



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

MOLNÁR ZSOLT

Kritikus beágyazott rendszerök üzem közbeni tesztelése

Témavezető: dr. Schuster György PhD

BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2023. szeptember 27.

Komplex vizsga bizottsága:

Elnök:

Prof. Em. Dr. Berek Lajos

Tagok:

Dr. habil. Farkas Tibor

Dr. habil. Wührl Tibor

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Em. Dr. Berek Lajos

Titkár:

Dr. Bakucz Péter Pál

Tagok:

Csikósné Dr. Pap Andrea

Dr. habil. Szádeczky Tamás

Dr. Szűcs Endre

Bírálok:

Dr. habil. Farkas Tibor

Dr. Varga Péter

Nyilvános védés időpontja:

2023.

NYILATKOZAT

A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott Molnár Zsolt kijelentem, hogy a Kritikus beágyazott rendszerek üzem közbeni tesztelése című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2023.09.27.



.....
Molnár Zsolt

TARTALOM

BEVEZETÉS.....	4
A tudományos probléma megfogalmazása.....	4
Célkitűzések	5
A téma kutatásának hipotézisei	6
Kutatási módszerek	7
1 ÜZEM KÖZBENI BEÉPÍTETT ÖNTESZT PEREMFIGYELÉSES VIZSGÁLAT ALKALMAZÁSÁVAL	9
1.1 A beépített önteszt.....	9
1.1.1 A tesztelés jelentősége és alkalmazása	9
1.1.2 A beépített öntesztelés	13
1.2 A peremfigyeléses vizsgálat	19
1.2.1 A peremfigyeléses vizsgálat szabványai.....	20
1.2.2 A peremfigyeléses vizsgálat szintjei, a felmerülő problémák és megoldásuk	36
1.2.3 A peremfigyelés rendszerszintű kiterjesztésének architektúrái	41
1.2.4 A peremfigyeléses vizsgálat eszközei.....	44
1.3 A peremfigyeléses vizsgálat üzem közbeni beépített öntesztben való alkalmazhatósága..	51
1.3.1 Lehetőségek és korlátok	56
1.3.2 Esettanulmány - Mágneses tér megváltozását érzékelő felügyelet nélkül üzemelő szenzor	58
1.4 Összegzés.....	61
2 KEVERT JELŰ VIZSGÁLATOT TÁMOGATÓ INTEGRÁLT ÁRAMKÖRI STRUKTÚRA KIDOLGOZÁSA	63
2.1 A kevert jelű vizsgálat célja.....	63
2.1.1 A kevert jelű vizsgálatnál felmerülő feladatok	63
2.2 A kevert jelű vizsgálatot támogató integrált áramkör egy lehetséges struktúrájának elemei	70
2.2.1 Az analóg vizsgálat infrastruktúrája	70
2.2.2 A digitális vizsgálat infrastruktúrája	76
2.2.3 A teljes infrastruktúra	77
2.2.4 Az IEEE 1149.1 kompatibilis vezérlő: a kommunikáció és a vezérlés.....	78
2.3 A kidolgozott infrastruktúra alkalmazhatóságának kérdései	79

2.3.1	Lehetőségek és korlátok	79
2.4	Összegzés	81
3	ANALÓG ÁRAMKÖRÖK DIGITÁLIS JELEKKEL VALÓ RÉSZLEGES VIZSGÁLATA	82
3.1	Analóg áramkörök gerjesztése digitális jelekkel.....	82
3.1.1	A megoldás létjogosultsága	82
3.1.2	A digitális jelek felhasználhatósága analóg áramkörök tesztelésére.....	83
3.2	A digitális – analóg és az analóg – digitális jelformálás	84
3.2.1	Feladatok és a szükséges kiegészítő áramkörök digitális – analóg irányba	84
3.2.2	Feladatok és a szükséges kiegészítő áramkörök analóg – digitális irányba	85
3.3	A vezérlés gerjesztés és érzékelés esetén	85
3.4	Esettanulmány – Egy ADSL DSLAM erősítő fokozatainak vizsgálata.....	86
3.4.1	A megoldás értékelése az esettanulmány alapján	91
3.5	Összegzés	92
4	KRITIKUS BEÁGYAZOTT RENDSZEREK MŰKÖDÉSÉNEK KÖVETÉSE ÉS MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK NÖVELÉSE ÖNTESZT ALKALMAZÁSÁVAL	93
4.1	A beágyazott rendszerekre jellemző meghibásodások	93
4.2	A naplózás, az öntesztelés és a működés követésének jelentősége.....	95
4.2.1	A naplózó rendszerrel szemben támasztott követelmények	95
4.2.2	Az önteszteléshez szükséges kiegészítő rendszerrel szemben támasztott követelmények	96
4.3	A kiegészítő naplózó és önellenőrzést végző rendszer javasolt kialakítása.....	98
4.3.1	Strukturális kialakítás	98
4.4	Az alkalmazhatóság vizsgálata	100
4.4.1	A vizsgált rendszerben szükséges átalakítások a módszer alkalmazásához.....	100
4.4.2	A kiértékelés módja.....	101
4.5	Összegzés	102
5	A SOROS VEKTOROS FORMÁTUM PARANCSRENDSZERÉNEK KIEGÉSZÍTÉSE ANALÓG ÁRAMKÖRI PARAMÉTEREK MÉRÉSE CÉLJAIRA.....	103
5.1	A soros vektoros formátum és jelenlegi alkalmazása	103
5.1.1	A soros vektoros formátum specifikációja, parancsrendszere	103
5.2	A soros vektoros formátum parancsrendszerének javasolt kiegészítése kevert jelű teszteléshez	105
A javasolt parancsrendszer-elemek	106	

5.3	Példák a javasolt parancsrendszer-elemek használatával történő mérésekre.....	106
5.3.1	Konkrét példák önálló áramköri elemek vagy egyszerű hálózatok esetére.....	107
5.3.2	Mérendő: általános négyfólyus (általános analóg klaszter)	113
5.3.3	Egyéb mérhető paraméterek.....	117
5.4	Összegzés.....	117
	ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK.....	119
	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	122
	AJÁNLÁSOK, HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEK.....	123
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	124
	IRODALOMJEGYZÉK	125
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK.....	132
	TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE.....	134
	ÁBRÁK JEGYZÉKE.....	135

BEVEZETÉS

A tudományos probléma megfogalmazása

Témám a beágyazott rendszerek, ezen belül a kritikus beágyazott rendszerek üzembiztonságát javító módszerek kutatása. A beágyazott rendszer egy speciális, előre meghatározott, optimalizált felépítésű, feladat vagy feladathalmaz ellátására létrehozott, intelligenciával¹ ellátott rendszer. Alapja általában valamilyen processzor (mikrovezérlő, általános célú processzor, célprocesszor), vagy valódi párhuzamos működés megvalósítására képes eszköz (pl. FPGA). A rendszer működését – és részben üzembiztonságát is – nem csak a hardver határozza meg, hanem processzornál a futtatott program, FPGA-nál pedig a kialakított konfiguráció is. Mivel a hardver feladat-orientált, így egyedi vagy speciális kiegészítő elemeket (perifériákat) igényel.

Szűkítve a beágyazott rendszerek körét, a kritikus beágyazott rendszerek esetében kiemelt szerepe van az üzembiztonságnak, ahol egy funkció vagy a teljes rendszer meghibásodása közvetlen és jelentős veszteséggel járhat. Ilyen jelentős veszteség lehet az emberi egészség vagy élet, a berendezés károsodása, vagy környezeti károk. Kritikus beágyazott rendszerekkel leginkább a járműipari (főként a vasúti és a légi), az ipari, az orvosi és katonai alkalmazásoknál találkozhatunk [1]. A kritikus beágyazott rendszereket elsődlegesen a megbízhatóságra tervezik. (Sokkal kevésbé lényegesek az egyéb tényezők, mint az általános beágyazott rendszereknél, úgy, mint az ár, fizikai méret, tömeg, stb.) A jövőbeni beágyazott rendszer alkalmazásoknak várhatóan egyre nagyobb része lesz kritikus beágyazott rendszer, mivel egyre nő az igény a fél-autonóm illetve autonóm működésű, a valós világgal együttműködő, nagy megbízhatóságú, intelligens megoldásokra [2]. Emiatt úgy gondolom, hogy kutatási témám időszerű.

