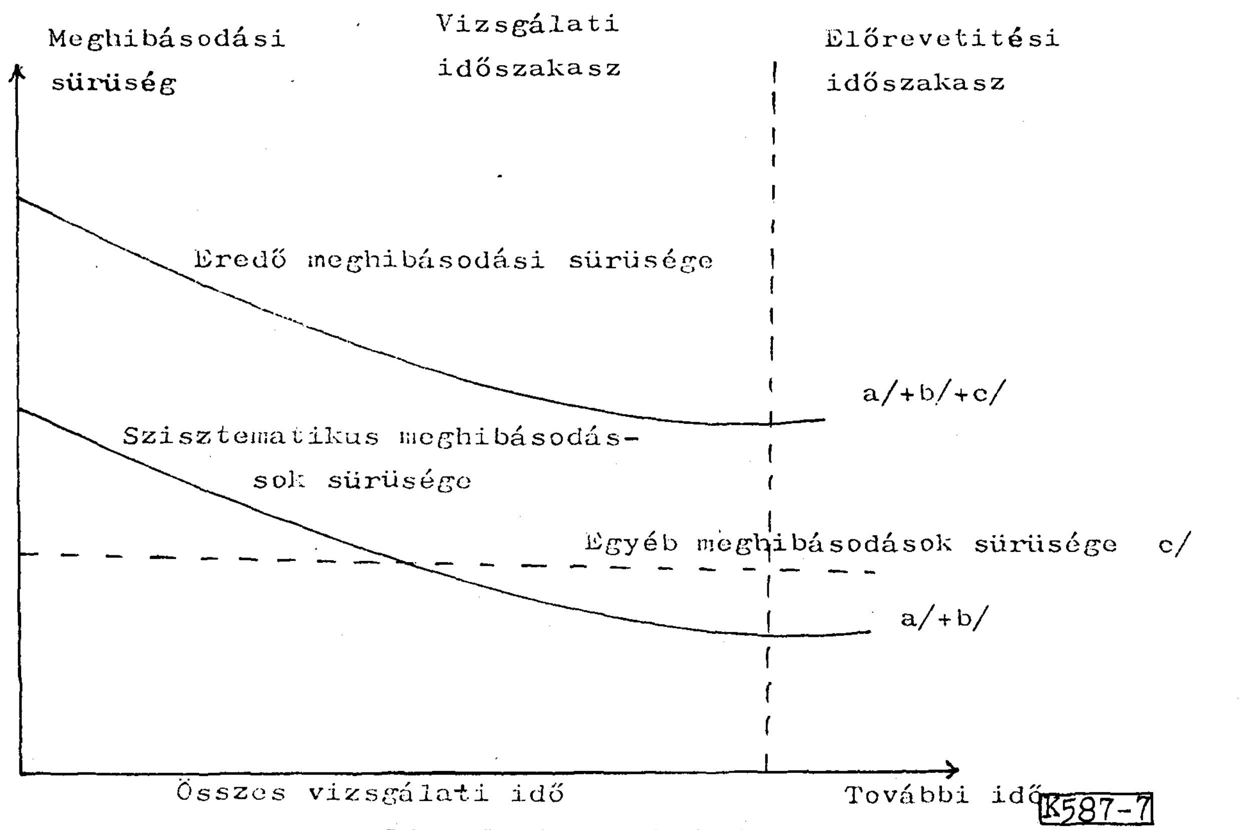
- A vizsgálandó termékek száma;
- Vizsgáló berendezések típusa;
- Tartalékalkatrészek és -egységek száma;
- Vizsgálati feltételek;
- A program várható időtartama működési időben és naptári időben;
- A program végrehajtásához szükséges munkaerő nagysága.

