

Rendszerek megbízhatósági tervezése elektronikai alkatrészek előrejelzési modelljeinek felhasználásával

BALOGH ALBERT (MEV) – GERLAI MÁTYÁS (Videoton)



ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány áttekinti a rendszerek megbízhatósági tervezésének legfontosabb területeit. Az adott megbízhatósági követelmények kielégítése szükségessé teszi a tervezési, gyártási és szervizelési tevékenységek összehangolását. A megbízhatóság-tervezés egyik módszere az elektronikai alkatrészek előrejelzési modelljein alapszik. Ezeknek a modelleknek értékelésére matematikai-statisztikai módszereket kell felhasználni. A tanulmány a különböző adatforrásokból származó meghibásodási ráták összevont becslését és a modellek aktualizálási eljárásait ismerteti. Adott konfidenciásintű megbízhatósági előrejelzés elérésének érdekében szoros együttműködést kell kialakítani az elektronikai alkatrészek gyártói és felhasználói között.

Bevezetés

Az elektronikai berendezésekkel szemben az utóbbi két évtizedben a felhasználók egyre fokozottabb megbízhatósági igényeket támasztottak. Ezek a felhasználói követelmények szükségessé tették, hogy a berendezések gyártója a tervezés, a gyártás és a felhasználás szakaszában biztosítsa a termékétől megkövetelt hosszú idejű hibamentes működést, a javíthatóságot és a tartósságot. Ezeknek a célkitűzéseknek eléréséhez összehangoltan kell felhasználnia a tervezési, a gyártási és a vevőszolgálati tevékenységet, illetve az ezek során alkalmazandó megbízhatóság-biztosítási módszerek alkalmas kombinációját.

A jelen közleményben a berendezésgyártó megbízhatóság-biztosítási tevékenységének követelményeiből kiindulva, röviden áttekintjük a rendszerek tervezésével kapcsolatos általános feladatokat, kitérve a rendszer tervezőjének megbízhatósági megfontolásaira, gyakorlati tevékenységére, majd a megbízhatósági tervező munkát elősegítő eszközökre. Ezt követően részletesebben ismertetjük az alkalmazható tervezési módszerek egyikének — a megbízhatósági (hibamentességi) jellemzők előrejelzésének — értékelési kérdéseit elektronikai alkatrészek megbízhatósági modelljével illusztrálva.

A feladat eredményes megoldásával elkerülhető, hogy egy esetleg megalapozatlan és így helytelen előrejelzés tévútra vezesse mind a konstruktőröket, mind a gyártót, illetve a karbantartást szervező szakembereket.

Meghatározott megbízhatósági követelményeket kielégítő berendezések és rendszerek tervezésének kérdései

1.1. A rendszer megbízhatósági tervezés általános kérdései

Az elektronikai és a hozzá kapcsolódó konstrukciós elemek fejlődése az utóbbi két évtizedben megbíz-

BALOGH ALBERT

Matematikus, 1957-ben végzett a debreceni Kosuth Lajos Tudományegyetemen. 1961 óta foglalkozik az elektronikai alkatrészek megbízhatóságának értékelésével a HIKI-ben, majd 1982 óta a MEV-ben. Jelenleg a MEV megbízhatóság vizsgálati főosztály főosztályvezető-helyettese.

A témakörben közel 50 publikációt jelentetett meg, illetve számos előadást tartott. 1981-ben az EOQC Quality folyóiratának EQ-díját kapta meg „Rendszer megbízhatóság-előjelzés” című tanulmányáért. A HTE elnökségi tagja, a megbízhatósági osztály titkára, 1976-ban Puskás Tivadar díjat kapott.

hatósági vonatkozásban olyan mértékű volt, hogy a berendezések és rendszerek megbízhatósági paramétereket is figyelembe vevő tervezése tért hódíthatott a polgári, illetve az ipari területeken is.

Mindennaposává vált a közszükségleti (az esetek nagy részében divat jellegű behatások alatt álló) termékekénél az erkölcsi elavulás és a fizikai élettartam összehangolásának szükségessége. A világ nagy rádió-, tv- stb. gyárai elterjedten alkalmazzák — elsősorban költségoptimalizálási céltól vezéreltetve — azt az alapvető, hogy készülékük élettartama ne legyen „feleslegesen” lényegesen hosszabb (és a készülék ennél fogva drágább), mint annak divat által megszabott elavulási időtartama.

Ebben az esetben az élettartam jellegű megbízhatósági jellemző a konstruktőrök által kézben tartandó probléma.

Más esetben, így az automatizált iparban, folyamatirányításban, közlekedésben stb. alapvetővé vált a biztonsági követelmények, illetve a rendszer bonyolultság és nagyság ugrásszerű megnövekedése, amely a hibamentességi jellemzők (pl. a két meghibásodás között eltelt működési idő, vagy a két tévesztés között átvitt helyes információ mennyisége) kézben tartását követeli meg.

Ily módon ezeken a területeken az egyik alapvető tervezési szemponttá vált a megbízhatóságot jellemző hibamentességi mutatók meghatározása, biztosítása és ellenőrzése.

Figyelembe véve a megbízhatóság kísérlet útján történő meghatározási, illetve ellenőrzési módszereinek idő- és költségigényét, valamint ezek egyre növekvő jellegét (az elemek elérhető alacsony meghibásodási rátája miatt), életbevágóan fontossá válik egy magas konfidencia szintű, az utólagos értékelés mérlegén is mindig helytálló megbízhatóság előrejelzési rendszer létrehozása.

Béerkezett: 1984. VI. 6. (▲)

1.2. A konstruktőr megbízhatóságbiztosítási megfontolása

Egy ipari, irányítási, vezérlési, adatfeldolgozási feladat minden esetben meghatározott funkciók halmazát jelenti, amelyet a feladat részletezése során rendszerterv vagy berendezés tervcél tanulmány formájában fogalmazznak meg. Az irányító, vezérlő, adatfeldolgozó rendszerek ma már egyre több elektronikus intelligenciát foglalnak magukba, illetve a klasszikus huzalozott elektronikai hardware egyszerűen megvalósítható mikroprocesszor vezérlés alkalmazásával.

Így általában a tervező a megbízhatósági kérdések kapcsán a hardware, illetve a software megbízhatóságával egyaránt kénytelen foglalkozni.

Jelen tanulmányban csupán a hardware megbízhatósági kérdéseivel foglalkozunk.

A HARDWARE RENDSZER MEGBÍZHATÓSÁGI VISELKEDÉSÉNEK LEÍRÁSA

A napjainkban használatos vezérlő, irányító, adatgyűjtő, illetve adatfeldolgozó rendszerek rendszer-technikailag meglehetősen bonyolultak lehetnek. Megbízhatósági vonatkozásban a rendszerek a tökéletes működőképesség és a teljes működésképtelenség között több, közbülső, csökkentett, illetve korlátozott teljesítőképességű állapotot vehetnek fel.

Gondoljunk ennek kapcsán csak a legszemléletesebb példákra, mint például az egy kieső hajtóművel még viszonylag biztonságosan közlekedő repülőgépre, egy kieső hengerrel még tovább működő gépkocsira vagy egy automata vezérlő szabályzórendszerre, amely automatika részének üzemzavara miatt kézi, emberi vezérlésű üzemmódban dolgozik tovább.

A példákban szereplő esetekben a rendszer csökkentett teljesítménnyel vagy erősen korlátozott tulajdonságokkal bizonyos ideig tovább dolgozhat.

A katasztrofális leállás elkerülését az eredetileg tervezett és megvalósított redundáns funkciók, illetve tartaléküzemmódok meglete teszi lehetővé.

Ezek a nagyméretű és bonyolult rendszerek azonban mindig felbonthatók egyszerű rendszerelemek meghatározott logikai kapcsolatban álló struktúrájára.

Ez a struktúra le is írható a formális logika eszköztárával. A továbbiakban ezeket az egyszerű elemeket, illetve a belőlük alkotott struktúrát kell vizsgálnunk.

A fenti példákban szereplő strukturális redundanciák mellett a rendszerbe beépíthetők az információ-redundanciák áramköri elemek tűrési, illetve terhelési redundanciái is.

Az összes, eddig felsorolt eset kezelhető az áramköri elemek — mint a konstruktőr számára tovább már nem osztható építőelemek — tulajdonságainak leírásával, illetve ezek terhelési redundanciájának kézbentartásával.

A rendszer részekre bontása és analízise során egy sor egyszerűsítő feltételt tehetünk, amelyekkel a probléma megoldását viszonylag egyszerű algebrai összefüggésekre vezethetjük vissza.

Kellően alacsony szintre jutva a struktúra lebontásával,

még megfogalmazhatók az alábbi egyszerűsítő feltételek:

— A rendszer elem csupán kétállapotú a megbízhatóság viselkedés szempontjából: működőképes, illetve meghibásodott.

— A rendszernek soros, párhuzamos, illetve vegyes kapcsolása jellemzi a rendszer részt, tehát logikailag egyszerű eszközökkel leírható a rendszer rész megbízhatósági modellje.

— Az elemek megbízhatósági viselkedését egy kezdetinek nevezhető munkapontban meghatározott hibamentességi jellemzők és a környezeti tényezők hatásait leíró függvények általában szorzat jellegű összefüggései adják meg.