A jelenlegi kritikus beágyazott rendszerekben általában létezik valamilyen szintű önteszt funkció. A beépített öntesztet (Built-In Self Test) vagy automatikusan, indításkor futtatja le a rendszer, vagy külön kérésre (parancsra). Ezt a típusú öntesztet, amely nem a normális üzem közben valósul meg, hanem üzemszünetben vagy bekapcsoláskor, nem-konkurens módszernek hívják, és meglehetősen elterjedt. Hibája, hogy a keletkező hibák bizonyos típusait nehéz vele azonosítani, detektálni. A konkurens önteszt, amely a normális üzem közben történik, sokkal kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezik a hiba-felfedési arány tekintetében, megvalósítása azonban számos problémát vet fel, és elterjedése is szűkkörű. Irodalomkutatásom során azt találtam, hogy a konkurens öntesztet

¹ Az intelligencia, vagy az intelligens jelző a disszertációban önmagában használva nem a mesterséges intelligenciára (MI, angolul artificial intelligence, AI) utal. Az intelligencia jelen esetben azt jelenti, hogy a (beágyazott) rendszernek van olyan képessége, amellyel képes interakcióba lépni a környezetével, azaz bemeneti információkat fogad, és ennek megfelelően kimeneti információkat állít elő programozott működése során.

lényegében csak részegységek vizsgálatára használják [3] [4] [5]. Bár az alpmódszerek és a matematikai háttér meglehetősen alaposan kidolgozott, de a rendszer szintre való kiterjesztés eszközei és módszerei hézagosak. Főként digitális egységek vizsgálatát célozzák meg az önteszt során, az analóg részegységek öntesztrel való vizsgálata felületes (ha egyáltalán van). Kutattam, hogy az öntesztben milyen módszereket és technológiákat alkalmaznak a hibák felderítésére. Számos irányból megvizsgáltam a témát, és azt találtam, hogy többnyire a régi módszereket alkalmazzák, azokat tökéletesítik, optimalizálják. A korszerűbb, egyre inkább terjedő technológiák – mint például a peremfigyelés – ilyen célú alkalmazása meglehetősen ritka, és nem megfelelően kidolgozott. Tudtommal a mai napig nem alkalmazzák rendszerszintű konkurens önteszt céljára a peremfigyeléses tesztelést. Digitális rendszerelemeknél való alkalmazásra találtam néhány kutatást [6] [7], de analóg részegységekre, vagy teljes, digitális és analóg részegységeket tartalmazó rendszerekre egyáltalán nem. Dolgozatom megírásában az motivált, hogy az itt vázolt problémákra legalább részleges választ, megoldást adjak.

Célkitűzések

Céлом olyan módszerek és eljárások kidolgozása, amellyel lehetővé válik az elektronikai rendszerek/berendezések üzem közbeni „fedett” tesztelése, amely még azelőtt felfedheti a hibát mielőtt az észlelhető hatásokat okoz. A megbízhatóság növelése véleményem szerint nagyobb mértékű lehet, ha a rendszerben nem csak a digitális, hanem az analóg egységek hibáit is megpróbáljuk felderíteni, így ezt az irányt tűztem ki célul. Ennek érdekében minél kiterjedtebb lehetőségeket kell teremteni a digitális egységek funkcionális és szükség esetén parametrikus (pl. jelterjedési idő, jelszint), valamint az analóg egységek funkcionális és parametrikus vizsgálatára. A cél eléréséhez elsősorban a jelen és a jövő hibadiagnosztikai eljárásának tartott peremfigyeléses technika felhasználását preferálom. A probléma megoldása érdekében a következő, egymásra épülő részcélokat tűztem ki:

- Kutatást kellett végezni a meglévő digitális áramköri tesztelési eljárások területén. Meg kellett vizsgálni, hogy a gyártásban lévő, peremfigyeléses hurokba köthető áramkörök hogyan használhatóak fel a további célok eléréséhez.
- Meg kellett vizsgálnom, hogy hogyan lehet kiterjeszteni a tesztelést az analóg áramköri egységekre. Főbb kérdések, amelyekre választ kellett találnom: milyen parametrikus jellemzők vizsgálhatóak üzem közben, és milyen eljárással.
- Kutatást kellett végezni az elektronikus készülékek tesztelhetőre tervezésével kapcsolatban. Meg kellett vizsgálnom, hogy hogyan oldható meg azoknak az analóg és digitális áramköri elemeknek a vizsgálata, amelyek nem lettek tesztelhetőre tervezve.

- Választ kellett találnom arra, hogy milyen módon lehet biztosítani az üzem közbeni tesztelhetőséget. Meg kellett becsülnöm, hogy az általam kidolgozott egyedi megoldások milyen mértékben javítják a hibafelderítést és ezen keresztül a megbízhatóságot.
- Ki kellett alakítanom egy modellt, amelyen a gyakorlatban vizsgálható, tanulmányozható az üzem közbeni tesztelés.

A kutatási témám jelentőségét és aktualitását a kritikus beágyazott rendszerek fokozódó mértékű alkalmazása, terjedése adja.

Kutatásaim során érintőlegesen kutattam több, a témámhoz kapcsolódó területet, de dolgozatomban főként terjedelmi okok miatt nem tárgyalom ezeket. Több téma közül kiemelem, hogy disszertációmban nem szerepelnek a következők:

- gazdasági és pénzügyi hatások, azaz, hogy egy-egy általam javasolt megoldás mennyi többletköltséget okoz, vagy mekkora pénzügyi előnnyel jár;
- megbízhatóságra és üzembiztonságra gyakorolt hatások, azaz, hogy az általam javasolt megoldások milyen mértékben befolyásolják ezt a két jellemzőt, illetve a járulékos elemek megbízhatósága számszerűen milyen hatással van az eredő megbízhatóságra.

A téma kutatásának hipotézisei

H1. Felteszem, hogy a peremfigyeléses vizsgálat (Boundary Scan technológia) alkalmazásával egy kritikus beágyazott rendszer kiegészíthető olyan módon, hogy alkalmassá válik üzem közbeni beépített önteszt elvégzésére.²

H2. Feltételezem, hogy megalkotható egy olyan integrált áramkör struktúra, amelynek segítségével kevert jelű³ áramköri elemek működése vizsgálható, és így a kritikus beágyazott rendszerek központi és kiegészítő áramkörei nagyobb lefedettséggel tesztelhetőek, mint korábban.⁴

H3. Feltételezem, hogy megalkotható egy olyan módszer az analóg áramkörök digitális jelekkel való részleges funkcionális tesztelésére, amelynek segítségével bizonyos áramköri egységek működőképességéről információ gyűjthető abban az esetben is, ha a tesztelt rendszerben a kevert jelű peremfigyelés nem áll rendelkezésre, vagy nem megvalósítható.

² Jelenleg a peremfigyeléses vizsgálatot a normális üzemen kívüli tesztelésre használják, a gyártás közbeni vizsgálatok, illetve a bekapcsoláskor végzett, vagy külön elrendelt beépített tesztelés (Built-In Self Test) során.

³ Kevert jelű: analóg és digitális jeleket is használó (mixed signal).

⁴ Az integrált áramkör képes analóg gerjesztőjelek előállítására, valamint a vizsgált áramkör analóg válaszainak mérésére.