6. A megbízhatóságnövelés matematikai modellezése

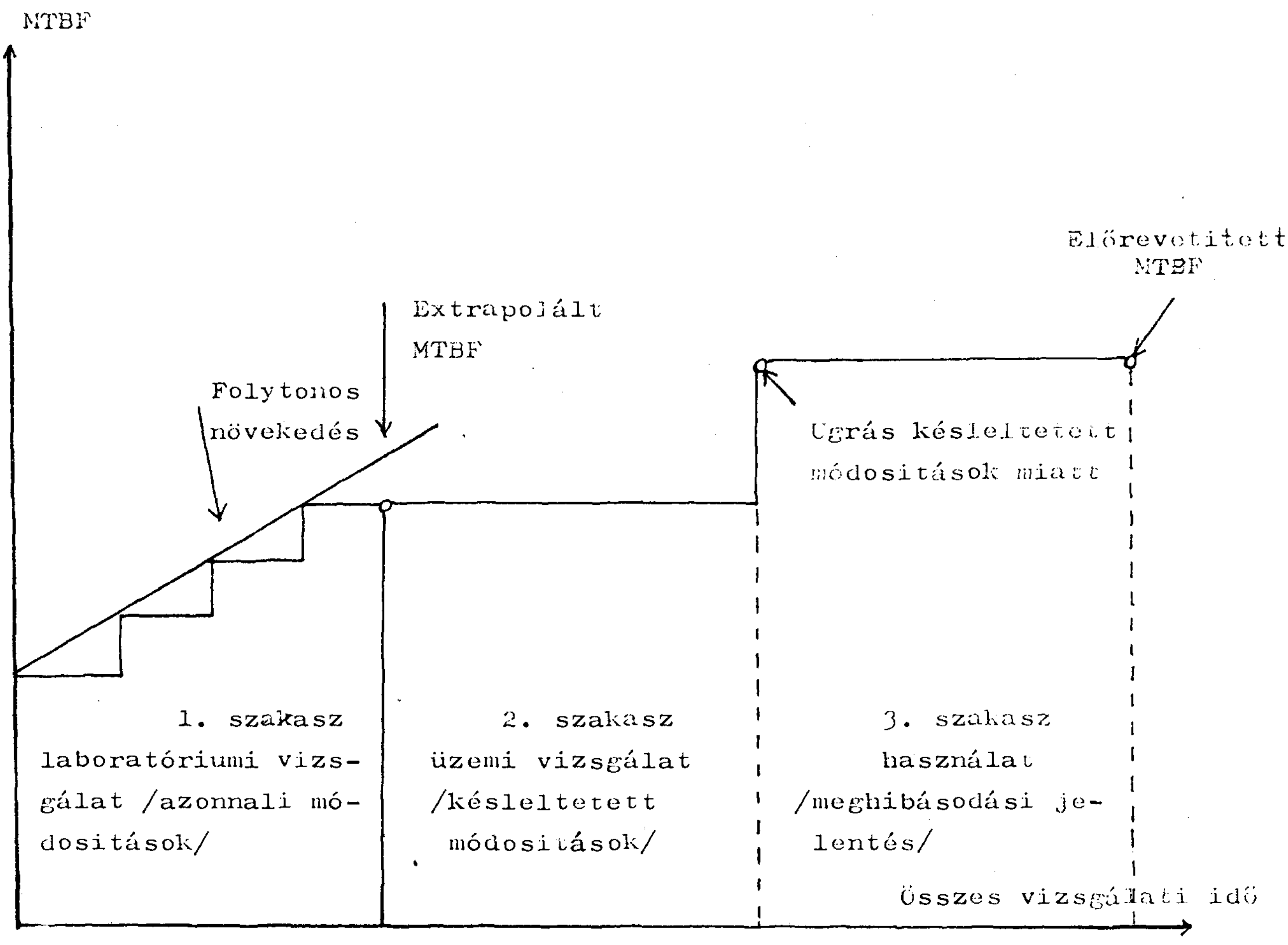
A megbízhatóságnövelési program matematikai modellje lehetővé teszi, hogy javítható termékek esetében becsüljük a megbízhatósági jellemzőket – szokásosan a meghibásodási sűrűséget (intenzitást) illetve az MTBF-et – a megbízhatóságnövelési program közbenső pontjában és annak végén. Ennek ismeretében becsülhető ezeknek a jellemzőknek extrapolált értéke a program végrehajtásának későbbi pontjaiban, valamint ún. előrevetített értéke a program végrehajtásán túl, amikor már a késleltetett módosításokat is elvégezték. Ez utóbbi a legfontosabb jellemző, mivel megmutatja, hogy a módosítások elvégzésével milyen megbízhatóságnövelés érhető el. Ez rendszerint a növelés hatékonysági tényezőjével mérhető, amely megadja, hogy hány százalékos csökkenés érhető el a meghibá



6. ábra. A meghibásodási sűrűség (intenzitás) pillanatnyi és extrapolált értékének időfüggvénye



7. ábra. Előrevetített meghibásodási sűrűség



8. ábra. Növekedési görbe ugrásokkal

K587-8

sodási sűrűségben (intenzitásban) az adott módosítás bevezetésével.

Ha a meghibásodások összegzett számát ábrázoljuk a vizsgálati idő függvényében, akkor a *6. ábrát* kapjuk. Bármely időpontban ehhez a görbéhez húzott érintő iránytangense (azaz a görbét meghatározó függvény deriváltja ebben a pontban) megadja a meghibásodási sűrűség (intenzitás) pillanatnyi értékét. Ismerve azt a sztochasztikus folyamatot, amellyel ez a meghibásodási folyamat közelíthető, becsülhetjük a meghibásodási sűrűség (intenzitás) időfüggvényét.

A 6. ábrán látható, hogy a "C" pontjához tartozó érintő iránytangense becsülhető a "B" ponthoz tartozó érintő iránytangensének extrapolálásával. Ez feltételezi, hogy a "B" és "C" pontokban azonos modellel dolgozunk. Ez az extrapolálás azonban nem érvényes a módosításoknak a program utáni bevezetése esetén. Ekkor ugyanis több korrigáló változtatás együttes bevezetése után folyamatos megbízhatóságnövekedés helyett ugrásszerű javulás következik be (*ld. 7. ábra és 8. ábra*). Ekkor becsülni kell minden szisztematikus meghibásodási típusra a meghibásodási sűrűséget, alkalmazni kell a növelés hatákonysági tényezőjét, valamint az egyéb meghibásodások állandó meghibásodási sűrűségét a meghibásodások összes számának és az összes vizsgálati időnek hányadosával kell becsülni. Az előrevetített meghibásodási sűrűség az egyes, következő okok miatt bekövetkező meghibásodások sűrűségének összege (ld. 7. ábra):

a/ Szisztematikus meghibásodások sűrűsége, amelyek megszüntetésére lehet, hogy már kísérletet tettek, vagy nem tettek.

b/ Olyan szisztematikus meghibásodások sűrűsége, amelyeket még nem észleltek, bár a modell azokat előre jelezte.

c/ Egyéb meghibásodások sűrűsége.

A következőkben a meghibásodási sűrűség matematikai modelljét tárgyaljuk, ha a folyamat hatványfüggvénnyel közelíthető. A meghibásodások folyamatát olyan sztochasztikus folyamattal írjuk le, amelyre teljesül, hogy a folyamat függvénye hatványfüggvény, azaz a T idő alatt bekövetkező meghibásodások N/T/ számának várható értéke (E/N/T/) a következő:

$$E[N/t/] = \alpha T^{\beta} \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0, T > 0. \qquad (1)$$

ahol

α a skálaparaméter;

β az alakparaméter, amely a megbízhatóságnövelés hatékonyságának függvénye, azaz $0<\beta<1$ a megbízhatóságnövelést jellemzi; $\beta=1$ azt írja le, hogy nincs megbízhatöságnövelés; $\beta>1$ negatív megbízhatóságnövelésnek (romlásnak) felel meg.