Megjegyzések

— A gyakorlati életben, kisebb berendezések esetében a gondolatmenetet egyszerűbb végigvinni rendszer analízis helyett meghatározott ismert viselkedésű elemek szintéziseként.

— A szintézis a nagy redundáns rendszer teljes méretéig is folytatható, ha rendelkezünk a strukturális redundancia alapeseteit leíró matematikai összefüggésekkel. (Napjainkban már elég széles körben ismertek a különböző fajta tartalékolások értékelésének matematikai összefüggései.)

— Sok kisebb berendezés egyszerűen soros megbízhatósági modellel jellemezhető, s ennél fogva kétállapotú viselkedéssel írható le.

1.3. A konstruktőr gyakorlati tevékenysége

A konstruktőr tevékenysége során mindig az alábbi algoritmus szerint dolgozik:

— a tervezendő berendezés funkcióinak összességét rendszerezi,

— e funkciók halmazát igyekszik megvalósítani az arra alkalmas hardware és software elemek kombinálásával,

— a megtervezett berendezést valamilyen (ismert) technológiai környezetben, kölcsönhatásban előállíttatja,

— vagy még megvalósítás előtt matematikai eszközökkel, vagy a megvalósítás után kísérleti és/vagy matematikai eszközökkel ellenőrzi a megbízhatósági jellemzőket.

Amennyiben a jellemzők nem megfelelőek, egy javított konstrukciós változat tervezése — kipróbálása vagy kiszámítása lépésekből álló iterációt végez, illetve ismétel mindaddig, amíg a kívánt megbízhatósági értékeket el nem éri.

Mozgástere az alábbi területekre terjedhet ki:

— alkatrészválasztékból a megfelelő elemek kiválasztása,

— a terhelési redundanciák (aláterhelés, derating) alkalmazása,

— a környezet zavaró hatásainak csökkentése (szellőzéssel a környezeti hőmérséklet, különböző konstrukciós módszerekkel a külső zavarok hatásának kizárása stb.).

Megállapítható, hogy a konstruktőr tevékenysége közvetlen hatással van

— a hibamentességi jellemzőkre a fenti okfejtés szellemében,

— a javíthatósági jellemzőkre a diagnosztikai rendszer, illetve a különböző szinteken sikeres szervizelési tulajdonságok kialakításával,

— az élettartam jellemzőkre az alkatrészválaszték s az alkalmazott terhelések megválasztásakor.

A munka során — tisztán elektronikai, illetve

— elektromechanikai

elemek alkalmazására kerülhet sor.

Az elektromechanikai elemek megbízhatósági viselkedését

— a hasonló konstrukciók kísérleti eredményei ismeretében, vagy

— az alakfelismerés módszerrel értékelheti, illetve ellenőrizheti. (Erről röviden később még teszünk említést.)

Az elektronikai elemek viselkedésének leírására a jelen tanulmány további részeiben leírt modellezés megoldást választhatja.

1.4. A konstruktőr megbízhatósági tervező munkáját támogató háttér

Napjainkban világszerte egyre elterjedtebbek a számítógépes tervezést segítő eszközök.

Az építőipartól a gépkocsiiparig, a mikroelektronikai elem felépítésétől az elektronikai berendezések nyomtatott áramköri, illetve huzalozás tervezéséig találkozhatunk rész megoldásokkal. Természetesnek nevezhető az igény a fentebb vázolt konstruktóri iterációs folyamat számítógépes támogatása irányában.

Mi szükséges ennek megvalósításához?

1. A konstruktőr által felhasználható alkatrészek számítógépes adatbázisa mint iránymutató, de egyben korlátozó funkciót is ellátó választék.

2. A választékban szereplő alkatrészek családjait leíró megbízhatósági modell, illetve minden egyes alkatrészhez a független változók (igénybevételi sorok) valamilyen névleges értéke mellett hozzá rendelhető tényleges számérték (ez egyben a modell együttműködési kiindulási értékét is meghatározza).

3. Az alkatrészcsaládok terheléseivel kapcsolatos szorzó (igénybevételi sor) függvények, melyek a névlegestől eltérő terhelési esetekre leírják a változás jellegét és mértékét.

Megjegyzés: A fenti három adatbázis rész folyamatos karbantartást kíván. E tevékenységet általában nem a konstruktőrtől szokták megkívánni, hanem erre valamilyen módon folyamatos szolgáltatást szerveznek.

4. A megbízhatósági jellemzők számítóalgoritmusát megvalósító számítógépprogramok. (Ezeket általában egyszer kell elkészíteni.)

A fenti négy funkciót törekedett megvalósítani kutatás-fejlesztési együttműködés keretében a BME — HEI, a MEV megbízhatóság vizsgálati főosztálya, illetve a Videoton Elektronikai Vállalat SzT Gyár minőségellenőrzési főosztálya. A tervező számára on-line terminálos hozzáféréssel rendelkezésre fognak állni rövid időn belül azok a szolgáltatások, amelyek az adott megbízhatósági jellemzőt megvalósító tervezési tevékenységhez kellenek.

Ezen adatbázis létrehozásának egyes értékelési kérdéseivel foglalkozik a tanulmány további része.

GERLAI MÁTYÁS

Villamosmérnök, 1965-ben végzett a BME Villamosmérnöki Karának Híradástechnikai Szakán. 1965 óta a Videoton dolgozója. Kezdetben technológiai célú műszerfejlesztéssel foglalkozik, 1969 óta pedig a számítástechnikai termékek minőség- és megbízhatóság biztosításával. 1972 óta a Videoton Számítástechnikai Gyár minőségellenőrzési főosztályának vezetője. Fő tevékenységi területe a számítástechnikai eszközök minőség- és megbízhatóság biztosítási rendszerének szervezése és irányítása mind a hardware, mind a software területen. Műszaki-tudományos szakmai munkássága kiterjed az alkatrészek választékolására, az idegenáru ellenőrzés módszereire, a szűrővizsgálatokra, gyártásközi technológiai előírások-



re és ezek matematikai értékelésére, az üzemeltetési adatok számítógépes feldolgozására, a megbízhatóság előrejelzésére. Több publikációt jelentetett meg a fenti témakörökben. A tématerületen több nemzetközi együttműködési munkaszervet tagja, illetve szakmai irányítója. Rendszeresen részt vesz a megbízhatósági konferenciák szervezésében, az EOQC MNB választmányi tagja.

Elektronikai alkatrészek megbízhatóság- előrejelzési modelljeinek értékelési kérdései

II.1. A megbízhatóság-előrejelzés általános kérdései

Az előzőekben vázolt konstruktóri tevékenység szükségessé teszi, hogy a berendezések megbízhatósági jellemzőit már a tervezés szakaszában számítással meghatározzák. A megbízhatósági jellemzők közül a hibamentességi tulajdonságot mennyiségileg meghatározó egyik mutató (meghibásodási ráta vagy meghibásodások közötti átlagos működési idő) számításával foglalkozunk a továbbiakban.

A berendezés tervezőjének az előzőekből következőleg megbízhatósági adatokra van szüksége. Ezek ismeretében választhatja meg az értékelési eljárást. Ez többféle lehet:

a) hasonló típusú és rendeltetésű berendezések korábban megfigyelt és értékelt üzemeltetési adatainak felhasználása a tervezés során,

b) az alakfelismerés, illetve osztályba sorolás (cluster analysis) módszereinek alkalmazásával a tervezendő berendezés megbízhatóságának előrejelzése,

c) a klasszikus értelemben vett megbízhatóság-előrejelzési módszer alkalmazása, amelynek segítségével a berendezést alkotó részek (alkatrészek, részegységek) megbízhatósági adataiból számítják ki a tervezendő berendezés megbízhatóságát ismert matematikai-statisztikai és valószínűségszámítási módszerek alkalmazásával.

Az a) és b) módszer alkalmazásának hátránya, hogy nem tudja minden esetben követni az elektronikai alkatrészek rohamos fejlődésével járó techno-

lógiai-konstruktív módosításokat és az azokból adódó megbízhatósági adatösszetétel változásokat. Ezért az első két módszer főként mechanikai, elektromechanikai rendszerek esetében alkalmazható eredményesen, mivel ezeknek a rendszereknek esetében a technológiai változások hosszabb idő alatt mennek végbe, így a megbízhatósági adatok érvényességi időtartama is nagyobb.

Az elektronikai berendezések megbízhatóságát a nemzetközi szakirodalomban követett eljárásoknak megfelelően az alkatrészek megbízhatóságából számítják ki a klasszikus értelemben vett megbízhatóság-előrejelzési módszerrel.

A c) előrejelzési eljárás megköveteli, hogy a berendezés tervezője az eljárás alkalmazása során vegye figyelembe az egyes alkatrésztípusokra rendelkezésre álló összes megbízhatósági információt. Így többek között számításba kell vennie, hogy az alkatrészek technológiája, konstrukciója, bonyolultsága, minőségi osztálya (minősített-e vagy sem az alkatrész) hogyan befolyásolja az alkatrész megbízhatóságát, valamint a várható üzemeltetési feltételek (hőmérséklet, villamos igénybevétel, légnedvesség tartalom) és a berendezés alkalmazási környezete (földi, légi, tengeri környezet stb.) hogyan hat az alkatrész megbízhatóságára.