H4. Felteszem, hogy létrehozható egy olyan általános modell, amely egy kritikus beágyazott rendszer eredő megbízhatóságát képes növelni egy naplózást végző, és egy üzem közben, vagy külön parancsra végzett önellenőrzést megvalósító rendszerrel.⁵

H5. Feltételezem, hogy kialakítható egy kiegészítő parancskészlet a soros vektoros formátum (SVF) parancsrendszeréhez, amely az IEEE 1149.1 és IEEE 1149.4 szabványra alapozva, felhasználva a H2.-ben definiált áramkör struktúrát, alkalmas analóg áramköri mérésekre, az áramkörben lévő alkatrészek és funkcionális részegységek paramétereinek meghatározására.

Kutatási módszerek

A munkám alapvetően alkalmazott kutatásból és kísérleti fejlesztésből áll. A vizsgálati módszerek közül természetesen először irodalomkutatásra volt szükség, amely során a hazai és nemzetközi, nyomtatott és elektronikus forrásokból arra kerestem a választ, hogy a kritikus beágyazott rendszerek alkalmazási területei közül melyeken, és milyen módszerekkel végzik az üzem közbeni tesztelést. Ez alapján döntöttem el, hogy a következőkben melyik, általam elgondolt elvre, illetve módszer kidolgozására fektessek hangsúlyt, hogy új tudományos eredményt hozhassak létre.

Ennek érdekében a megszerzett tudást folyamatosan rendszereztem, ami segített abban, hogy átlássam a bennem megfogalmazódó újabb és újabb problémák megoldási lehetőségeit. Megfigyeléseket végeztem a mérnöki munkám során, amelyek tárgyai az általam megoldandó, vagy egyéb, látókörömbé kerülő tesztelési, diagnosztikai feladatok, problémák voltak. Már az irodalomkutatás megkezdése után folyamatosan publikáltam hazai és nemzetközi kiadványokban és konferenciákon, amelyet a témában való előre haladással párhuzamosan tovább folytattam. Kollégáim, valamint a hasonló témákon dolgozó kutatótársaim visszajelzéseit figyelembe vettem és értelmeztem, illetve ezen visszajelzések alapján nézőpontomat időről-időre áthelyeztem. Amikor az szükségesség vált, akkor a szakterületen dolgozó szakemberekkel és kutatókkal konzultáltam.

A megismert tesztelési/vizsgálati módszerek analízise és elemzése után, részben azok elemeit felhasználva, részben jelentős kiegészítéseket alkotva új módszereket hoztam létre, majd megvizsgáltam, hogy milyen hatást gyakorolnak ezek az új módszerek, eljárások a kritikus beágyazott rendszerek hibáinak korai felismerésére. Ahol annak helye volt, esettanulmányokat végeztem, amelyek egy része megvalósult, működő rendszerek alapján készült.

⁵ A naplózás kiterjedhet a rendszerre ható gerjesztések, a rendszer által létrehozott válaszok, valamint a belső működés közben keletkező jelek rögzítésére úgy, hogy a szükséges kiegészítő elemek meghibásodása nem befolyásolja a rendszer biztonságos működését. Az önellenőrzést megvalósító rendszer képes a külvilág felől érkező jelek helyett a rendszer számára vizsgálójeleket biztosítani, a válaszokat visszamérni és az időképletetést meghatározni, valamint a kimeneteken a valóságos kimeneti jelek helyett a következő fokozatok teszteléshez szükséges analóg és digitális jeleket előállítani.

Végül sokéves tudományos munkám és szakmai tapasztalatom alapján, a kutatási eredményeimet felhasználva, felállítottam az előzőekben olvasható hipotézis pontokat, és ezek mindegyikének igazolását tűztem ki célul.

Ennek a disszertációnak a megírásához szükséges kutatómunkámat 2023. augusztus 15-én zártam le.

1 ÜZEM KÖZBENI BEÉPÍTETT ÖNTESZT PEREMFIGYELÉSES VIZSGÁLAT ALKALMAZÁSÁVAL

1.1 A beépített önteszt

1.1.1 A tesztelés jelentősége és alkalmazása

A tesztelés a tervezési és a gyártási folyamat, valamint sok esetben az üzemeltetés elengedhetetlen része, amelynek célja a hibák minél korábbi felfedezése és javítása. A hibák korai felfedezése csökkenti mind a fejlesztési időt és költséget, mind pedig a gyártási időt és költséget. Az üzemelés során alkalmazott időszakos tesztelés segíti a hibák időben történő felismerését, ezáltal csökkenti a hibás állapotban való működés időtartamát. Biztonságkritikus rendszereknél a hibák időben való felismerése megakadályozza, hogy emberi egészségben vagy életben, a környezetben vagy az anyagiakban kár keletkezzen.

A beágyazott rendszerek fejlesztése és gyártása során a hardver és a szoftver (és/vagy firmware⁶) tesztelése elkülönül, mindkettő egyformán fontos tevékenység a megfelelő funkcionalitás elérése érdekében. A hardver tesztelés célja annak ellenőrzése, hogy az adott hardver részegység vagy kész rendszer megfelel-e az előírt specifikációnak, és megfelelően működik-e a tervezett feladatok végrehajtásához. A működtető program (szoftver vagy firmware) tesztelése a szoftver funkcióinak és minőségének (pl. teljesítményének) ellenőrzésére szolgál. A hardver és a működtető program tesztelése során a fejlesztési vagy gyártási fázisoknak megfelelően különböző módszereket és eljárásokat alkalmaznak, és megint más módszerek és eljárások szükségesek a kész rendszer (hardver és szoftver együttese) teszteléséhez. Ezeknek a módszereknek és eljárásoknak az ismertetésétől még említés szinten is eltekintek, mert az meghaladná e dolgozat kereteit.

Fontos viszont kitérni arra a tényre, hogy a teljes, felépített és üzembe helyezett rendszerről a megfelelően megtervezett gyártás, a pontosan betartott technológia és a különböző fázisokban elvégzett magas hibalefedettségű⁷ és sikeresen elvégzett tesztek mellett is csak azt állíthatjuk teljes biztonsággal, hogy az utolsó teszt elvégzésének pillanatában megfelelően működik. Az üzemelés során bármikor felléphet olyan hibaok, amely meghibásodáshoz vezethet. Céлом a hibaokoknak, esetleg hibáknak a mielőbbi felderítése még azelőtt, hogy érzékelhető hibajelenséget okoznának (a fogalmak definiálása egy bekezdéssel lejjebb található). Ez a cél csak részben érhető el

⁶ A beágyazott rendszerekben alkalmazott programozható logikai eszközöknél (pl. FPGA) a konfiguráló bitminta forrása legtöbb esetben valamilyen hardver leíró nyelven (HDL – Hardware Description Language) megírt kód. Ezt a kódot (pontosabban a belőle fordított konfigurációt) értekezésemben az egyszerűség kedvéért a műszaki gyakorlatban megszokott módon egyszerűen programnak, firmware-nek nevezem.

⁷ Hibalefedettség: az összes észlelhető hiba számának és az összes lehetséges hiba számának hányadosa (fault coverage). Más szóval a lehetséges hibáknak azon része, amelyet az adott teszt felderíteni képes.

bekapcsoláskor végzett öntesztel, mert az nem rendszeresen, és nem a normál üzem közben történik.