Az (1) alatti függvény látható a *6. ábrán*. Ennek deriváltja adja a meghibásodási sűrűséget (intenzitást), amely a 6. ábrán látható görbe érintőinek iránytangenseit jellemzi. Az (1) képletből kapott meghibásodási sűrűség a következő alakú:

$$Z/T/ = \frac{dE[N/T/]}{dT} = \alpha\beta T^{\beta-1}, T > 0. \qquad (2)$$

A (2) képletből a sztochasztikus folyamatoknak ún. felújítási folyamatokra vonatkozó egyik összefüggéséből következik, hogy elég nagy T értékekre (ez a gyakorlatban teljesül) a pillanatnyi meghibásodási sűrűségnek a reciproka a T idő utáni átlagos meghibásodások közötti működési idővel, azaz az MTBF-értékkel egyenlő, amelyet a továbbiakban Θ (T)-vel jelöljük, azaz

$$\theta/T/ = \frac{1}{Z/T/}, \qquad (3)$$

látható, hogy α és β értéke meghatározza a meghibásodási folyamatot és a meghibásodási sűrűség (intenzitás) értékét is. A következőkben meghatározzuk az α és β paraméterek maximum likelihood becslését, ha egyes meghibásodások időpontja pontosan ismert (6.1. alpont) és abban az esetben, ha pontosan nem ismert és csoportosított adatok állnak rendelkezésre (6.2. pont). Külön kitérünk a modell helyességének statisztikai hipotézisvizsgálatára (6.3. alpont) és a konfidenciaintervallum határainak meghatározására (6.4. és 6.5. alpont), ismertetjük a megbízhatóságnöveléssel kapcsolatos előrevetítési eljárás modelljét is (6.6. alpont), végül pedig számpéldákat közlünk a módszerek alkalmazására.

Ennek a modellnek a következő tulajdonságai vannak:

a/ Értékelése egyszerű.

b/ Ha a paramétereket korábbi programokból becsülik, kényelmesen kezelhető eszköz a további vizsgálatok tervezésére hasonló vizsgálati feltételek és hatékonyságnövelési mértékek esetén.

c/ A modell azt a nem reális következtetést adja, hogy
$T=0$ esetén, $Z/T/ \to \infty$ és $Z/T/ \to 0$, ha $T \to \infty$,
Ezek a korlátozó feltételek azonban nem befolyásolják lényegesen a gyakorlati felhasználást.

d/ Viszonylag lassú és érzéketlen a korrigáló módosítás utáni azonnali növekedések kimutatására és a végső Θ /T/ = MTBF értékre nagyon pesszimista (alacsony értékű) becslést adhatnak, ha nem alkalmazunk előrevetítést.

A következő mennyiségeket kell a modellek megalkotásához kiszámítani: az összes vizsgálati időt és ennek naptári időtartamra való átszámítását és az összes meghibásodások számát.

Kétféle típusú vizsgálatot különböztetünk meg:

- I. típusú vizsgálat: előre megadott T^* ideig tartó vizsgálat;
- II. típusú vizsgálat: az N-edik meghibásodás T_N időpontjáig tartó vizsgálat.

6.1 Maximum likelihood becslés, ha a meghibásodások időpontja pontosan ismert

Ha T_i jelenti az i-edik meghibásodás időpontját, akkor *első lépésként* számítsuk ki a következő próbastatisztikákat:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i - N\frac{T^*}{2}}{T^*\sqrt{\frac{N}{12}}} \quad \text{I. típusú vizsgálatra,} \quad (4)$$

vagy

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i - /N-1/\frac{T_N}{2}}{T_N\sqrt{\frac{N-1}{12}}} \quad \text{II. típusú vizsgálatra,} \quad (5)$$

ahol N a meghibásodások száma, T^* illetve T_N a vizsgálat befejezésének időpontja.

Ha a feltevés az, hogy nincs növekedés, akkor a meghibásodások időpontjai homogén Poisson-folyamatot alkotnak és az U statisztika közelítőleg standardizált normális eloszlású valószínűségi változó 0 várható értékkel és 1 szórással. Az U statisztika tehát felhasználható annak a hipotézisnek a vizsgálatára, hogy van-e megbízhatóságnövekedés, vagy -csökkenés, függetlenül attól, hogy milyen modell írja le a megbízhatóságnövelést. Legyen u_γ a 100 γ %-os szignifikancia pontja a standardizált normális eloszlásnak. Ekkor egy α szignifikancia szintű kétoldali statisztikai próba a következő:

Ha $\quad U \leq -u_{1-\alpha/2}$ vagy $U \geq u_{1-\alpha/2}$, $\quad$ (6)

pozitív, illetve negatív irányú megbízhatóságváltozásra (növekedésre, vagy csökkenésre) van bizonyíték; ha viszont

$$-u_{1-\alpha/2} < U < u_{1-\alpha/2}, \quad (7)$$

akkor nincs bizonyíték megbízhatóságváltozásra és a növekedési vizsgálatot be kell fejezni. Ekkor a meghibásodások időpontjai exponenciális eloszlásúak.

α = 0,20 szignifikancia szinten a kétoldali hipotézisvizsgálat kritikus $u_{1-\alpha/2}$ értékei: - 1,28 és 1,28. Az 1,28 kritikus érték egyoldali hipotézisvizsgálat esetén α = 0,10 szignifikancia szintnek felel meg. A többi szignifikancia szintekre vonatkozó kritikus értékek a standardizált normális eloszlás táblázatból határozható meg (ld. például [3]).

Ha a (6) képlet szerinti feltétel teljesül és a megbízhatóságnövekedés igazolt, akkor kiszámítjuk az alábbi értékeket

$$s_1 = \sum_{i=1}^{N} ln(t^*/T_i) \quad \text{(I. típusú vizsgálat esetén)} \quad (8)$$

vagy

$$s_1 = \sum_{i=1}^{N-1} ln(T_N/T_i) \quad \text{(II. típusú vizsgálat esetén).} \quad (9)$$

Ezután kiszámítjuk β és α becsléseit:

$$\hat{\beta} = \frac{N-1}{s_1} \quad \text{(I. típusú vizsgálat;}$$

$$\hat{\beta} = \frac{N-2}{s_1} \quad \text{(II. típusú vizsgálat)} \quad (10)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{N}{/T^*/^{\hat{\beta}}} \quad \text{(I. típusú vizsgálat;}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{N}{T_N^{\hat{\beta}}} \quad \text{(II. típusú vizsgálat)} \quad (11)$$

A $Z/T/$ meghibásodási ráta és a $\Theta/T/$ MTBF becslését a következő képletek adják:

$$\hat{Z}/T/ = \hat{\alpha}\hat{\beta}\hat{T}^{\hat{\beta}-1} és \hat{\theta}/T/ = \frac{1}{\hat{Z}/T/}. \quad (12)$$

6.2 Maximum likehood becslés csoportosított adatok esetén

Ha nem ismert pontosan az egyes meghibásodások időpontja, de ismert az, hogy a megfigyelési szakasz d számú intervallumra osztható fel, amelyek közül az i-ediknek a végpontjait t_{i-1} és t_i jelöli, valamint $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq ... \leq t_{i-1} \leq t_i \leq ... \leq t_d$.