Mivel az alkatrészek megbízhatóságát számos tényező befolyásolja, ezért célszerű az elektronikai alkatrészek megbízhatóságát jellemző meghibásodási rátát (a meghibásodás feltételes valószínűségi sűrűségét) olyan függvénnyel leírni, amely ezeknek a tényezőknek együttes hatását adja meg. Ezt a meghibásodási ráta függvényt nevezik a szakirodalomban és a megbízhatósági kézikönyvekben [1, 2] alkatrész megbízhatóság-előrejelzési modellnek, illetve röviden megbízhatósági modellnek.

A jelen közlemény — a berendezésgyártók megbízhatósági követelményeiből kiindulva — ezeknek a modelleknek kialakításához szükséges értékelési módszereket foglalja össze. Az ismertetés során kitér a berendezésgyártók megbízhatósággal kapcsolatos tevékenységére, alkatrészek megbízhatósági adatforrásainak jellemzésére, a különböző adatforrásokból származó megbízhatósági jellemzők összevont értékelésére, az alkatrészek megbízhatósági modelljeinek elemzésére egyes alkatrész-kategóriák (mikroelektronikai eszközök és diszkrét alkatrészek) esetében, a modellek kialakításának matematikai-statisztikai eljárásainak tárgyalásán túlmenően foglalkozunk a modellek állandóinak időközönkénti felülvizsgálata során alkalmazandó aktualizálási (korszerűsítési) eljárásokkal is.

A tanulmányban ismertetésre kerülő módszereket a Videoton Számítástechnikai Gyára minőségfejlesztési főosztálya és a Mikroelektronikai Vállalat megbízhatóság vizsgálati főosztálya közötti kutatási-fejlesztési együttműködés keretében dolgozták ki. A kutatási-fejlesztési munka célja az volt, hogy a számítástechnikai eszközök megbízhatósági előrejelzéséhez szükséges alkatrész megbízhatósági adatokat és előrejelzési modelleket, valamint azok értékelési (aktualizálási) algoritmusait tartalmazó számítógépes megbízhatósági adatbank létrehozásához az elméleti alapokat kidolgozzák.

II.2. Az elektronikai alkatrészek megbízhatósági modelljei kialakításának elméleti alapjai

A berendezések megbízhatóságának gyakorlatilag megfelelő pontosságú előrejelzése megköveteli, hogy az alkatrészek megbízhatósági adatai olyanok legyenek, amelyek számításba veszik az alkatrész tervezési, gyártási tulajdonságaiból származó, megbízhatóságot befolyásoló tényezőket, valamint az alkatrész üzemeltetési alkalmazásának körülményeiből eredő, megbízhatóságot meghatározó tényezőket.

A nemzetközi és hazai szakirodalom [1, 2, 3] gyakorlatát követve az alkatrész megbízhatóságát a meghibásodási rátával jellemezzük, feltételezve, hogy az alkatrészek működési idejének valószínűségi eloszlása exponenciális eloszlás vagy azzal jól közelíthető. Ebben az esetben a meghibásodási ráta az idő függvényében állandó és azt szokásosan 10^{-6} /óra vagy 10^{-9} /óra = 1 fit egységben fejezik ki a szakirodalmi források. Az alkatrész megbízhatósági modellje ennek az állandó meghibásodási rátának a különböző igénybevételi és alkalmazási tényezőktől való függését írja le.

II.2.1. A megbízhatósági modell általános jellemzői

A meghibásodási ráta modell akkor ad megfelelő pontosságú előrejelzést, ha figyelembe veszi a következő tényezőket:

- az alkatrész konstrukciós tulajdonságai,
- az alkatrész gyártástechnológiája és annak megbízhatóságra gyakorolt hatása (a gyártási eljárás ellenőrzésének szigorúsági fokozata és a gyártás kiforrottsága),
- az alkatrész funkciói,
- az alkatrész meghibásodási módjai és a meghibásodáshoz vezető hibamechanizmusok,
- az alkatrész bonyolultsági foka (például az LSI áramkörök alkotó elemek száma, az elemek által ellátott funkciók),
- az alkatrész gyártása során alkalmazott vizsgálatok, a késztermékeken végzett minősítő és szűrővizsgálatok jellege és azok hatékonysága,
- a hőmérséklet, a villamos igénybevétel, a légnedvesség-tartalom hatása az alkatrész megbízhatóságára,
- az alkalmazási környezetnek (földi, légi, tengeri környezet) megbízhatóságra gyakorolt hatása,
- alkalmazási megfontolások.

Ezeknek a tényezőknek a függvényében az alkatrészek megbízhatósági modellje a megbízhatósági kézikönyvekben [1, 2] általában a következő alakú:

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \Pi_Q \Pi_E \Pi_A \cdot \Pi_n \quad (10^{-9}/\text{óra}), \quad (i)$$

ahol λ_p — az alkatrésztípus előrejelzett meghibásodási rátája,

λ_b — az ún. bázis meghibásodási ráta, amelyet rendszerint a villamos igénybevétel és a hőmérséklet igénybevétel függvényében adnak meg,

Π_Q — a minőségi tényező, amely az alkatrész gyártása során alkalmazott ellenőrző,

minősítő és szűrővizsgálatok hatékonyságát jellemzi,

Π_E — a környezeti tényező, amely a berendezés alkalmazási környezetének a megbízhatóságra gyakorolt hatását jellemzi,

Π_A — az alkalmazási tényező, amely az alkatrész alkalmazási feltételeitől függ, figyelembe véve az áramköri felhasználás körülményeit,

Π_n — az egyes alkatrészek speciális tulajdonságait jellemző tényezők összessége (például: névleges villamos terhelés diszkrét félvezető eszközök esetében, bonyolultsági tényező stb.).

Az (1) képlet szerinti modell mikroelektronikai eszközök esetében, mint ezt a későbbiekben láthatjuk, némileg módosul, kéttagú összegként írható fel a mechanikai és hőtani hatások elkülönített jellemzése céljából.

Az alkatrész megbízhatósági modellek kialakítása során arra kell törekedni, hogy a modellek a következő általános tulajdonságokkal rendelkezzenek:

- ne legyenek bonyolultak,
- alkalmasak legyenek az alkatrészek tervezési-konstrukciós tulajdonságaiból és felhasználási körülményeiből adódó meghibásodási mechanizmusok megkülönböztetésére,
- a képletek továbbfejleszthetők, illetve időközönként felülvizsgálhatók és korszerűsíthetők legyenek új technológiák, illetve technológiai változtatások bevezetése esetében,
- megfelelő pontosságú becslést adjanak az alkatrészek megbízhatóságára.

II.2.2. A megbízhatósági modellek kialakításához felhasználható adatforrások

A megbízhatósági modellek kialakításához az adatok a következő, ún. elsődleges adatforrásokból származtathatók:

- alkatrészek laboratóriumi vizsgálatai,
- berendezések vizsgálatai (megbízhatóság növelő vizsgálatok, gyártási-fejlesztési vizsgálatok, ellenőrző vizsgálatok, átadás-átvételi vizsgálatok) eredményeiből kapott alkatrész megbízhatósági adatok,
- berendezések üzemeltetési adataiból származtatott alkatrész megbízhatósági jellemzők.

Az alkatrészek laboratóriumi vizsgálatait rendszerint vagy az alkatrészgyártó, vagy annak megbízása alapján egy független vizsgáló intézet végzi el laboratóriumi körülmények között. Ezekből a vizsgálatokból jól definiált és reprodukálható igénybevételi feltételekre (villamos igénybevétel, hőmérséklet) és az alkatrészek egyes villamos jellemzőire megadott meghibásodási kritériumokra vonatkozóan becslés adható meg a meghibásodási rátára, valamint egyes esetekben meghatározható annak igénybevételi függése. Ezen túlmenően az alkatrészszintű vizsgálatok eseténként lehetővé teszik az alkatrész minőségi szintjének meghatározását is, így az (1) képletben szereplő Π_Q minőségi tényező értéke is megadható. A laboratóriumi vizsgálat azonban csak korlátozott

mértékben alkalmas a meghibásodási ráta 10^{-11} – 10^{-8} /óra nagyságrendű, üzemeltetés során megkövetelt értékének igazolására, mivel a vizsgáló berendezések kapacitása és a vizsgálati idő szükségszerűen rövid volta nem teszi lehetővé az ehhez szükséges statisztikai adatmennyiség (eszköz—óra) előállítását. Ezen némileg enyhít a gyorsított vizsgálatok elvégzésének lehetősége, azonban ezek az ún. rövid idejű vizsgálatok sem tudják sok esetben biztosítani az üzemeltetési meghibásodási ráta érték igazolásához szükséges eszköz—óra mennyiséget. A laboratóriumi vizsgálatok ezen túlmenően nem adhatnak felvilágosítást az üzemeltetési körülmények között várható meghibásodási típusokra és mechanizmusokra, mivel a laboratóriumi alkatrész-vizsgálatok igénybevételi feltételei általában szigorúbbak a felhasználási körülményeknél és az alkatrészek igénybevétele során nem szimulálható tökéletesen a berendezés várható alkalmazási környezetének az alkatrészek megbízhatóságára gyakorolt hatása.