Röviden, az egyértelműsítés miatt az ide vonatkozó szabvány (IEEE 610) [8] alapján rögzítem a hibák három szintjét:

1. szint: hibaok (fault):
 - a. hardvereszköz vagy hardver komponens meghibásodása
 - b. a programban helytelen tevékenység, folyamat vagy adat definíció
2. szint: hiba (error):
 - a. a különbség a számított, megfigyelt, vagy mért érték vagy állapot és az valóságos, specifikált vagy elméletileg helyes érték vagy állapot között
 - b. helytelen lépés, folyamat vagy adatdefiníció
 - c. helytelen eredmény
 - d. olyan emberi beavatkozás, amely helytelen eredményhez vezet
3. szint: meghibásodás vagy hibajelenség (failure):
 - a. egy rendszer vagy rendszerkomponens azon állapota, amelyben képtelen a szükséges funkcióit a specifikált minőségben ellátni

A munkámban elsősorban a hardver oldalon jelentkező hibaokok és hibák azonosítását célzom meg, ennek ellenére bizonyos mértékig a szoftver/firmware oldallal is szükséges foglalkoznom. Erre azért van szükség, mert egy rendszer funkcióit a hardver és a szoftver/firmware együtt határozza meg, és mert a fenti lista első két szintjén is összefonódik ez a két komponens.

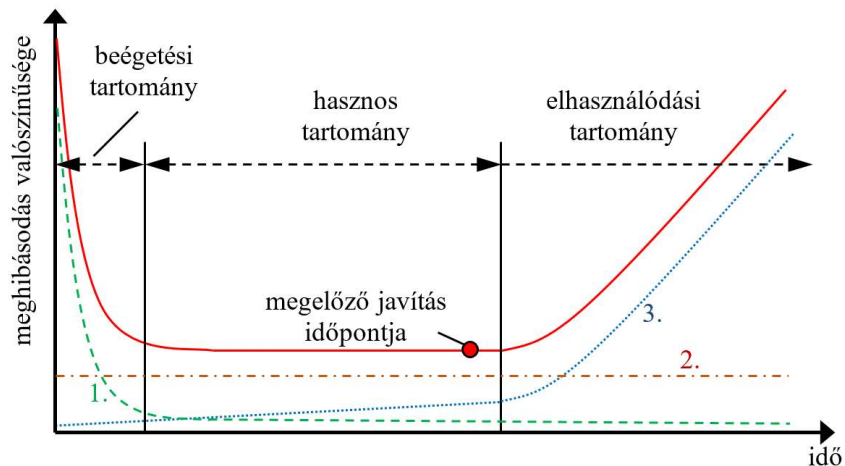
Kérdésként merül fel, hogy a beépített öntesztnek, ezen belül az üzem közbeni beépített öntesztnek egy beágyazott rendszer élettartama alatt hol van jelentősége, melyik az az életszakasza, amiben az alkalmazása a legjelentősebb mértékben fokozza a megbízhatóságot. A következőkben korábbi publikációm [9] alapján áttekintem, hogy ezekben a jellemző életszakaszokban milyen meghibásodásokra lehet számítani, majd következtetést vonok le a feltett kérdés megválaszolására.

Az elektronikai rendszerek meghibásodásai prognosztizálhatóság szempontjából két csoportra oszthatók: az előre látható és az előre nem látható meghibásodásokra.

Az előre látható meghibásodások az elhasználódásból, öregedésből erednek, ezek bekövetkezését általános esetben statisztikai úton meg lehet jósolni. A következő előre látható meghibásodás várható időpontjának meghatározásához a rendszert felépítő alkatrészek alapjellemezőin kívül figyelembe vehetők az üzemeltetés során begyűjtött adatok (pl. az üzemidő, az üzemi és tárolási hőmérséklet,

az üzemi és tárolási páratartalom, a készüléket ért külső behatások, a korábbi meghibásodások, stb.). Az így meghatározott időpont előtt elvégezve a megelőző javítást, a berendezés üzeme közben előre látható meghibásodás bekövetkezésének valószínűsége minimalizálható. Az elektronikai hibák bekövetkezésének prognosztizálása különféle problémákat vet fel, és csak korlátozottan használható.

Az 1. ábra egy alkatrész meghibásodási rátájának változását mutatja az időben. A görbét alakja miatt kádgörbének nevezik.



1. ábra – Az eredő meghibásodási görbe (kádgörbe) és komponensei⁸

A görbe első szakasza, a beégetési tartomány, meredeken esik, mivel a kezdeti meghibásodások magas aránya az idő előrehaladtával rohamosan csökken. Ebben az időszakban az alkatrész megfelelő biztonsággal nem használható. A következő közel egyenes, az időtengellyel párhuzamos szakasz a hasznos (használhatósági) tartomány, ilyenkor az alkatrész a rá jellemző megbízhatósággal üzemel. Az utolsó szakasz az elhasználódási tartomány, ahol a görbe ismét emelkedni kezd. Ezen a szakaszon az alkatrész öregedése miatt nő a meghibásodási arány. A kádgörbe nem csak egyetlen alkatrésze, hanem egy készülékre vagy rendszerre is hasonlóan alakul [10].

A meghibásodási tényezők ezen alakulása természetesen nem általános érvényű. Vannak olyan elemek, amelyeknél a kezdeti szakasz hiányzik, és vannak olyan elemek, amelyek nem öregsenek [11]. A készülékbe (rendszerbe) épített alkatrészek kedvezőtlenül alakuló kezdeti meghibásodási valószínűsége előzetes öregítéssel csökkenthető. Bár ez többletköltséget jelent, de vélhetően korántsem akkorát, mint a teljes rendszer üzem közbeni, esetleg kritikus helyzetben való meghibásodása. Az előzetes öregítés történhet az alkatrész gyártójánál, független vizsgáló állomáson, vagy az alkatrész felhasználójánál (készülékgyártó). Általában ez utóbbi megoldás az

⁸ Forrás: [L1] p. 21 alapján szerkesztette a szerző

optimális [12]. Elektronikai alkatrészek esetében az előzetes öregítés történhet az üzem közben jelentkező igénybevétel alatt, vagy emelt igénybevétellel. Az emelt igénybevétel (pl. az üzemi feszültségnél vagy hőmérsékletnél magasabb feszültség vagy hőmérséklet) lerövidíti az esetleges meghibásodások jelentkezésének idejét.

Az előre nem látható (nem megjósolható) meghibásodások okai olyan véletlen behatások, amelyek a „kádgörbe” használhatósági időintervallumában következnek be. Ilyen ok lehet például az elektrosztatikus kisülés, hirtelen mechanikai behatás (ütődés), páralecsapódás, ellenséges katonai tevékenységek, stb. [13] Mivel e behatások időpontja előre nem ismert, így váratlan meghibásodásnak nevezzük ezeket, amelyek hatása kiszámíthatatlan.

Az eredő meghibásodási görbét alkotó komponensek jellemzőit az 1. táblázatban foglaltam össze.

Komponens száma és megnevezése	A komponens alakulása az időben	Megjegyzések
1. Korai meghibásodások, beégés ⁹ , beégetés	Idővel csökkenő valószínűségű	Gyártáshoz vagy minőségbiztosításhoz kapcsolódó hibaokok jellemzik: forrasztási, érintkezési, szigetelési problémák, rejtett mikroszkopikus törések, repedések, szennyeződések, helytelen beállítások...
2. Véletlenszerű meghibásodások, külső hatás okozta meghibásodások	Időben állandó valószínűségű	Az alkatrészek vagy a rendszer által elviselhető stressz-szint pillanatnyi vagy rövid idejű átlépéséhez köthető meghibásodások.
3. Elhasználódás okozta meghibásodások	Idővel növekvő valószínűségű	Kémiai változásokhoz (korrózió, oxidáció, molekuláris folyamatok) és mechanikai változásokhoz (kopás, kifáradás, zsugorodás) köthető meghibásodások.