Tegyük fel, hogy az i-edik intervallumban N_i számú meghibásodást figyeltek meg és

$$\sum_{i=1}^{d} N_i = N.$$

A szomszédos intervallumokat egyesítjük, ha kell úgy, hogy mindegyik intervallumba legalább 5 meghibásodás essék. Első lépésként kiszámítjuk a következő statisztikát:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{d} \frac{/N_i - \varsigma_i N/^2}{\varsigma_i N} \quad (13)$$

ahol

$$\varsigma_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{t_d}. \quad (14)$$

A χ^2 statisztika közelítőleg χ^2-eloszlású, a szabadságfokok száma d-í, ha a meghibásodások időpontjai homogén Poisson-folyamatot alkotnak. Ezért ha $\chi^2_{1-\alpha}/d-1/$ jelöli a $/d$-1/ szabadságfokú χ^2-eloszlás (1-α/100 %-os szignifikancia pontját, akkor ha

$$\chi^2 \geq \chi^2_{1-\alpha}/d-l/, \quad (15)$$

akkor ez arra utal, hogy megbízhatóságnövekedés, vagy -csökkenés van és az elemzést továbbfolytatjuk.

Ha viszont

$$\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha}/d-i/, \tag{16}$$

akkor α -szignifikancia szinten nincs bizonyíték arra, hogy a megbízhatóság változik, ezért a homogén Poisson-folyamat feltevése helytálló. $\chi^2_{1-\alpha}/d$-1/ értékéit táblázat tartalmazza (ld. például [3]).

Ha (15) egyenlőtlenség teljesül, akkor iterációval a következő egyenlet megoldásából számítjuk ki β maximum likelihood becslését:

$$\sum_{i=1}^{d} N_i \left[\frac{t_i^{\hat\beta} \ln t_i - t_{i-1}^{\hat\beta} \ln t_{i-1}}{t_i^{\hat\beta} - t_{i-1}^{\hat\beta}} - \ln t_d\right] = 0 \tag{17}$$

Ezt követően α becslését számítjuk ki:

$$\hat\alpha = \frac{N}{-}; \qquad N = \sum^{d} N_i \tag{18}$$

$Z/T/$ és $\Theta/T/$ becslését pedig a következő képletek adják:

$$\hat Z/T/ = \hat\alpha\hat\beta T^{\hat\beta-1} és \hat\Theta/T/ = \frac{1}{\hat Z/T/}. \tag{19}$$

1. táblázat

A Cramer-von Mises illeszkedésvizsgálati próba kritikus értékei 10 %-os szignifikancia szinten

M^*	A statisztika kritikus értéke
3	0,154
4	0,155
5	0,160
6	0,162
7	0,165
8	0,165
9	0,167
10	0,167
11	0,169
12	0,169
13	0,169
14	0,169
15	0,171
16	0,171
17	0,171
18	0,171
19	0,171
20	0,172
30	0,172
60	0,173
100	0,173
Nagyobb M értékek esetén	0,173

* I. típusú vizsgálatra $M^* = M$
II. típusú vizsgálatra $M^* = M$-1

6.3 Illeszkedésvizsgálat

a/ Az egyes meghibásodások időpontjai ismertek. Először β becslését számítjuk ki a (10) képletből. Ezt követően a következő képletből meghatározzuk az alábbi statisztikát:

$$C^2/M/ = \frac{1}{12M} + \sum_{i=1}^{M}\left[\left(\frac{T_i}{T}\right)^{\beta} - \frac{2i-1}{2M}\right]^2 \tag{20}$$

ahol $M=N$ és $T=T^*$1. típusú vizsgálat esetén; $M=N$-1 és $T=T_N$ II. típusú vizsgálat esetén $(T_1 \leq T_2 \leq \ldots \leq T_N)$ Az *1. táblázat* megadja ennek a statisztikának kritikus értékeit 10 %-os szignifikancia szintre. Ha a (20) alatti képlet szerinti $C^2/M/$ ennél nagyobb, akkor a hatványfüggvény modellre vonatkozó feltevést vissza kell utasítani. Ellenkező esetben a modell elfogadható.

b/ Csoportosított meghibásodási időpont adatok
A (17) képletből iterációval meghatározzuk β becslését. Mivel az i-edik intervallumban a meghibásodások várható száma:

$$e_i = N\frac{t_i\hat\beta - t_{i-1}^{\hat\beta}}{t_d^{\hat\beta}} = \hat\alpha/t_i^{\hat\beta} - t_{i-1}^{\hat\beta}/, \tag{21}$$

ezért

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{d}\frac{(N_i - e_i)^2}{e_i} \tag{22}$$

statisztika közelítőleg χ^2 -eloszlású (d-2) szabadságfokkal. Ha ez a (22) képlet által adott statisztika meghaladja a 10 %-os szignifikancia szinthez tartozó kritikus értéket, amely táblázatból határozható meg (ld. [3]), akkor a hatványfüggvénnyel való közelítés modelljét vissza kell utasítani. Ellenkező esetben a feltevés elfogadható.