A berendezéseken végzett vizsgálatokból vagy csak a kezdeti meghibásodások szakaszára vonatkozó adatok határozhatók meg (ilyen vizsgálatok a berendezés megbízhatóságát növelő vizsgálatok és a gyártási-fejlesztési vizsgálatok) vagy csak átlagos megbízhatósági adatok származtathatók (ellenőrző vizsgálatok és átadás-átvételi vizsgálatok). Ezek az adatok így csak csekély mértékben használhatók fel az alkatrészek modelljeinek kialakítására.

A berendezések üzemeltetéséből az alkatrészek megbízhatósági jellemzői nagy statisztikai adatmennyiség alapján származtathatók különböző alkalmazási környezetekre és felhasználási igénybevételekre vonatkozóan és az egyes alkatrészek megbízhatóságát befolyásoló áramköri alkalmazás hatása is megfigyelhető. A jellegzetes üzemeltetési hibafajták és hibamechanizmusok megismerhetők. Az alkatrészek elvégzett szűrővizsgálatok hatékonysága értékelhető. Ennek megfelelően a meghibásodási ráta a várható üzemeltetési feltételekre vonatkozóan, nagy statisztikai adatmennyiség alapján becsülhető a 10^{-11} – 10^{-8} /óra értéktartományban. A berendezés üzemeltetési adatok hátrányaként tekinthető, hogy az üzemidőre vonatkozó megfigyelések egyes esetekben bizonytalanok lehetnek, az igénybevételi feltételek és a meghibásodási kritériumok nem minden esetben definiáltak kellő pontossággal.

A fentiekben összefoglalt tulajdonságok alapján megállapítható, hogy az alkatrészmodellek kialakításához szükséges megbízhatósági adatokat egyrészt a laboratóriumi vizsgálatokból, másrészt a berendezések üzemeltetéséből kell származtatni. Mivel a szakirodalmi adatok szerint [3, 4, 5] az alkatrészek laboratóriumi vizsgálatokból kapott λ_V meghibásodási rátának és a λ_U üzemeltetési meghibásodási rátának a hányadosa 2 és 10 közötti érték, azaz a vizsgálati meghibásodási ráta adódik általában kedvezőtlenebbnek, szükséges mindkét adatforrásból származtatott meghibásodási ráták számításba vétele és összevont értékelése. Ennek érdekében az alkatrészgyártó (vagy a vizsgáló intézet) és az alkatrész-felhasználó között szoros együttműködést kell kialakítani laboratóriumi és üzemeltetési adatok gyűjtésére, feldolgozására és a tapasztalatok

cseréje után azok közös értékelésére. A két vagy több adatforrásból származó meghibásodási ráta adatok összevont értékelésére matematikai-statisztikai módszerek alkalmazása is szükséges. A következőkben erről adunk áttekintést.

II.2.3 Megbízhatósági adatok összevont értékelése

II.2.3.1. Két adatforrás

Tételezzük fel, hogy azonos alkatrésztípusra és azonos igénybevételi feltételekre vonatkozóan rendelkezésre állnak a laboratóriumi és üzemeltetési adatok (ha a feltételek eltérők, akkor azonos feltétellel kell azokat átszámolni), és ebből a két adatforrásból kell összevont becslést megadni az alkatrész meghibásodási rátájára. A laboratóriumi adatok indexe legyen „1”, az üzemeltetési adatoké „2”. Mindkét adatforrásból ismerjük a kiinduló értékeket $i=1, 2$ -re. Ezek a következők:

- az n_i mintanagyság,
- a t_i megfigyelési időtartam,
- a meghibásodások r_i száma.

Ezekből az adatokból számítsuk ki exponenciális működési idő eloszlást és adott t_i ideig tartó vizsgálatot feltételezve a meghibásodási ráták

$$\hat{\lambda}_i = \frac{r_i}{n_i t_i}, \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

becslését. Összevont $\hat{\lambda}$ becslésként olyan becslést célszerű választani, amely figyelembe veszi, hogy a laboratóriumi adatok 2–10-szer kedvezőtlenebbek az üzemeltetési adatoknál, valamint az üzemeltetési adatok mennyisége jelentősen nagyobb és szórásuk több esetben kisebb, mint a laboratóriumi adatoké. Ezért az összevont becslést súlyozott átlaggal célszerű megadni, amely nagyobb súllyal veszi figyelembe a kisebb szórású adatot. A matematikai-statisztikában szokásos, hogy ebben az esetben az egyes súlyozási tényezőket a szórásnégyzetekkel fordítottan arányosan választjuk. Így az összevont $\hat{\lambda}$ becslés a következő alakú, ha $D^2(\hat{\lambda}_i)$ ($i=1, 2$) jelöli $\hat{\lambda}_i$ szórásnégyzetét:

$$\hat{\lambda} = \frac{\frac{\hat{\lambda}_1}{D^2(\hat{\lambda}_1)} + \frac{\hat{\lambda}_2}{D^2(\hat{\lambda}_2)}}{\frac{1}{D^2(\hat{\lambda}_1)} + \frac{1}{D^2(\hat{\lambda}_2)}} = \frac{D^2(\hat{\lambda}_2) \cdot \hat{\lambda}_1 + D^2(\hat{\lambda}_1) \cdot \hat{\lambda}_2}{D^2(\hat{\lambda}_1) + D^2(\hat{\lambda}_2)}. \quad (3)$$

Mivel $D^2(\hat{\lambda}_i) = \frac{\lambda_i}{n_i t_i}$ exponenciális működési idő eloszlás és adott ideig tartó vizsgálat esetén, ezért célszerű $D^2(\hat{\lambda}_i)$ -t a

$$\hat{D}^2(\hat{\lambda}_i) = \frac{\hat{\lambda}_i}{n_i t_i} = \frac{r_i}{(n_i t_i)^2} \quad (4)$$

statisztikával becsülni, így a $\hat{\lambda}$ összevont becslés a (2), (3) és (4) képletből adódóan a következő alakú:

$$\hat{\lambda} = \frac{r_1 r_2 (n_1 t_1 + n_2 t_2)}{r_1 (n_2 t_2)^2 + r_2 (n_1 t_1)^2}. \quad (5)$$

Az (5) képlet által adott becslés $D^2(\hat{\lambda})$ szórásnégyzetének $\hat{D}^2(\hat{\lambda})$ becslése a következő alakú:

$$\hat{D}^2(\hat{\lambda}) = \frac{r_1 r_2}{r_1 (n_2 t_2)^2 + r_2 (n_1 t_1)^2}. \quad (6)$$

Megjegyezni kívánjuk, hogy a $\hat{\lambda}_1$ és $\hat{\lambda}_2$ meghibásodási rátákból összevont becslés csak akkor származtatható, ha F -statisztikai próbával ellenőrizzük a $\lambda_1 = \lambda_2$ hipotézis helyességét, azaz azt, hogy a két adatforrás közel azonos statisztikai sokaságból származik-e vagy sem.

II.2.3.2. Több adatforrás

Több, m számú adatforrás esetében — például különböző alkalmazási környezetek (földi, légi, tengeri környezet stb.) esetében — hasonló eljárás követhető. Ekkor is rendelkezésre állnak az r_j , n_j , t_j ($j=1, \dots, m$) kiinduló adatok hasonló jelentéssel, mint a 2.3.1. pontban. Ezen túlmenően ismerjük a K_j átszámítási tényezőket is, amelyek segítségével az összes adatforrás λ_j meghibásodási ráta értékét azonos referenciatételekre számítjuk át a

$$\hat{\lambda}_j^* = \frac{\hat{\lambda}_j}{K_j} = \frac{r_j}{K_j n_j t_j}; \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

képlettel ($K_1=1$). K_j lehet például az (1) képletben szereplő \prod_E környezeti tényező értéke a j -edik adatforrásra vonatkozóan. Mivel Pearson-féle χ^2 -próbával ellenőrizzük a $\lambda_1^* = \lambda_2^* = \dots = \lambda_m^*$ hipotézis helyességét, az összevont $\hat{\lambda}$ becslést az $m=2$ esetben alkalmazott súlyozási megfontolásokat alkalmazva származtatjuk, így a szórásnégyzettel fordítottan arányos súlyozási tényezők alkalmazása után $\hat{\lambda}$ -re és annak szórásnégyzetére a következő képleteket kapjuk:

$$\hat{\lambda} = \sum_{j=1}^m K_j n_j t_j \left[\sum_{j=1}^m \frac{K_j^2 n_j^2 t_j^2}{r_j} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$\hat{D}^2(\hat{\lambda}) = \left[\sum_{j=1}^m \frac{K_j^2 n_j^2 t_j^2}{r_j} \right]^{-1}. \quad (9)$$

A laboratóriumi és üzemeltetési adatok összevont értékelése lehetőséget ad arra, hogy az így származtatott összevont meghibásodási ráta becslés mindkét adatforrásból kapott eredményeket figyelembe véve az üzemeltetési adatokhoz közelebb álló értéket adjon, így a modellek kialakításához megfelelő statisztikai alapot biztosítson. Az *I. táblázatban* példát adunk különböző alkatrésztípusok esetében a laboratóriumi és üzemeltetési adatok összevont értékelésére.