1. táblázat - Az eredő meghibásodási görbét alkotó komponensek és jellemzőik¹⁰

Fontos megjegyezni, hogy a rendszerek megbízhatóságát elemeik kapcsolódásának struktúrája befolyásolja. A kapcsolódás struktúrája lehet soros, párhuzamos vagy vegyes (vegyesen soros és párhuzamos). Az egymástól független elemek soros kapcsolódása esetén a teljes rendszerre vetített meghibásodási valószínűség nő, mert a rendszer kifogástalan működéséhez valamennyi elemének kifogástalanul kell működnie. [14] Párhuzamos kapcsolódás esetén a teljes rendszerre vetített

⁹ Beégés: a normális üzemeltetés első szakaszában történnek meg az esetleges kezdeti meghibásodások, ellentétben a beégetéssel, amikor ez a folyamat a normális üzemeltetésen kívüli, a beégetésre dedikált életszakaszban történik meg.

¹⁰ Forrás: [L1] p. 21 alapján szerkesztette a szerző

meghibásodási valószínűség csökken, mert valamely elem meghibásodása esetén az elem által ellátott funkciót átveheti valamely másik, ugyanolyan funkciójú redundáns elem [11] [15].

A fentieket összegezve arra a következtetésre jutottam, hogy a beépített önteszt, ezen belül az üzem közbeni beépített önteszt egy beágyazott rendszer teljes élettartama alatt fokozhatja a megbízhatóságot, de legnagyobb jelentősége a rendszer leghosszabb életszakaszában, a használhatósági tartományban van. Ebben a tartományban normális esetben kis valószínűséggel, ritkán fordulnak elő meghibásodások. Nincs kontrollált környezet, mint a beégetésnél, és nem lehet számítani relatív gyakori meghibásodásra, mint az első életszakaszban vagy az elhasználódási tartományban. Megfelelő, az értekezésemben később ismertetésre kerülő módszerrel nem csak a már bekövetkezett meghibásodást lehet érzékelni, hanem következtetni lehet arra, hogy növekszik a meghibásodás valószínűsége, és magát a meghibásodást megelőző karbantartással és/vagy javítással ki lehet küszöbölni. Lehetőség nyílna arra, hogy a feleslegesen korai megelőző karbantartás időpontját kitolja az üzemeltető, és csak akkor végezze el, amikor az valóban szükségessé válik.

1.1.2 A beépített öntesztelés¹¹

Az elektronikai rendszerek számának növekedése és összetettebbé válása, valamint a velük szemben támasztott megbízhatósági és üzembiztonsági követelmények teljesítése új hibadiagnosztikai módszerek alkalmazását teszi szükségessé. A rendszerek működőképességének folyamatos ellenőrzése elengedhetetlen. Az ellenőrzés nagymértékben egyszerűsödik, és hatásosabbá válik, ha a teszteléshez szükséges egységek jelentős részét az adott rendszer (vagy a rendszert alkotó készülékek, áramköri egységek vagy integrált áramkörök) önmagában hordozza. Ebben az esetben lehetőség nyílik a beépített tesztelés (Built-In Test, BIT), illetve a beépített öntesztelés (Built-In Self Test, BIST) megvalósítására.

Az elmúlt években tapasztalható nagyfokú digitalizáció, és a komplexitás növekedése új kihívásokat jelent a rendszeres, széles körű vizsgálatok terepi elvégzése területén. Példaként hozható a digitális eszközökön alapuló harctéri információs rendszer (Battlefield Information System, BIS), amely képes fogadni az egyes elektronikai készülékek vagy rendszerek beépített tesztelése (Built-in Test, BIT) során keletkező állapotjelzéseket, illetve a működőképességet és a használatot jelző rendszer (Health and Usage Monitoring System, HUMS) jeleit. A beépített teszt az esetek egy részében – elsősorban nem elektronikai, hanem mechanikai részegységek esetében – képes arra, hogy a hibákat felfedje még azelőtt, hogy a készülék üzemképtelenné válna, így figyelmeztető jelzést adhat. A

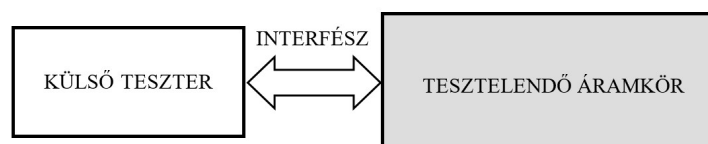
¹¹ Ez a fejezet a szerző korábbi, forrásként megjelölt cikke [22] felhasználásával készült

rendszerekbe épített tesztelés lefuttatása, és a tesztelési eredmények lekérdezése – előre meghatározott ütemben, vagy alkalmasszerűen – lehetőséget ad az eszközök aktuális üzemképességének megállapítására a helyi karbantartás, illetve az irányítás számára [16] [17].

A beépített teszt a terepen történő, minél rövidebb időt, és minél kisebb költséget igénylő javítást is megkönnyíti. Az első szint a hiba észlelése után, hogy az üzemeltetés helyszínén a készülékhez csatlakoztatott egyszerű külső teszterrel (First Line Test Set, FLTS) megállapítják a hibát. Ennek a teszternek nem kell külön vizsgálatok elvégzésére képesnek lennie, elegendő, ha a beépített teszt eredményeit képes megjeleníteni, esetleg részletezett formában. (Esetenként ezek a teszterek tartalmazznak kiegészítő vizsgálatok elvégzésére alkalmas funkciókat.) Egyszerűbb javítások (például áramköri modul cseréje) a vizsgálati eredmények ismeretében a helyszínen elvégezhetőek.

Ha a javítás ezen a szinten nem kivitelezhető, vagy lehetőség van a készülék helyszínéről való elszállítására, akkor következik a második szint. Itt még mindig a terepen (például mobil javítóműhelyben), de már egy emelt képességekkel rendelkező automatikus tesztelő berendezés (Automatic Test Equipment, ATE) segítségével történik a hiba megállapítása, majd a javítás. Amennyiben a hiba a terepen nem felderíthető, akkor magasabb szinten műszerezett javítóműhelyben hozható csak eredeti működési állapotba a készülék.

A hagyományos vizsgálati módszer külső tesztert (External Test Equipment, ETE) alkalmaz. Ebben az esetben a vizsgáló rendszer fizikailag elkülönül a vizsgált rendszertől, közöttük egy általában igen összetett interfész biztosítja a kapcsolatot (2. ábra). A felhasznált vizsgáló berendezés költséges, mivel minden tesztelendő készülékhez másik teszter szükséges. Ezzel a módszerrel – fizikai korlátok miatt – a vizsgált áramköröknek csak kevés pontján lehet beavatkozni (gerjesztést adni), illetve méréseket végezni. A rendszer moduljai csatlakozási pontjainak, illetve a modulokon belüli belső áramköri pontoknak korlátozott elérése miatt a tesztelés minőségi jellemzői nem érik el a kívánt mértéket, ugyanakkor megnövekszik a nemkívánatos zavarok rendszerbe jutásának esélye [18].



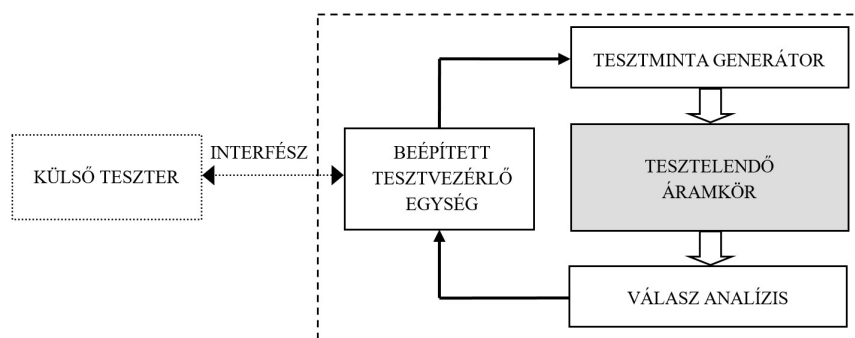
2. ábra – Áramkörvizsgálat külső teszterrel¹²

A beépített teszt az adott rendszer szerves részét képezi, gerjesztést állít elő, valamint a gerjesztésre adott választ analizálja, úgy hogy ehhez külső rendszertől nem, vagy csak kismértékben kap

¹² Forrás: szerkesztette a szerző

segítségét. Fontos megjegyezni, hogy a külső teszter nélkül végzett vizsgálatokhoz a rendszer néhány egységének hibátlanul kell működnie; ilyenek például a tápegység, az órajel-generátor vagy a tesztvezérlő. A beépített teszttel végzett vizsgálat esetén jelentősen egyszerűsödik a tesztelő interfész, javulnak a tesztelés minőségi mutatói, csökken a tesztelési idő, és a tesztelési költségek.