6.4 Konfidencia határok a β alakparaméterre

A/ A MEGHIBÁSODÁSOK IDŐPONTJAI ISMERETESEK
Ha először kiszámítjuk a β becslést (10)-ből és $\chi^2_{0,05}/2N/$ illetve $\chi^2_{0,95}/2N/$ jelöli a $2N$ szabadságfokú χ^2 -eloszlás megfelelő kvantiliseit, akkor 90 %-os kétoldali határok β-ra a következők:

I. típusú vizsgálat:

$$\beta_{alsó} = \frac{\chi^2_{0,05}/2N/}{2/N-1/}\cdot\hat\beta, \tag{23}$$

$$\beta_{felső} = \frac{\chi^2_{0,95}/2N/}{2/N-1/}\cdot\hat\beta, \tag{24}$$

II. típusú vizsgálat:

$$\beta_{alsó} = \frac{N\chi^2_{0,05}/2N-2/}{2/N-1//N-2/}\cdot\hat\beta, \tag{25}$$

$$\beta_{felső} = \frac{N\chi^2_{0,95}/2N-2/}{2/N-1//N-2/} \cdot \hat{\beta}, \tag{26}$$

B/ CSOPORTOSÍTOTT ADATOK

Számítsuk ki β-t (20)-ből.

Ezt követően számítsuk ki a

$$P_i = \frac{t_i}{t_d} \; /i = 1,\dots,d/$$

mennyiségeket.

Számítsuk ki az

$$A = \sum_{i=1}^{d} \frac{[P_i^{\hat{\beta}} \, In P_i^{\hat{\beta}} - P_{i-1}^{\hat{\beta}} \, In P_{i-1}^{\hat{\beta}}]^2}{P_i^{\hat{\beta}} - P_{i-1}^{\hat{\beta}}} \tag{27}$$

mennyiséget. Képezzük a $C = \frac{1}{\sqrt{A}}$ számot.

2. táblázat

Kétoldali 90 %-os konfidencia intervallumok az MTBF-re I. típusú vizsgálat esetén

N	L	U	N	L	U
3	0,175	6,490	21	0,570	1.738
4	0,234	4,460	22	0,578	1.714
5	0,281	3,613	23	0,586	1,692
6	0,320	3,136	24	0,593	1,672
7	0,353	2,826	25	0,600	1,653
8	0,381	2,608	26	0,606	1,635
9	0,406	2,444	27	0,612	1,619
10	0,428	2,317	28	0,618	1,604
11	0,447	2,214	29	0,623	1,590
12	0,464	2,130	30	0,629	1,576
13	0,480	2,060	35	0,652	1.520
14	0,494	1,999	40	0.672	1,477
15	0,508	1,947	45	0.689	1.443
16	0,521	1,902	50	0.703	1,414
17	0,531	1,681	60	0,726	1,369
18	0,543	1,825	70	0,745	1,336
19	0,552	1,793	80	0,759	1.311
20	0,561	1,756	100	0.783	1,273

$N > 100$ **esetén**

$$L = \frac{N-1}{N} \cdot \left(1 + u_{0,5+\frac{\gamma}{2}} / \sqrt{2N}\right)^{-2};$$

$$U = \frac{N-1}{N} \cdot \left(1 - u_{0,5+\frac{\gamma}{2}} / \sqrt{2N}\right)^{-2}$$

$u_{0,5+\frac{\gamma}{2}}$ a standardizált normális eloszlás $100(0,5+\frac{\gamma}{2})$ százalékos **kvantilise**

3. táblázat

Kétoldali 90 %-os konfidencia intervallumok az MTBF-re II. típusú vizsgálat esetén

N	L	U	N	L	U
3	0,175	6.490	21	0,570	1,738
4	0.234	4.460	22	0,578	1,714
5	0,281	3,613	23	0,586	1,692
6	0,320	3.136	24	0,593	1,672
7	0,353	2.826	25	0,600	1,653
8	0,381	2.608	26	0,606	1,635
9	0.406	2.444	27	0,612	1,619
10	0,428	2,317	28	0,618	1,604
11	0.447	2,214	29	0,623	1,590
12	0,464	2.130	30	0,629	1,576
13	0.480	2.060	35	0,652	1,520
14	0.494	1.999	40	0.672	1,477
15	0.508	1.947	45	0,689	1,443
16	0.521	1,902	50	0.703	1,414
17	0.531	1.861	60	0,726	1,369
18	0.543	1.861	70	0,745	1,336
19	0.552	1.793	80	0,759	1,311
20	0.561	1.765	100	0,783	1,273

$N > 100$ **esetén**

$$L = \frac{N-2}{N} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{2}{N}} u_{0,5+\frac{\gamma}{2}}\right]^{-1}$$

$$U = \frac{N-2}{N} \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{2}{N}} u_{0,5+\frac{\gamma}{2}}\right]^{-1}$$

$u_{0,5+\frac{\gamma}{2}}$ a standardizált normális eloszlás $100(0,5+\frac{\gamma}{2})$ százalékos kvantilise

Közelítő 90 %-os kétoldali konfidencia határok β-ra a következők:

$$\beta_{alsó} = \hat{\beta}/1 - S/, \tag{28}$$

$$\beta_{felső} = \hat{\beta}/1 + S/, \tag{29}$$

ahol $S = \frac{1,64 \cdot C}{\sqrt{N}} /N$ = az összes meghibásodási szám).

6.5 Konfidencia határok az MTBF-re

A/ A MEGHIBÁSODÁSOK IDŐPONTJA ISMERT

Kiszámítjuk $\Theta/T/$-t (12)-képletből, a 2. *táblázatból* (I. típusú vizsgálat), vagy a *3. táblázatból* (II. típusú vizsgálat) meghatározzuk az L és U értékeket az N szám függvényében, így a következő kétoldali 90 %-os konfidencia határokat kapjuk Θ $/T/$-re:

$$\Theta_{alsó}/T/ = L\hat{\Theta}/T/, \qquad (30)$$

$$\Theta_{felső}/T/ = U\hat{\Theta}/T/. \qquad (31)$$

B) CSOPORTOSÍTOTT MEGHIBÁSODÁSI ADATOK

Számítsuk ki $\Theta/T/$-t (19)-ből és A-t (27)-ből.