II.2.4. A megbízhatósági modell kialakításának általános elméleti módszerei

A meghibásodási ráta és a megbízhatóságot befolyásoló tényezők (villamos igénybevétel, hőmérséklet, alkalmazási környezet, áramköri felhasználás, bonyolultság, minőségi osztály) közötti összefüggések meghatározására matematikai-statisztikai módszerek kell alkalmazni.

A lépcsőzetes, többváltozós lineáris regressziós analízis alkalmazását célszerű előtérbe helyezni a

modell kialakítása céljából. Ennek alkalmazása során a meghibásodási rátát vagy annak alkalmasan megválasztott függvényét tekintjük függő változónak (Y) és a megbízhatóságot befolyásoló tényezőket, illetve azok transzformáltjait független változóként (X_1, X_2, \dots, X_m) vizsgáljuk. Az Y függő változót az X_i független változók lineáris függvényeként vizsgáljuk a következő alakban:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i, \quad (i0)$$

ahol a b_i ($i=1, \dots, m$) együtthatók ismeretlen állandók, amelyeket a megfigyelések (vizsgálatok vagy üzemeltetések) adataiból kell becsülni a legkisebb négyzetek módszerével. A lépcsőzetes regressziós analízis során először kiszámítjuk a korrelációs együtthatók mátrixát, amely egyrészt tartalmazza az (X_i, X_j) változók r_{ij} ($i, j=1, \dots, m$) korrelációs együtthatóit, valamint másrészt az X_i független változók és az Y függő változó r_{iY} ($i=1, 2, \dots, m$) korrelációs együtthatóit is magában foglalja. A mátrix segítségével megállapíthatók az egymástól függő X változók (kivéve azokat, amelyek legalább két másik X változónak függvényei). Az r_{iY} korrelációs együtthatókat csökkenő sorrendbe rendezzük. Az így kapott rendezett mintában először azt az r_{iY} -hoz tartozó X_i változót vizsgáljuk, amelyre r_{iY} a legnagyobb, azaz amelyre X_i és Y közötti sztochasztikus összefüggés a legszorosabb. Ezt a változót az egyszerűség kedvéért jelöljük X_1 -gyel. Ezután a legkisebb négyzetek módszerével meghatározzuk, hogy a

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_{1i})^2, \quad (11)$$

függvény milyen b_0 és b_1 értékekre lesz minimális, feltéve, hogy az Y, X_1, \dots, X_m változókra n számú független ($Y_1, X_{11}, X_{21}, \dots, X_{m1}$) megfigyelés áll rendelkezésre ($l=1, 2, \dots, n$) és n lényegesen nagyobb a független változók m számánál. Ezután az r_{iY} -ök közül a második legnagyobbat választjuk és a legkisebb négyzetek módszerét a fentiek szerint X_2 -re alkalmazva meghatározzuk a b_0, b_1 és b_2 állandók becslését (azaz b_0 és b_1 értékét is újra pontosítjuk). Ha a második változó beépítése a modellbe a becslés javulását eredményezi adott konfidencia szinten és jelentős mértékben, akkor ezt a változót a modell alkotó részeként elfogadjuk és a regressziót folytatjuk a harmadik változóra. Ha azonban az X_2 második változó bevezetése a modellbe nem eredményez jelentős javulást a becslésben, akkor a modell változatlanul $Y = b_0 + b_1 X_1$ alakú marad.

Az eljárást ezután továbbfolytatjuk úgy, hogy minden új változó bevezetése után az előzőleg felvett modellváltozók szignifikanciáját felülvizsgáljuk azon feltétel mellett, hogy az új változó a modellben szerepel. Az eljárást addig folytatjuk, ameddig az összes szignifikáns X változót meg nem határoztuk és az azokhoz tartozó b együtthatókat ki nem számítottuk. Annak meghatározására, hogy az így kialakított modell jól illeszkedik-e vagy sem a megfigyelt adatokra, statisztikai próbát kell alkalmazni, így például F -próba alkalmazható az illeszkedés-vizsgálat elvégzésére.

Az alkatrészek megbízhatósági modellje elméleti kialakításának folyamatábráját Váradi—Balogh [6] előadása ismerteti. Ennek egyes lépései a következőkben foglalhatók össze:

- a) Az alkatrészek megbízhatóságát befolyásoló tényezők és azok függvényalakjának meghatározása (például fizikai-kémiai folyamatok figyelembevételével a meghibásodási ráta hőmérsékletfüggésének Arrhenius-képlet szerinti megadása exponenciális függvényvel).
- b) A lehetséges változók ily módon történő megválasztása után, az azokhoz tartozó meghibásodási ráta értékek meghatározása különböző adatforrásokból.
- c) Az adatok helyességének ellenőrzése.
- d) A független változók közötti korreláció vizsgálata, valamint a meghibásodási ráta (függő változó) és a független változók közötti korreláció meghatározása az alkatrész megbízhatóságára legerősebb hatást gyakoroló tényezők kiválasztására, illetve az egymástól erősen független változók visszautasítása céljából.
- e) A lépcsőnkénti többváltozós lineáris regresszió elvégzése, a tapasztalati adatok és a modell közötti illeszkedés jóságának ellenőrzése statisztikai próbákkal.
- f) A modell érvényességi tartományának meghatározása.

A modellek kialakításának általános elméleti alapfeltevéseiből és az előzőekben vázolt eljárások alkalmazási feltételeiből adódik, hogy igen részletes és statisztikailag biztonságosan megalapozott adatösszetételeknek kell rendelkezésre állniuk a függvények meghatározására mind alkatrész-vizsgálati forrásokból, mind berendezés-üzemeltetési megfigyelésekből. A hazai korlátozott adatgyűjtési lehetőségeket figyelembe véve, gazdaságossági szempontokból is célszerűnek látszik, hogy a nemzetközi megbízhatósági adatközlő rendszerekben és kézikönyvekben [1, 2], valamint szakirodalmi publikációkban (Reynolds [7], Jääskeläinen [8], Goarin [9]) közzétett elméleti modellek függvényalakját célszerű elemezni és ennek alapján meghatározni, hogy milyen modellfüggvények fogadhatók el a nemzetközi tapasztalatok alapján. Így lehetővé válik, hogy a modelleknek csak egyes ismeretlen állandóit kell meghatározni a tapasztalati adatok alapján olyan hazai gyártású alkatrészekre, illetve külföldről vásárolt termékekre, amelyekre a nemzetközi modellek állandóinak érvényességi tartománya közvetlenül nem alkalmazható. Ezt az időközönkénti aktualizálási eljárást az jellemzi, hogy nem szükséges sem a lépcsős regressziós analízis elvégzése, sem a változók közötti korreláció rangsorolásának vizsgálata, így jelentős mértékben csökkenthető a számítási algoritmusok terjedelme.

A következőkben a nemzetközi megbízhatósági szakirodalomban közzétett alkatrész megbízhatósági modellek legfontosabb tulajdonságait vizsgáljuk, majd azok aktualizálási eljárásaira mutatunk be példát mikroelektronikai eszközök és diszkrét félvezető alkatrészek esetében.

11.3. Az alkatrészek megbízhatósági modelljének elemzése és aktualizálása

Az elektronikai alkatrészek megbízhatósági modelljeit különböző alkatrésztípusokra határozzák meg. A nemzetközi szakirodalomban ezen a területen legjelentősebb forrásnak tekinthető az USA-ban kiadott MIL-HDBK-217 megbízhatósági kézikönyv [1] és az RDF-80 francia megbízhatósági kézikönyv [2], valamint az előzőekben már említett [7], [8], [9] publikációk, amelyek a kézikönyvek adatainak értelmezésével és a modellek továbbfejlesztésével foglalkoznak.

A következőkben a mikroelektronikai eszközökre és diszkrét félvezető eszközökre kialakított modellek tulajdonságait vizsgáljuk, azzal a megjegyzéssel, hogy más alkatrészkategóriák (például passzív elektronikai alkatrészek, relék stb.) esetében is hasonló modellek alakíthatók ki.

11.3.1. A megbízhatósági modellek jellemzése Mikroelektronikai eszközök

Az [1] megbízhatósági kézikönyv a mikroelektronikai eszközök megbízhatósági modelljeit a következő csoportosításban közli:

1. monolit bipoláris és MOS technológiával előállított digitális integrált áramkörök (kis és közepes bonyolultságúak);
2. bipoláris és MOS technológiával előállított lineáris integrált áramkörök;
3. bipoláris és MOS technológiával előállított nagy bonyolultságú integrált áramkörök, mikroprocesszorok;
4. memóriák (bipoláris és MOS technológia);
5. hibrid integrált áramkörök.

A félvezető alapú integrált áramkörök 1–4. csoportjaira azonos függvényalakú modell érvényes, a hibrid áramkörökre ettől teljesen eltérő modellt kell alkalmazni, amelyre jelen közleményben nem térünk ki.