A 2. ábra egy beépített testfunkcióval rendelkező digitális áramköri egység felépítését mutatja (a tesztelendő áramkör normál üzemmódjában működő be- és kimenetek, valamint a járulékos egységek (például multiplexerek) nélkül). A vizsgálandó áramkör bemenetére a tesztminta generátor (Test Pattern Generator, TPG) egy alkalmasan megválasztott jelsorozatot ad, amelyre a tesztelendő áramkör funkciójától és működőképességi szintjétől függően válaszol. Az adott válasz összehasonlítása az elvárt válasszal, valamint az esetleges eltérések megállapítása és bizonyos szintű értelmezése a válasz analízis eredményeként jut vissza – a tesztminta generátort is vezérlő – beépített teszt vezérlőegységbe. Amennyiben a fellépő hibáról részletes információkra van szükség, vagy a beépített teszt képességein túlmutató vizsgálatokat kell elvégezni, akkor az interfészen keresztül külső teszter csatlakoztatására is van lehetőség.



3. ábra – Áramkörvizsgálat egy lehetséges módja beépített teszteléssel¹³

Az interfész az egyes áramköri modulok közötti kapcsolatok – és így az egész készülék – vizsgálatára is alkalmas lehet, az interfészre felfűzött modulok rendszerként is tesztelhetővé válnak.

A hatékony, jó minőségi jellemzőkkel¹⁴ rendelkező beépített önteszt minden esetben kiegészítő hardveres egységeket (test overhead) is igényel. Ezen felül a tesztvezérlő egység és esetenként a tesztelendő áramkör programozható elemei is külön firmware-t vagy firmware részegységeket igényelnek, amelyek növelik az áramkör bonyolultságát.

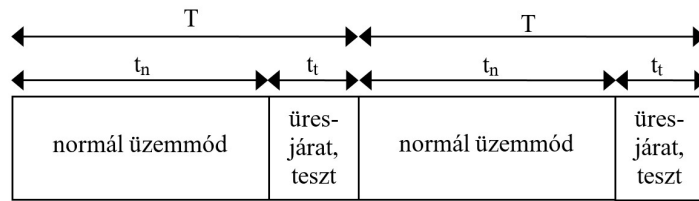
¹³ Forrás: [L2] p. 5 alapján szerkesztette a szerző

¹⁴ hibalefedettség (fault coverage), hiba-behatárolási képesség (fault location), téves hibamegállapítás (diagnostic error) gyakorisága, hibalappangási idő (error latency)

1.1.2.1 A beépített önteszt technikáinak osztályozása

A beépített önteszt aszerint, hogy a normál üzemi működés közben vagy azon kívül zajlik-e, két alapvetően különböző technikára osztható [19].

- a. Off-line beépített öntesztéről beszélünk abban az esetben, ha a beépített önteszt futtatása üzemszünetben történik, esetleg az önteszt futtatásához a rendszert vagy a rendszer részegységeit speciális, tesztelést támogató állapotba kell átkapcsolni. A tesztelésnek ez a formája gyártás, a raktározás vagy tárolás közben, de akár „terepen”, az üzemeltetés szintjén is alkalmazható. Az off-line beépített öntesztelés lehet funkcionáltságot vagy struktúrát megcélzó.
 - A funkcionáltságot megcélzó öntesztelés a tesztelendő rendszer funkcionális, magas szintű leírását és hibamodelljét veszi alapul. A megvalósítás általában szoftveres.
 - A felépítést megcélzó (strukturális) öntesztelés a tesztelendő rendszer alacsony szintű leírását és részletes hibamodelljét veszi alapul. A cél nem a funkcionális, hanem az alkotóelem (akár alkatrész) szintű hiba-megállapítása. A megvalósítás általában hardver kiegészítést és szoftveres megoldást kíván.
- b. On-line beépített önteszt futtatása a normális működési körülmények között/mellett történik, azaz a tesztelt rendszer vagy részegység nem kerül olyan tesztelési üzemmódba, ahol a normális funkcionáltságnak megfelelő működés nem lehetséges. Az on-line beépített önteszt egyidejűség szempontjából lehet nem-konkurens vagy konkurens.
 - Nem-konkurens az önteszt, ha a tesztek elvégzésére a rendszer vagy részegység üresjáratában kerül sor (4. ábra). A tesztelés megoldása általában szoftveres. A tesztelési folyamatnak bármikor megszakíthatónak kell lennie, hogy a normális működés folytatódhasson a tesztelést megelőző állapottól. (Az ábrán látható esetben a normál üzem ideje (t_n) és a tesztelés ideje (t_t) periódusról periódusra azonos, de ez nem feltétlenül kell, hogy így legyen.)
 - Konkurens a beépített önteszt, ha a tesztek elvégzése a rendszer vagy részegység normális, üzemszerű funkciói közben, párhuzamosan történik meg. A tesztelés vagy szoftver alapú, vagy a hardver szükséges mélységben és mértékben való többszörözését igényli. Utóbbi esetben a többszörözött elemek működésének, vagy az általuk szolgáltatott (analóg és/vagy digitális) információk összehasonlítása szükséges.



4. ábra – A nem-konkurens öntesztelés idődiagramja¹⁵

A fenti technikák bármelyikének alkalmazása nem zárja ki, hogy egy adott készüléken vagy rendszeren belül másik technikát is alkalmazzanak.

Más szempontból osztályozva a beépített tesztelési módszereket a tesztelés időpontja és periodicitása szerint 4 típust különböztethetünk meg [20]:

- bekapcsolási beépített teszt (Startup Built-in Test, SBIT)
- folyamatos beépített teszt (Continuous Built-in Test, CBIT)
- indított beépített teszt (Initiated Built-in Test, IBIT)
- karbantartó beépített teszt (Maintenance Built-in Test, MBIT)

A bekapcsolási beépített teszt (SBIT) a készülék vagy rendszer elindulása előtt ellenőrzi az alapfunkciók működését. A vizsgálat eredménye lényegében egyetlen bit: ha az ellenőrzés nem talált hibát, a rendszer működőképes (GO), ha talált, akkor a rendszer részben vagy egészében működésképtelen (NOGO). A vizsgálat kimeneteléről általában a felhasználót is értesíti a beépített tesztvezérlő. Amennyiben a rendszer működőképes, a tesztvezérlő engedélyezi annak elindulását.

A folyamatos beépített tesztet (CBIT) olyan helyen használják, ahol nagyok a megbízhatósági követelmények, mint például a repülőgépeknél vagy a fegyvereknél. Ebben az esetben a rendszer létfontosságú elemeit és funkcióit az üzemszerű működés (mission) közben folyamatosan nyomon követik.¹⁶ A vizsgálat egy része a háttérben, nem konkurens módon, másik része az előtérben, konkurens módon, a normál működéssel párhuzamosan történik. Az előtérben futó rövid, de időzítés- és időkritikus tesztelési részfolyamatok adatokat termelnek a háttérben futó hosszabb, elemző, nem

¹⁵ Forrás: [L3] p. 171 alapján szerkesztette a szerző.