Képezzük a

$$D = \sqrt{\frac{1}{A} + 1} \qquad (32)$$

mennyiséget. Közelítő 90 %-os kétoldali konfidencia intervallum Θ $/T/$-re a következő:

$$\Theta_{alsó}/T/ = \left(\frac{1,64 \cdot D}{\sqrt{N}} - 1\right)\hat{\Theta}/T/, \qquad (33)$$

$$\Theta_{felső}/T/ = \left(\frac{1,64 \cdot D}{\sqrt{N}} - 1\right)\hat{\Theta}/T/, \qquad (34)$$

6.6 A meghibásodási intenzitás előrevetítése

A következő előrevetítési módszer akkor alkalmazható, ha a korrigáló módosításokat csak a vizsgálat végén építik be a rendszerbe és így csak késleltetett módosításoknak tekinthetők. A cél, becsülni a rendszer megbízhatóságát a módosítások bevezetése után.

Első lépésként szétválasztjuk az "A" és "B" típusú kategóriába tartozó meghibásodásokat. Az "A" típusú meghibásodások esetén a módosítások nem eredményeznek megbízhatóságnövelést. A "B" típusú meghibásodások bekövetkezésének mértékét a módosítások csökkentik.

Második lépésként a "B" kategóriájú meghibásodások minden egyes típusára (ezek száma legyen J) meghatározzuk azok első bekövetkezési időpontját.

Harmadik lépésben meghatározzuk β becslését (10) képletből.

Negyedik lépésben mindegyik "B" kategóriájú meghibásodási típushoz hozzárendelünk egy E_i számot ($i=1$, 2, ...,J), amely a megbízhatóság növelés hatékonysági tényezője, amely minden egyes "B" meghibásodási típusra megadja, hogy milyen arányban javul a meghibásodási sűrűség (intenzitás) a korrigáló módosítások hatására, így $0 \leq E_i \leq 1$ teljesül. Ebből kiszámítható az átlagos E megbízhatóságnövelési hatékonysági tényező, vagy annak műszaki előbecslése (például 0,7) is megadható.

Az előrevetített meghibásodási intenzitást a következő képlet adja meg:

$$Z_P = \frac{1}{T}\left[K_A + \sum_{i=1}^{J} K_i/1 - E_i/ + I\hat{\beta}\bar{E}\right] \qquad (35)$$

ahol K_A az "A" kategóriájú meghibásodások száma,

K_i a "B" kategóriába tartozó i-edik meghibásodási fajta megfigyelt meghibásodásainak száma;

$T = T^*$ vagy T_N.

Ha E_i helyett csak E áll rendelkezésre, akkor a 2. tag a (35)-ben

$$K_B(1-E),$$

ahol K_B a "B" kategóriájú meghibásodások száma.

Az előrevetített MTBF

$$\Theta_P = [Z_P]^{-1}. \qquad (36)$$

6.7 Példák

6.7.1 Tekintsünk egy vizsgálatot, amely 1000 óráig tart.

Ennek során megfigyeljük az egyes meghibásodások pontos időpontjait. Az adatokat a 4. táblázat foglalja össze. A meghibásodások száma: N = 52. Ez ún. I. típusú (meghatározott idejű) vizsgálat. Ha a vizsgálatot az 52. meghibásodás időpontjában T_{52} = 975 óránál fejezzük be, akkor az ún. II. típusú vizsgálatot (adott meghibásodási számig tartó) vizsgálatot kapjuk.

4. táblázat

I. típusú vizsgálat, a meghibásodások időpontjai N = 52 meghibásodásra és T = 1000 óra vizsgálati időre

2	4	10	15	18	19	20	25	39
41	43	45	47	66	88	97	104	105
120	196	217	219	257	260	281	283	289
307	329	357	372	374	393	403	466	521
556	571	621	628	642	684	732	735	754
792	803	805	832	836	873	975		

Számítsuk ki a megbízhatósági jellemzőket mindkét esetben.

6.7.1.1 I. TÍPUSÚ VIZSGÁLAT: A MEGHIBÁSODÁSI IDŐPONTOK ISMERTEK

T^* = 1000 óra

a/ Az első kérdés van-e *megbízhatóságnövelés*?

A (4) képletnek megfelelően kiszámíthatjuk az U statisztikát:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{52} T_i - 52\frac{1000}{2}}{1000\sqrt{\frac{52}{12}}} = -3,713$$

Mivel 0,20 szignifikancia szinten a kétoldali próba határai ±1,28, U <-3,713 <-1,28, így megbízhatóságnövelés van és az értékelést folytatjuk.

b/ A paraméterek becslése.

A (8), (10) és (11) képletekből kapjuk, hogy

$$S_1 = \sum_{i=1}^{N} In/T^*/T_i/ = \sum_{i=1}^{52} In/1000/t_i/ = 88,9587$$

$$\hat{\beta} = \frac{N-1}{S_1} = \frac{51}{88,9587} = 0,5733,$$

$$\hat{\alpha} = \frac{N}{(T^*)^{\beta}} = \frac{52}{/1000/^{0,5733}} = 0,9910.$$

c/ A pillanatnyi meghibásodási intenzitás és az MTBF-becslés a (12) képletből

A $Z/T/$ meghibásodási intenzitás a következő:

$$Z/t/ = \hat{\alpha}\hat{\beta}t^{\hat{\beta}-1} = 0,9910 \cdot 0,5733t^{-0,4266}.$$

A pillanatnyi MTBF:

$$\Theta/t/ = Z^{-1}/t/.$$

1000 órára az MTBF: 33,5 óra

d/ *Illeszkedésvizsgálat*

A (20) képletből:

$$C^2/52/ = \frac{1}{12 \cdot 52} + \sum_{i=1}^{52}\left[\left(\frac{T_i}{1000}\right)^{0,5733} - \frac{2i-1}{2 \cdot 52}\right]^2 = 0,038.$$