A félvezető alapú integrált áramkörök megbízhatósági modellje két részből tevődik össze: egy hőmérséklettől függő λ_T meghibásodási rátából, amelynek függvényalakja a következő:

$$\lambda_T = \Pi_Q \Pi_L C_1 \Pi_T \Pi_V \Pi_{PT}, \quad (12)$$

és egy a mechanikai igénybevételtől függő λ_M meghibásodási rátából, amely

$$\lambda_M = \Pi_Q \Pi_L (C_2 + C_3) \Pi_E$$

alakú. Így a félvezető alapú integrált áramkörök megbízhatósági előrejelzési modellje [1] szerint a következő:

$$\lambda = \lambda_T + \lambda_M = \Pi_Q \Pi_L [C_1 \Pi_T \Pi_V \Pi_{PT} + (C_2 + C_3) \Pi_E], \quad (13)$$

ahol:

- λ_p — az előrejelzett meghibásodási ráta 10^{-9} /óra vagy 10^{-9} /óra egységben (az utóbbi időben a 10^{-9} /óra egységet helyezik előtérbe);
- Π_Q — a minőségi tényező, amelynek értéke az eszközön alkalmazott minősítő, ellenőrző-

és szűrővizsgálatok szigorúsági fokozatától függően 0,5 és 35,0 között változik;

- Π_L — a tanulási tényező, amely a gyártás kiforrottságát jellemzi (kiforrott gyártás esetében értéke 1, új eszköz kezdeti gyártása vagy nagyobb technológia, illetve konstrukciós változtatások után értéke 10,0);
- Π_E — a környezeti (földi, légi, tengeri stb. környezet) tényező, amelyeknek értéke 1 és 10 között változik;
- Π_T — a hőmérséklet-gyorsítási tényező, amelynek függvényalakja az Arrhenius-képletnek megfelelően a következő:

$$\Pi_T = 0,1 \exp. \left[-A \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{298} \right) \right], \quad (14)$$

ahol:

T_j az átmenet-hőmérséklet K-ben, A állandó, amelynek értéke a technológiától és a tokozás típusától (hermetikus vagy nem hermetikus tokozás) függően 4600 és 10 000 között változik, amely 0,4 és 0,9 eV közötti E_a aktiválási energia érték tartományának felel meg az

$$E_a = \frac{A}{11\,606} \quad (15)$$

képletnek megfelelően.

C_1, C_2 — az ún. bonyolultsági meghibásodási ráták, amelyek digitális eszközök esetében a kapuk N számának, memóriák esetében a bitek N számának, lineáris eszközök esetében pedig a tranzisztorok N számának hatványfüggvényei,

$$C_i = a_i N^{b_i}, \quad i = 1, 2; \quad (16)$$

ahol a_i és b_i technológiától, funkciótól és bonyolultsági fokozattól (SSI, MSI, LSI) függő állandók;

C_3 — a tokozási bonyolultsági meghibásodási ráta, amely az aktív kivezetők N_p számának hatványfüggvénye:

$$C_3 = a_3 N_p^{b_3}, \quad (17)$$

ahol a_3, b_3 a tokozás típusától függő állandók.

Π_V — feszültség-igénybevételi tényező, amelynek értéke csak CMOS eszközök esetében tér el 1,0-től. CMOS eszközök esetében $V_s > 5$ V tápfeszültségekre a következő alakú:

$$\Pi_V = B_1 \exp. \left[\frac{B_2 V_s T_j}{298} \right], \quad (18)$$

ahol B_1, B_2 a megengedhető legmagasabb tápfeszültségtől függő állandók T_j az átmenet-hőmérséklet K-ben.

Π_{PT} — a programozási tényező, amelynek értéke csak PROM-ok (programmable read only memories) esetében tér el 1,0-től, PROM-ok esetében:

$$\Pi_{PT} = D_1 + D_2 N \cdot 10^{-3}, \quad (19)$$

ahol N a tároló bitek száma, D_1, D_2 a technológiától függő állandók.

A félvezető alapú IC-k (13) képlet által adott modelljének elemzése alapján a következők állapíthatók meg:

- a) A képlet szorzó tényezői közül jelentős hatással van a meghibásodási rátára a Π_Q minősítési tényező értékének változása. Ezért a szűrővizsgálati eljárásorozathoz tartozó minőségi tényezők (megbízhatóság-javító hatás mértékei) meghatározása az alkatrészgyártó és alkatrészfelhasználó együttműködését igényli a laboratóriumi vizsgálatok eredményeinek és az üzemeltetési tapasztalatoknak közös értékelése útján.
- b) A Π_T hőmérsékleti tényező a nagy aktiválási energia következtében jelentős mértékű gyorsulást jelenthet CMOS technológiájú, nem hermetikus tokozású eszközök esetében, amelyekre 75 °C hőmérséklet-növekedés 114-szeres gyorsulást eredményezhet. Ez pedig arra vezethet, hogy az előrejelzés eredménye sokkal kedvezőtlenebb érték, mint az üzemi adatokból számított meghibásodási ráta. A pesszimista előrejelzést több esetben az üzemeltetési adatok értékelési eredményei is alátámasztják.

A hőmérséklet hatását jellemző aktiválási energia a (13) képletben több meghibásodási folyamatra együttesen vonatkozó átlagolt érték, így nem veszi figyelembe, hogy a különböző hibamechanizmusok más-más hőmérsékleten eltérő gyakorisággal fordulnak elő, valamint azt a körülményt is számításon kívül hagyja, hogy a szűrővizsgálatok szigorúsági fokozatától függően más-más hibamechanizmusok előfordulási gyakorisága változik meg, így a Π_Q minőségi tényező értéke sem teljesen független a Π_T hőmérséklet gyorsítási tényezőtől. Elméletileg különböző Π_Q értékekhez (különböző szűrővizsgálati sorozatokhoz) különböző Π_T értékek tartoznak.

A hőmérséklet-gyorsítási tényezőt tehát mindig szükséges ellenőrizni a modellek felülvizsgálata során és a tapasztalati adatok alapján aktualizált értékét meg kell határozni. Ha nagyobb adatmennyiség áll rendelkezésre, akkor megfontolandó a francia megbízhatósági kézikönyvben (l. [2] és [9]) megadott modell hőmérséklettényezője állandóinak pontosítása. Ugyanis a franciák által megadott, félvezető integrált áramkörökre vonatkozó modell lényeges eltérést csak abban mutat az USA-ban alkalmazott (13) képlettel jellemzett modellel szemben, hogy a hőmérséklet tényezőt nem egy aktiválási energia jellemzi, hanem két aktiválási energia súlyozott összege:

$$\Pi_T = \alpha \exp. \left[-\frac{3500}{T_j} \right] + \beta \exp. \left[-\frac{11\,606}{T_j} \right], \quad (20)$$

ahol T_j az átmenethőmérséklet, α és β technológiától és tokozástól függő állandók.

A (20) képletből például az adódik, hogy 338 K (65 °C) réteghőmérsékleten a 0,3 eV aktiválási energiával [azaz a (20) képlet első tagjával] jellemzett oxid letörési hibák 0,999 valószínűséggel, ugyanakkor az 1 eV-tal [azaz a (20) képlet második tagjával] jellemzett térfogati hibák csak 0,001 valószínűséggel fordulnak elő. Ez az arány magasabb hőmérsék-

leteken (például 373 K (100 °C) felett) fordítottan alakul, azaz a térfogati hibák előfordulása a gyakoribb.

Johnston és Reynolds [10] a (20) képlet általánosításaként azt javasolta, hogy az egyes hibamechanizmusokhoz tartozó E_{ai} aktiválási energiákat azok q_i előfordulási gyakoriságával súlyozva kell figyelembe venni, valamint számításba kell venni az r relatív nedvességtartalom hatását is, a szerzők a következő összefüggést ajánlották alkalmazásra:

$$\Pi_T = \sum_{i=1}^n q_i \exp. \left[11\,606 E_{ai} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_j} \right) + H_i (r^2 - r_0^2) \right], \quad (21)$$

ahol q_i az i -edik hibamechanizmus ($i=1, 2, \dots, n$) előfordulási gyakorisága a T_0 vonatkoztatási hőmérsékleten és az r_0 vonatkoztatási relatív nedvességtartalom mellett $\left(\sum_{i=1}^n q_i = 1 \right)$, T_j az átmenethőmérséklet tényleges értéke, E_{ai} az i -edik hibamechanizmus aktiválási energiája (0,3 és 1 eV között változik), r a relatív légnedvesség tartalom, H_i az i -edik hibamechanizmushoz tartozó konstans (értéke felületi hibák és a bondolások galvanikus korróziója esetén 4,4, alumínium korrózió esetén 8,5).

A (21) képlet csak akkor alkalmazható a gyakorlatban, ha nagy számban állnak rendelkezésre üzemeltetési tapasztalatok az egyes hibamechanizmusok előfordulási gyakoriságára.

- c) A bonyolultsági meghibásodási ráták vizsgálata azt mutatja, hogy a C_1 meghibásodási rátának van jelentős hatása az eszköz megbízhatóságára, különösen 16 kbit-nél nagyobb bonyolultságú memóriák esetében (a C_2 és C_3 meghibásodási rátáknak még az összegük is kisebb egy-két nagyságrenddel C_1 -nél). A C_1 bonyolultságú meghibásodási ráta időbeli változásának trendjére Jääskeläinen [8] adott meg képletet LSI áramkörökre és memóriákra az eszköz gyártási évének függvényében (10^{-9} /óra egységben):

$$C_1 = 0,5 X^8 [N^{X^2} + \exp. (NBX^{35})]. 10^{-6}/\text{óra},$$

$$X = \frac{50}{\text{év} - 1900}, \quad (22)$$

ahol: B állandó, amely a technológia és az eszköz funkció függvényében 600 és 4000 között változik, N az eszköz bonyolultsága (bitek vagy kapuk száma).