¹⁶ A bekapcsolási és a folyamatos beépített teszt sikertelen lefutása – olyan rendszereknél, amelyek különféle okok miatt nem állhatnak le teljesen – eredményezheti a biztonsági üzemmódba (safe mode) való átkapcsolást. A biztonsági üzemmódban a rendszer – legfontosabb funkcióit megtartva – részlegesen működőképes marad. A legfontosabb funkciók működőképességének biztosítására redundáns egységek használata, vagy a működésképtelen egység más működőképes egységek adatainak felhasználásával való kiváltása lehet a megoldás.

időkritikus részfolyamatok számára. Az előtérben futó tesztelési folyamatok – a háttérben futókkal szemben – képesek felfedni a rövid ideig tartó, átmeneti hibaállapotokat is.

Az indított beépített teszt (IBIT) általában egy igen részletes vizsgálatot végez, ez kizárja, hogy vele párhuzamosan megtartsa a készülék a normál üzemi funkcióit. Segítségével állapítható meg legbiztosabban a rendszer működőképessége (például bekapcsoláskor, a rendszer normál üzeme előtt). Az indított beépített teszt képes a legpontosabban meghatározni a hiba helyét.

A karbantartó beépített teszt (MBIT) célja a karbantartás során szükséges ellenőrzések elvégzése. Karbantartáskor általában néhány memóriarekeszhez kell hozzáférni, ezeket kell olvasni és írni (például hibakód kiolvasás, törlés), vagy javított szoftververziót kell letölteni (upgrade). Ezeknek a tevékenységeknek a támogatása és ellenőrzése tartozik a karbantartó beépített teszt feladatai közé.

1.1.2.2 Összegzés, következtetések

A szakirodalmat tanulmányozva kijelenthető, hogy a beépített önteszt terjedése és alkalmazása töretlen lendületet mutat az utóbbi 25-30 évben. A beépített teszt alkalmazhatóságát több tényező határozza meg, illetve korlátozza. Bizonyos rendszerek – fizikai felépítésük vagy funkciójuk miatt – nem alakíthatóak ki úgy, hogy hatásos öntesztet lehessen beépíteni. Ezek a rendszerek csak külső tesztelő készülék (External Test Equipment, ETE) segítségével vizsgálhatóak. Más esetben a beépített teszt által vizsgált paraméterek a készülék helyes működése közben, illetve meghibásodáskor olyan kis értékben térnek el egymástól, hogy a hiba detektálásához igen szűk tűrési paraméter-tartomány megállapítása szükséges. Ez viszont fokozza a téves hiba-megállapítás lehetőségét, ilyenkor bár az önteszt hibát jelez, de a készüléket kiemelve a környezetéből, külső teszterrel vizsgálva előfordulhat, hogy a hiba nem jelentkezik.

A beépített teszt alapvetően egy belső működést vizsgáló eljárás, így nem biztosít külső gerjesztést (bemenő jelet) a rendszer bemeneti interfésze számára, és nem vizsgálja a gerjesztésre adott választ (kimenő jelet) sem a kimeneti interfészen, azaz nem képes külső, zárt hurkú vizsgálat elvégzésére. Zárt hurkú vizsgálatot lehetővé tevő beépített teszt alkalmazása növelhetné a hibalefedettséget.

A belső, intermoduláris kapcsolatok vizsgálata – az egyre nagyobb számban felmerülő igény miatt – egy igen dinamikus fejlődő terület, amellyel a peremfigyelés (boundary scan) foglalkozik. A meglévő módszerek alapvetően a digitális áramköri egységek kapcsolatainak vizsgálatára terjednek ki. Bár létezik szabvány a kevert jelű vizsgálatra is, de annak alkalmazása nem elég kiterjedt. Úgy gondolom, hogy annak ellenére, hogy az analóg jelek vizsgálatához viszonylag bonyolult járulékos áramkör (amely tartalmaz többek között analóg kapcsolókat, analóg-digitális és digitális-analóg

átalakítókat, stb.) szükséges, valamint a jel jellemzőinek kis bizonytalanságú meghatározásához megfelelően nagy mintavétel-gyakoriság kell, van létjogosultsága az analóg egységek öntesztelésének is. Elmondható, hogy a járulékos áramkörök analóg funkcióknál az eredeti villamos paraméterek romlását okozhatják, digitális funkcióknál pedig időzítési problémák merülhetnek fel, de ezek az esetek többségében elfogadhatóak, vagy kezelhetőek.

A fentiek miatt az analóg kapcsolatok és a külső interfészek – amelyek elektromos szempontból a legsérülékenyebbek – gyakran nincsenek a beépített tesztbe bevonva, amely csökkenti a hibalefedettséget. A beépített teszt járulékos áramkörei – mint minden áramkör – meghibásodhatnak, csökkentve ezzel a rendszer megbízhatóságát. Azt, hogy a beépített teszt mely áramköri egységek vizsgálatát végezze el, illetve melyek ne rendelkezzenek ezzel a lehetőséggel, jelentősen befolyásolja a tervezési és a gyártási költség. Bár a minél nagyobb mértékű beépített teszt növeli a megbízhatóságot, és csökkenti a javítási költségeket, ugyanakkor a tervezés időszükséglete – és így a költség is – exponenciálisan nő, valamint a gyártásra fordítandó összeg is emelkedik [21].

A fenti technológiák hozzájárulnak a megbízhatóság növekedéséhez, illetve az üzemeltetési költségek csökkenéséhez. Az üzemeltetés során begyűjtött információkból meghatározhatóak a hibák keletkezésének előzményei és a hibák időbeni eloszlása (hiba típusok és előfordulásuk gyakorisága). A javításra fordítandó idő (állási idő) lecsökken, mivel a beépített teszt képes a rendszerben jól behatárolni a hiba helyét. A hibakereséshez nem kell nagy beszerzési és fenntartási költségű eszközöket a terepen tartani, illetve ezek száma csökkenthető. A pontos hibahely-meghatározás eredményeit összevetve a hibák előfordulási gyakoriságával lehetőség nyílik arra, hogy meghatározható legyen, hogy a megbízhatóság növelése érdekében hol kell változtatni a rendszeren. [22]

1.2 A peremfigyeléses vizsgálat¹⁷

Ebben a fejezetben a peremfigyelés technológiájának rövid bemutatását teszem meg, röviden ismertetem a szabványt, a teszteléshez használható eszközöket és struktúrákat. A fejezet tekinthető korábbi kutatómunkám kivonatának. A részletek a hivatkozott publikációkban találhatóak meg, viszont a dolgozatomban az eredményeimet és következtetéseimet közlöm.

A peremfigyelés (Boundary Scan) egy csaknem 35 évre visszatekintő, folyamatosan fejlődő technológia. Az eljárás szabványosítása 1990-ben történt meg, amelyet a következő években további, kiegészítő szabványok követtek. A szabványsorozat folyamatosan fejlődik, legújabb tagját

¹⁷ Ez a fejezet a szerző korábbi, forrásként megjelölt cikkei [9] [59] felhasználásával készült

2017-ben publikálták, a legújabb frissítés a szabványsorozat egyik tagjához pedig 2022-ben érkezett. Ezek alapján kimondható, hogy a peremfigyelés egy élő, a beágyazott rendszerek fejlődését folyamatosan követő technológia.