$/M = 52/.$

0,10 szignifikancia szinten $M = 52$ esetén az 1. táblázatban a kritikus érték: 0,173. Mivel $C^2/52/ < 0,173$, a hatványfüggvény-modellt elfogadjuk.

e/ Konfidencia intervallum β -ra

A (23) és (24) képletekből és a χ^2 - táblázatból (ld. [3]) adódóan a kétoldali 90 %-os konfidencia intervallum határai β -ra:

$$\beta_{alsó} = \frac{\chi^2_{0,05}/2 \cdot 52}{2 \cdot /52-1/} \cdot 0,5733 = 0,4491.$$

$$\beta_{felső} = \frac{\chi^2_{0,95}/2 \cdot 52}{2 \cdot /52-1/} \cdot 0,5733 = 0,7101.$$

f/ Konfidencia intervallum az MTBF-re

Az 1000 órás MTBF-re 90 %-os kétoldali konfidencia intervallum határai a (30) és (31) képletekből, valamint a 2. táblázatból adódóan a következő:

$$\Theta_{alsó}/1000/ = L.\hat{\Theta}/1000/ = 0,705 \cdot 33,5 = 23,7 \text{ óra}$$

$$\Theta_{felső}/1000/ = U.\hat{\Theta}/1000/ = 0,405 \cdot 33,5 = 47,1 \text{ óra}$$

6.7.1.2 II. TÍPUSÚ VIZSGÁLAT - A MEGHIBÁSODÁSI IDŐPONTOK ISMERTEK

Ekkor a vizsgálat $T_{52} = 975$ óráig tart.

a/ Az első kérdés van-e megbízhatóságnövekedés?

Az (5) képletből kiszámíthatjuk az U statisztikát

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{51} T_i - 51 \cdot 975}{975 \cdot \sqrt{\frac{51}{12}}} = -3,764.$$

Mivel $U = -3,764 < -1,28$ (kritikus érték kétoldali 80 %-os próba esetén), ezért a megbízhatóságnövekedést elfogadjuk, az értékelést folytatjuk.

b/ A paraméterek becslése

A (9), (10) és (11) képletekből kapjuk, hogy

$\alpha = 0,9487;$

$\beta = 0,5818.$

c/ A pillanatnyi meghibásodási intenzitás és a pillanatnyi MTBF

A $Z/t/$ meghibásodási intenzitás: $Z/t/ = 0,9487 \cdot 0,5818 \cdot t^{-0,4192} \cdot \Theta/t/ = Z^{-1}/t/ \cdot$

$t = 975$ óránál az MTBF = 32,2 óra.

d/ Illeszkedésvizsgálat

A (20) képletből

$$C^2/51/ = \frac{1}{12,51} + \sum_{i=1}^{51}\left[\left(\frac{T_i}{975}\right)^{0,5818} - \frac{2i-1}{251}\right]^2 = 0,041$$

Mivel az 1. táblázatból a kritikus érték 0,173, így $C^2/51/ = 0,041 < 0,173$, tehát a hatványfüggvénymodellt elfogadjuk.

e/ Konfidencia intervallum β -ra

A (25) és (26) képletekből és χ^2 -táblázatból (ld. [3]) kapjuk, hogy 90 %-os kétoldali intervallum határai a következők:

$$\beta_{alsó} = \frac{52 \cdot \chi^2_{0,05}/2 \cdot 52 - 2/}{2/52-1//52-2/} 0,5818 = 0,4646$$

$$\beta_{felső} = \frac{52 \cdot \chi^2_{0,95}/2 \cdot 52 - 2/}{2/52-1//52-2/} 0,5818 = 0,7347.$$

f/ Konfidencia intervallum az MTBF-re

A (30) és (31) képletekből, valamint a 3. táblázatból kapjuk a következő 90 %-os kétoldali határokat az 1000 órás MTBF-re.

$\Theta_{alsó}$ (1000) = 0,7214 · 32,2 = 23,4 óra

$\Theta_{felső}$ (1000) = 1,3902 · 32,2 = 44,8 óra.

6.7.1.3 CSOPORTOSÍTOTT MEGHIBÁSODÁSI IDŐ ADATOK

A 4. táblázatban közölt adatokat vonjuk össze 2000 órás időszakaszonként, így kapjuk az 5. *táblázatot*. Értékeljük ki az így adódó megbízhatósági jellemzőket.

5. táblázat

A 4. táblázatból kapott csoportosított adatok

Csoportszám (i)	Meghibásodások száma (N_i)	Vizsgálati idő órában az egyes csoportok végpontjában	$\zeta_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{t_5}$
1	20	200	0,2
2	13	400	0,2
3	5	600	0,2
4	8	800	0,2
5	6	1000	0,2

a/ Van-e megbízhatóságnövekedés (vagy csökkenés)?
Számítsuk ki a (13) és (14) képletből az x^2 -statisztikát:

$$\chi 2 = \sum_{i=1}^{5} \frac{/N_i - \varsigma_i N/^2}{\varsigma_i N} = 595 \qquad \text{(a szabadságfokok száma } \underline{d}\text{-1 = 4).}$$

Mivel a 0,2 szignifikancia szinten a kritikus χ^2-érték 6,0, ezért a $\chi^2 > 6,0$ miatt a megbízhatóságnövekedés, vagy -csökkenés ténye elfogadható.
b/ Paraméterbecslés
A (17x), (18) képletekből kapjuk, hogy

$\beta = 0,5777$, $\alpha = 0,9615$
c/ Pillanatnyi MTBF
Az 1000 órára vonatkozó MTBF = 33,5 óra.
d/ Konfidencia intervallum β -ra és az MTBF-re
A (27), (28) és (29) képletekből kapjuk, hogy
$\beta_{\text{alsó}} = 0,3202$; $\beta_{\text{felső}} = 0,8351$ 90 %-os szinten.
A (32)-(34) képletekből adódik, hogy $\Theta_{\text{alsó}}$ /1000/ = 16,6 óra, $\Theta_{\text{felső}}$ /1000/ = 49,9 óra 90 %-os konfidencia szinten.