A (22) képlet 16 kbit feletti kapacitású memóriák esetében az 1980–1985. évekre nagyon pesszimista előrejelzést ad meg, így alkalmazása csak 1985 után javasolható.

- d) A λ_T hőmérséklet meghibásodási ráta az esetek többségében lényegesen nagyobb, mint a λ_M mechanikai meghibásodási ráta. Ezért a felülvizsgálat során általában a λ_T meghibásodási ráta függvény állandóit kell aktualizálni. Kivételt képeznek a szigorúbb alkalmazási környezetekben ($II_E = 5,0 - 10,0$) felhasznált kis és közepes bonyolultságú digitális áramkörök és a lineáris eszközök. Ez utóbbi eset-

ben az aktualizálást az [1]-ben megadott λ/λ_T arányt figyelembe véve kell elvégezni.

Diszkrét félvezető eszközök

A diszkrét félvezető eszközök modellje az USA megbízhatósági kézikönyvben és az *RDF-80* kiadványban azonos függvényalakú (csak a képletek állandói különböznek kis mértékben):

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_R \Pi_A \Pi_Q \Pi_E \Pi_{S_z} \Pi_C, \quad (23)$$

ahol: λ_b a bázis meghibásodási ráta, amely a következő alakú:

$$\lambda_b = A \exp. \left[\frac{N_T}{T_j} + \left(\frac{T_j}{T_M} \right)^P \right], \quad (24)$$

ahol:

T_j — az átmenethőmérséklet K-ben, A , N_T , T_M , P állandók.

T_m a maximálisan megengedett réteghőmérséklet.
 Π_E — a környezeti tényező (értéke 1 és 40 között változik);

Π_A — az alkalmazási tényező, amellyel az egyes alkalmazási területeként lényegesen eltérő dinamikus elektromos igénybevételt veszük figyelembe;

Π_Q — a minőségi tényező (értéke eszköztípusonként, azaz attól függően, hogy tranzisztorok, diódák, optoelektronikai eszközök megbízhatóságát vizsgáljuk, 1 és 50 között változik általában);

Π_R — névleges teljesítménytől függő tényező (tranzisztorok esetében 1 és 5 közötti érték);

Π_{S_z} — feszültség igénybevételi tényező (értéke tranzisztorok esetében 0,3 és 3,0 között van);

Π_C — bonyolultsági tényező, amely tranzisztorok esetében az egy tokba szerelt eszközök számától függ.

A (23) képlettel adott modellt az [1] kézikönyv tranzisztorok, diódák, optoelektronikai eszközök esetében adja meg. A (23) képlet elemzése alapján a következőket állapíthatjuk meg:

a) A laboratóriumi vizsgálatok és üzemeltetési tapasztalatokkal való összehasonlítás azt mutatja, hogy a λ_b bázis meghibásodási ráta függvényalakja elfogadható a megbízhatósági modellek aktualizálása során, így csak az abban szereplő ismeretlen állandókat (A , P , N_T) kell a legkisebb négyzetek módszerével meghatározni.

b) A bázis meghibásodási ráta szorzó tényezői közül a Π_Q minőségi tényező és a Π_E környezeti tényező hatása jelentős. Ezek értékét a többi szorzótényezővel együtt — azonban közelítésként célszerű elfogadni addig, ameddig alkatrész-vizsgálatokból és üzemeltetési megfigyelésekből elegendő adat nem áll rendelkezésre ezeknek az állandóknak a pontosítására.

11.3.2. A megbízhatósági modellek aktualizálása

Az előzőekben ismertetett megfontolásokból adódóan

Laboratóriumi és üzemeltetési adatok összevont értékelése félvezető eszközök és integrált áramkörök esetében

Alkatrésztípus	Meghibásodási ráta 10^{-9} /óra egységben		
	laboratóriumi	üzemeltetési	összevont becslés
Si NPN tranzisztor	70	15	32
Si PNP tranzisztor	207	51	88
FET tranzisztor	699	384	574
Si dióda	21	5	9
Zener dióda	187	36	78
HTTL IC (SSI)	17	7	11
TTL IC (SSI)	11	8	9
TTL IC (MSI)	22	10	11

feltételezzük, hogy a mikroelektronikai eszközök (félvezető alapú IC-k) megbízhatóság-előrejelzési modelljének függvény alakja a (13) képletből, a diszkrét félvezetők megbízhatóság-előrejelzési modelljének függvényalakja pedig a (22) képletből ismert. Új alkatrésztípusok esetében, amelyekre alkatrészvizsgálati adatok vagy üzemeltetési megfigyelések adatai állnak rendelkezésre, a (13), illetve (22) képletet pontosítani akarjuk azáltal, hogy azok állandói közül a legfontosabbakat (szükségképpen nem az összes állandót, egyeseket ismertnek tételezhetünk fel) a legkisebb négyzetek módszerével becsüljük.

Ehhez az szükséges, hogy alkalmas transzformációval és/vagy sorbafejtéssel elérjük, hogy az előre jelzett Y meghibásodási ráta (vagy annak függvénye) a modellben szereplő (X_1, X_2, \dots, X_m) független változóknak és a (b_1, b_2, \dots, b_m) modell állandóknak lineáris függvénye legyen. Tegyük fel, hogy rendelkezésre áll k számú független megfigyelés ($y_j, X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}$) ($j=1, 2, \dots, k$) a független és a függő változókra. A feladat a legkisebb négyzetek módszerével becsülni az

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i \quad (25)$$

regressziós egyenlet ismeretlen b_i állandóit, azaz a megfigyelési eredményekből meghatározzuk, hogy milyen b_0, b_1, \dots, b_m értékek esetén veszi fel a

$$\sum_{j=1}^k (y_j - b_0 - b_1 X_{1j} - \dots - b_m X_{mj})^2 \quad (26)$$

függvény a minimumát. Megjegyzendő, hogy a jelen tanulmány II.2. pontjában ismertetett lépcsős módszerrel szemben, amelyet a modellek kialakítására célszerű alkalmazni a változók egyenkénti bevonásával, ez esetben az összes állandók becslését egy lépésben végezzük el.

A szélsőérték helyét szokásosan úgy határozzák meg, hogy a (26) függvényt parciálisan deriválják b_0, b_1, \dots, b_m szerint és ezeket a deriváltakat 0-val teszik egyenlővé. Így $(m+1)$ ismeretlenes egyenlet-rendszert kapunk, amelyet a b_i ($i=1, \dots, m$) állandókra megoldunk. A megoldás adja a b_i állandók becslését.

A b_i állandók \hat{b}_i becslése $D^2(\hat{b}_i)$ szórásnégyzetének

és cov. (b_i, b_j) kovarianciájának ismeretében, valamint a j -edik megfigyeléshez tartozó y_j érték és ugyancsak a j -edik megfigyeléshez tartozó, (25) képlet által adott regressziós egyenesből számított Y_j figyelembevételével számított

$$s^2 = \frac{1}{k-m-1} \sum_{j=1}^k (y_j - Y_j)^2, \quad (27)$$

szórásnégyzetből meghatározható az $Y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i$ regressziós egyenes szórásnégyzete, valamint annak becslése is (s_Y^2) . A $(k-m-1)$ szabadságfokú t -elosztás $t_{\alpha/2}$ és $t_{1-\alpha/2}$ szignifikancia pontjainak felhasználásával $(1-\alpha)$ konfidencia szintű konfidencia intervallum-sáv adható meg az Y regressziós egyenesre. A modellek aktualizálási eljárásaira integrált áramkörök és diszkrét félvezető eszközök esetében adunk példát.

Integrált áramkörök megbízhatósági modelljének aktualizálása

Tételezzük fel, hogy a (13) képlet függvényalakját a tapasztalatoknak megfelelően elfogadottnak tekintjük és a modellben szereplő $\Pi_Q, \Pi_L, \Pi_V, \Pi_{PT}, C_2, C_3$ és Π_E állandókat, illetve függvényeket más forrásokból – például az [1] kézikönyvből – ismerjük. Ekkor a feladat a

$$C_1 = a_1 N^{b_1}, \quad \Pi_T = 0,1 \exp. [-A(T_J^{-1} - 298^{-1})]$$

függvények a_1, b_1 és A állandóinak becslése a laboratóriumi és üzemeltetési vizsgálatokból rendelkezésre álló meghibásodási ráta adatok alapján. Ennek érdekében először a (13) képletet átrendezzük, úgy, hogy az egyenlet egyik oldalán csak ismert mennyiségek szerepeljenek, így kapjuk, hogy

$$Z = \frac{\lambda_p}{\Pi_Q \Pi_L} - (C_2 + C_3) \Pi_E; \quad Z = C_1 \Pi_T. \quad (28)$$

Ha logaritmizáljuk (28) egyenlet mindkét oldalát és bevezetjük a következő jelöléseket:

$$\ln Z = Y; \quad \ln a_1 + \ln 0,1 = b_0; \quad b_1 = b_1; \quad -A = b_2; \\ \ln N = X_1; \quad T_J^{-1} - 298^{-1} = X_2,$$

akkor a következő lineáris függvényt kapjuk:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \quad (29)$$

A b_0, b_1, b_2 állandókat a legkisebb négyzetek módszerével becsülve megkapjuk a_1, b_1 és A aktualizált értékeket.

Megjegyezzük, hogy a módszer alkalmazása során figyelembe kell venni, hogy egyes esetekben (szigorú alkalmazási környezet, így viszonylag magas Π_E érték) előfordulhat, hogy a $\lambda_M = (C_2 + C_3) \Pi_E$ mechanikai hatást leíró meghibásodási ráta állandóinak értékei nem tételezhetők fel ismertnek a megbízhatósági kézikönyvekből, mivel az adott alkalmazási környezetben megfigyelt λ meghibásodási ráta esetleg kisebb, mint a λ_M érték, így az előző helyettesítésekből adódóan negatív szám logaritmusával kellene számolni. Ekkor két megoldás lehetséges:

- a pontosabb eljárás, amely során sorbafejtésével a C_2, C_3 függvények, ismeretlen a_2, a_3, b_2, b_3 állandóit is becsüljük, ez igen hosszadalmas és bonyolult,
- elfogadjuk, hogy az [1] kézikönyben megadott λ_M és λ_T közötti arány érvényes az aktualizálási esetre is és ezt figyelembe véve az egyes vizsgálati forrásokból megfigyelt tényleges meghibásodási rátát ebben az arányban osztjuk fel kéttagú összegre, az aktualizálást ekkor külön-külön kell elvégezni az így meghatározott hőmérséklet-függő λ_T és a mechanikai hatásoktól függő λ_M meghibásodási rátákra.

Diszkrét félvezető eszközök

Tételezzük fel, hogy a (23), illetve (24) képletek által megadott függvénytípus ismertnek tekintjük, valamint a (23) képlet Π -szorzótényezői és a (24) képlet T_M állandója is adott. Ekkor a feladat a bázis meghibásodási ráta A, N_T és P állandóinak meghatározása. A (23) egyenlet átrendezése, a $\lambda_b = Z$ bázis meghibásodási rátának (24) egyenletből való kifejezése után kapjuk, hogy

$$Z = \frac{\lambda_p}{\Pi_E \Pi_A \Pi_Q \Pi_R \Pi_{S_2} \Pi_C}; \quad Z = A \exp. \left[\frac{N_T}{T_J} + \left(\frac{T_J}{T_M} \right)^P \right]. \quad (30)$$

(30) mindkét oldalát logaritmizálva és az

$$\ln Z = Y; \quad \ln A = b_0; \quad N_T = b_1; \quad T_J^{-1} = X_1; \quad T_J T_M^{-1} = X_2,$$

(a T_M maximális átmenet hőmérséklet ismert érték, valamint feltételezzük közelítésként, hogy T_J és $\frac{1}{T_J}$ egymástól függetlenek) helyettesítéseket elvégezve kapjuk, hogy

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + X_2^P. \quad (31)$$

Mivel a (30) függvény a P állandóban nem lineáris, ezért közelítésként az X_2^P függvényt egy alkalmasan megválasztott P_0 pont környezetében (például P_0 -nak választható az [1] kézikönyvben megadott érték) a P változó függvényében Taylor-sorba fejtsük a másodrendű és magasabbrendű tagok elhanyagolásával:

$$X_2^P \approx X_2^{P_0} + X_2^{P_0} X (P - P_0). \quad (32)$$

Ha a (32) képletet (31)-be helyettesítjük, akkor

$$Y^* = Y - X_2^{P_0}; \quad X_2^{P_0} \ln X_2 = X_2^*; \quad P - P_0 = b_2$$

jelölésekkel a következő lineáris függvényt kapjuk:

$$Y^* = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2^*. \quad (33)$$

A (33) függvény b_0, b_1 és b_2 ismeretlen állandóit a legkisebb négyzetek módszerével becsüljük. Ha b_2 elég kicsiny, akkor a (31) függvény P állandóját P_0 értékkel becsüljük, ha nem, akkor a korrigált $P_0^* = P_0 + b_2$ értéket helyettesítjük a (32) képletbe P_0 -helyére és az eljárást addig folytatjuk, amíg a korrekció elhanyagolhatóan kicsiny nem lesz.

Következtetések

A jelen tanulmányban tárgyalt rendszer megbízhatóság tervezési módszerekből, értékelési eljárásokból és a vizsgált alkatrész megbízhatóság-előrejelzési modellek tulajdonságaiból adódóan a következő megállapításokat tehetjük:

- a) Az elektronikai berendezések megbízhatósági előrejelzéséhez meg kell határozni az egyes alkatrésztípusok aktualizált megbízhatóság-előrejelzési modelljeit. Ez szükséges teszi, hogy hazai gyártmányú elektronikai alkatrészek, valamint szocialista relációból beszerzett eszközök, egyes tőkés importból származó, de nem minősített elektronikai eszközök vizsgálati, üzemeltetési adataiból becsüljük a modellek aktualizálásához szükséges meghibásodási rátákat és azokat befolyásoló modell tényezőket.
- b) A modellek kialakításához szükséges adatösszetételek generálása elsődleges adatforrásokból (alkatrészek laboratóriumi vizsgálata, berendezések üzemeltetése) történik. Az adatok helyes értelmezése, az alkatrészek felhasználási követelményeinek és alkalmazási tapasztalainak figyelembevétele szükségessé teszi hogy az alkatrész gyártója (illetve az alkatrészek vizsgálatait végző állomás) és az alkatrészek felhasználója (a berendezésgyártók) között szoros együttműködés alakuljon ki.
- c) A több adatforrásból származó meghibásodási ráták összevont becslésére olyan súlyozási módszert célszerű alkalmazni, amelyben az egyes adatforrásokból kapott meghibásodási ráta becslésekhez rendelt súlyozási tényezők fordítottan arányosak a becslések szórásnégyzetével.
- d) Az alkatrész-kategóriák modelljeinek időszakos aktualizálása során előtérbe kell helyezni a viszonylag kisebb adatmennyiséget megkövetelő eljárásokat. Ha a modellek függvényalakját és egyes kevésbé fontos állandóit ismertnek tételezzük fel a megbízhatósági kézikönyvek adatai alapján, akkor elegendő a lényegesebb modellállandók becslése a megfigyelési adatokból a legkisebb négyzetek módszerével. A modellek lineáris alakban való előállítása érdekében alkalmas transzformációt kell elvégezni a modell függő változójában és független változóiban egyaránt. Ha a modell az állandóknak nem lineáris függvénye, akkor közelítésként sorbafejtéssel kell linearizálni.

- e) A tanulmányban a modellállandók meghatározásának módszereit integrált áramkörök és félvezető eszközök esetében tárgyaltuk, a többi elektronikai alkatrészkategória modelljének állandói hasonló módon határozhatók meg.
- f) Az elektronikai alkatrészek megbízhatósági modelljei akkor használhatók fel gyorsan és pontosan a berendezések megbízhatóságának előrejelzésére, ha a modelleket és azok adatösszetételét számítógépes megbízhatósági adatbankban rendszerezik. Célszerű ezen túlmenően a modellek aktualizálási algoritmusainak számítógépes tárolása és az egyes alkatrész-kategóriák modellállandóinak pontosabb meghatározására az aktualizálási eljárások számítógépes végrehajtása.
- g) Az alkatrészek megbízhatóság-előrejelzési modelljei elősegítik a berendezés tervezőjének munkáját a megbízható alkatrésztípusok és alkalmazási feltételek megválasztásában, ezáltal pedig lehetővé válik már a tervezés szakaszában a berendezés karbantartási-javítási stratégiájának kialakítása, a tartalék-alkatrész készlet tervezése.

I R O D A L O M

- [1] MIL-HDBK-217/C: USA Megbízhatósági kézikönyv (1981).
- [2] RDF-80: Francia Megbízhatósági kézikönyv, 1980.
- [3] Balogh, A.: Prediction of system reliability Quality. XXIV. No. 3. (1980). 4–8.
- [4] Tomsy, J. L. et al.: System reliability estimation from several data sets. Proc. Ann. Rel. and Maint. Symp. USA, 1976, 18–24.
- [5] Balogh, A.: The estimation of component reliability from different data sources. Proc. RELECTRONIC 82. Budapest, 1982. 32–39.
- [6] Váradi, I.–Balogh, A.: On the evaluation of component reliability prediction model with Computer technique. Proc. RELECTRONIC '82. Budapest, 1982. 226–235.
- [7] Reynolds, F. H.: Measuring and modelling integrated circuit failure rates. Proc. EUROCON '82. Dánia, 1982. 259–264.
- [8] Jääskeläinen, P.: LSI reliability prediction based on time. Microelectron. Reliab. 20. No. 2. 1980, 351–356.
- [9] Goarin, R.: Predicted and observed reliability for electronic components. Proc. RELECTRONIC '82. Budapest, 1982. 105–116.
- [10] Johnston, C.–Reynolds, F. H.: An appraisal of integrated circuits reliability prediction models. Proc. 3rd Conf. on Rel. and Maint. Franciaország, 1982. 483–488.