6.7.1.4 AZ ELŐREVETÍETT MEGBÍZHATÓSÁGI BECSLÉSEK

Ha a korrigáló módosításokat késleltetve, a vizsgálat végén vezetik be a rendszerbe, akkor a következő számításokat kell elvégezni.

6. táblázat

"A" és "B" kategóriájú meghibásodások adatai

Vizsgálati idő: 1000 óra $N = 45, K = 13, K_B = 32$ $I = 16$

1-Típus	150	253	475	540	564	636	722	871	996
	B1	B2	B3	B4	B5	A	B5	A	B6
1-Típus	1003	1025	1120	1209	1255	1334	1647	1774	1927
	B7	A	B8	B2	B9	B10	B9	B10	B11
1-Típus	2130	2214	2293	2448	2490	2508	2601	2635	2731
	A	A	A	A	B12	A	B1	B8	A
1-Típus	2747	2850	3040	3154	3171	3206	3245	3249	3420
	B6	B13	B9	B4	A	A	B12	B10	B5
1-Típus	3502	3646	3649	3663	3730	3794	3890	3949	3952
	B3	B10	A	B2	B8	B14	B15	A	B16

Az alapadatokat a *6. táblázat* foglalja össze. Összesen $N = 45$ meghibásodás van. Ebből $K_A = 13$ az "A" kategóriájú meghibásodások száma (ezekre korrigáló módosításokat nem végeznek, számuk sem csökkenthető). A 4000 órás vizsgálat végén $I = 16$-féle korrigáló módosítást építenek be a rendszerbe, a $K_B = 32$ "B" kategóriájú meghibásodás kiküszöbölése, vagy számuk csökkentése érdekében. A 6. táblázatban minden meghibásodás esetében feltüntetjük a kategóriát. A "B" kategóriájú meghibásodások esetében feltüntetjük az egyes meghibásodások típusát is ($i = 1,...,16$). A *7. táblázat* további információkat ad az előrevetített megbízhatósági jellemzők számításához. A számítások menete a következő:

7. táblázat

A "B" kategóriájú, különböző típusok 6. táblázatból kapott adatai, a megfigyelt meghibásodások száma és a hatékonysági tényezők

Meghibásodási típus (i)	Meghibásodási időpontok /óra	Első meghibásodás időpontja	Meghibásodások száma	Hatékonysági tényező (E_i)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	150,2601	150	2	0,7
2	253,1209,3663	253	3	0,7
3	475,3502	475	2	0,8
4	540,3154	540	2	0,8
5	564,722,3420	564	3	0,9
6	996,2747	996	2	0,9
7	1003	1003	1	0,5
8	1120,2635,3730	1120	3	0,8
9	1255,1647,3040	1255	3	0,9
10	1334,1774,3249,3646	1334	4	0,7
11	1927	1927	1	0,7
12	2490,3245	2490	2	0,6
13	2850	2850	1	0,6
14	3794	3794	1	0,7
15	3890	3890	1	0,7
16	3952	3952	1	0,5

a/ Meghatározzuk "A" és "B" kategóriájú meghibásodásokat. A 6. táblázat ezt a felosztást megadja. A 16 "B" kategóriájú meghibásodási típus meghibásodási időpontjai a 7. táblázat 2. oszlopában láthatók.
b/ Meghatározzuk a különböző "B" kategóriájú meghibásodási típusok első bekövetkezésének időpontját (ld. 7. táblázat 3. oszlopa).
c/ Az első meghibásodások adatainak elemzése
A 7. táblázat 3. oszlopában szereplő adatokra a paraméterbecslések (ld. (9)-(11) képletek):
$\alpha = 0,0329$, $\beta = 0,7472$. Ezt követően a "B" kategóriájú különböző meghibásodások első előfordulásának időpontjaira meghatározzuk a meghibásodási intenzitást. Ez a következő:
$Z/t/ = 0,0329 \cdot 0,7472 \cdot t^{-0,2528}$
400 órára (a vizsgálat végén):
$Z/4000/ = 0,0032$.

Az illeszkedésvizsgálatot elvégezzük a 6.3. pontokban leírtak szerint C^2 (16) = 0,085 < 0,171, ezért a hatványfüggvényre vonatkozó feltevést elfogadjuk.
d/ A hatékonysági tényezők
Az egyes korrigáló módosításokra vonatkozó hatékonysági tényezők a 7. táblázat 5. oszlopában láthatók. Ennek a 16 hatékonysági tényezőnek az átlaga 0,72.
e/ Az előrevetített meghibásodási intenzitás becslése
A (35) képletben szereplő tényezők meghatározása:

T = 4000; K_A = 13; I = 16; β = 0,7472; E = 0,72; K_i és E_i értékei a 7. táblázat 4. és 5. oszlopában vannak. Az előrevetített meghibásodási intenzitás 4000 óránál:

$$Z_p/4000/ = \frac{1}{4000}\left[13 + \sum_{i=1}^{16} K_i/1 - E_i/+ +16 \cdot 0,7472 \cdot 0,72\right] = 0,0074.$$

f/ Az előrevetített MTBF 4000 óránál 135,1 óra.

Megjegyzés:

Ha nem lett volna meghibásodás-növelés, akkor a 4000 órás vizsgálat után az MTBF $\frac{4000}{45}$ = 88,9 óra lett volna. Az előrevetített MTBF mutatja a ló korrigáló módosítás és a megfelelő hatékonysági tényezők következtében fellépő MTBF növekedést. Ez a növekedés érzékeny a hatékonysági tényezők változásával szemben. Ha az átlagos hatékonysági tényező 0,6 lett volna, akkor az MTBF előrevetített értéke 4000 óránál csak 121,3 óra lett volna és a 0,8 átlagos hatékonysági tényező pedig 138,1 óra előrevetített MTBF-et eredményezett volna.

IRODALOM

[1] IEC 56(CO)122: Reliability improvement and growth programmes, 1986

[2] IEC 56(CO)150: Reliability growth models and estimation methods, 1989

[3] Balogh, A. - Dukáti, F. - Sallay, L.: Minőségellenőrzés és megbízhatóság, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.