A peremfigyelés alapgondolata, hogy az áramköröket egészében, vagy részegységeire bontva úgy vizsgáljuk, hogy a be- és kimeneti pontjai (fizikai kivezetései), és a magáramkör között egy-egy, a tesztelési feladatok elvégzésére alkalmas cellát (peremfigyelő cella) helyezünk el. Ezek a cellák virtuális mérőtűként működnek, amelyeken keresztül gerjesztés vihető be, illetve a pontok logikai szintje mérhető. Ezek a cellák digitális rendszereknél sorosan felfűzve egy léptető regisztert alkotnak, amely rendelkezik párhuzamos írási és olvasási lehetőséggel is. A cellák soros beírásával (majd párhuzamos kiolvasásával) elvégezhető a tesztvektorok bevitele, majd párhuzamos beírással a válaszjelek mintavételezése, a soros kiolvasással pedig a tesztadatok kiléptetése történhet. Az alapszabványra épülő többi szabványban leírtak ennél összetettebb, speciális, illetve nem csak digitális (hanem kevert jelű) vizsgálatot is támogatnak, amiről a későbbiekben írok.

A peremfigyeléses technológia általánosan használható, és számos processzorban, mikrovezérlőben és FPGA-ban, valamint egyéb eszközökben is megtalálható. A szabványsorozat lehetővé teszi az áramkörök áramköri tesztelését, hibakeresését és diagnosztizálását, valamint az elektronikus berendezések programozását és konfigurálását is.

1.2.1 A peremfigyeléses vizsgálat szabványai

A következőkben röviden, a további kutatásaimhoz és a munkám bemutatásához szükséges mértékben ismertetem, összegzem és értékelem a peremfigyeléses vizsgálat jelenleg meglévő tagjait. Az IEEE 1149.1 és IEEE 1149.4 szabványok nagyobb súllyal szerepelnek, mert egyrészt az IEEE 1149.1 szabvány alapszabvány (tehát az összes többi szabvány figyelembe veszi), valamint a további munkámban elsősorban ezeket használtam, illetve ezek képezik az alapját két tézispontomnak is.

A szabványokban használt jelöléseket fogom használni ebben a fejezetben és a továbbiakban is, amennyiben azok a peremfigyelés integrált áramkörön belüli rendszerének részei. Úgy gondolom, hogy erre az egyértelműség kedvéért van szükség, bár ezek a jelölések részben nem szabványosak. A jelölések első használatánál minden esetben utalok a jelöléshez tartozó áramköri elemre vagy funkcióra.

1.2.1.1 IEEE 1149.1-2013 – A digitális peremfigyelés alapszabványa

E szabvány [23] definiálja az integrált áramkörbe építhető tesztlogikát, amely szabványos lehetőséget ad a következőkre (főként a tisztán digitális áramkörökre fókuszálva):

- az integrált áramkörök közötti összeköttetések vizsgálata a nyomtatott áramkörbe való beültetés és beforrasztás után;
- az integrált áramkör funkcióinak tesztelése (magáramkör és a peremfigyelés miatt szükséges járulékos, kiegészítő áramkörök);
- az áramkör működésének megfigyelése normál (azaz nem teszt) üzemmódban, vagy a működésébe való beavatkozás (beleértve a peremfigyeléssel nem rendelkező áramköri részleteket is).

Mindehhez egy képességeihez viszonyítva egyszerű rendszert használ: a peremfigyelés-regisztert (boundary-scan register) és egyéb tesztelést segítő logikai elemeket, amelyek egy interfészen, a TAP-en (Test Access Port) keresztül érhetőek el.

Az ebben a szabványban rögzített áramkörök teszik lehetővé a tesztutasítások és a tesztadatok bevitelét a tesztelendő alkatrészbe vagy áramkörbe, majd a tesztutasítások végrehajtása után lehetővé teszik az eredmények kiolvasását. A tesztutasítások egy része átveszi az vezérlést az alkatrész kimeneteinél egy másik részük pedig megfigyeli az alkatrész bemeneteit. Minden információ (utasítások, tesztadatok és teszteredmények) egy bites soros formában kerülnek továbbításra.

A műveletek sorrendjét egy buszvezérlő határozza meg, amely lehet egy automatikus tesztberendezés (Automatic Test Equipment, ATE) vagy egy olyan rendszerelem, amely egy komplex architektúra részeként egy magasabb szintű tesztbuszhoz kapcsolódik. A vezérlés a buszvezérlő által kiadott tesztüzemmód-választó (Test Mode Select, TMS) és tesztelő órajel (Test Clock, TCK) jelekkel történik. A tesztelési lépések mindig egy olyan, a szabványban rögzített állapotból indulnak, amelyben a tesztáramkörök inaktívak. A tesztelés üzemmód aktiválása után a műveletek jellemző sorrendje a következő:

1. A végrehajtandó művelethez tartozó utasítás bináris kódját sorosan beléptetjük az alkatrész utasítás regiszterébe (Instruction Register, IR).
2. Ha gerjesztést kell kiadni (akár a magáramkör, akár a külvilág felé), akkor a tesztvektort az utasítás betöltéséhez hasonló módon kell beléptetni a peremfigyelés-regiszterbe. A tesztadatok mozgatása nincs hatással a már betöltött utasításra.

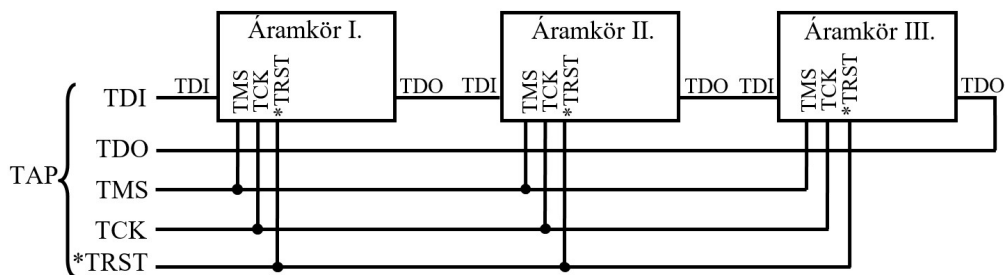
3. Ha érzékelni kell, azaz a magáramkör vagy a kivezetések felől érkező választ kell detektálni, akkor a peremfigyelés-regiszterekkel lehet mintavételezni a logikai szinteket.
4. Az utasítás végrehajtása után a mintavételezett jelek eltárolt értéke sorosan kiléptethető. Szükség esetén ezzel egyidőben újabb tesztvektor léptethető be. Ez nincs hatással az eltárolt utasításra, tehát az újra végrehajtható.
5. A tesztelés folytatható további utasítások betöltésével és végrehajtásával, vagy és tesztvektorok beléptetésével és a válaszok kiléptetésével, hasonlóan az előzőekben leírtakhoz.
6. A vizsgálat lezáráskor a teszt üzemmódból vissza kell térni a normál üzemmódba, de a tesztelt áramkör belső állapotai és így a kivezetésein megjelenő logikai jelszintek határozatlanok lehetnek, a teszt biztonságos lezárásának külön figyelmet kell szentelni.

Az előzőekben leírtak alapján látható, hogy több léptetőregiszter is van rögzítve a szabványban, amelyek multiplexelve kapcsolhatóak a TAP soros bemenete és soros kimenete közé. Ezek adják az előbbiekben említett TMS és TCK csatlakozások mellett a másik két kötelező TAP csatlakozási pontot: az éppen használt léptetőregiszter bemeneti pontja a tesztadat bemenet (Test Data Input, TDI), a kimeneti pontja pedig a tesztadat kimenet (Test Data Output, TDO). A TAP egy opcionális bemenettel is rendelkezhet, ez a teszt alaphelyzetbe állítás (Test Reset, *TRST¹⁸), azaz a TAP csatlakozás és a tesztelés egy 4 vagy 5 pontos interfészen keresztül történhet. A tesztelő interfész pontjainak száma nem függ a vizsgált alkatrész, áramköri panel, vagy rendszer bonyolultságától. A TDI és TDO kivezetéseken keresztül a különböző integrált áramkörök léptetőregiszterei sorba köthetők. Ez például azt jelenti, hogy egy áramköri panelen, ha több integrált áramkört kell tesztvektorral feltölteni egy adott vizsgálathoz, akkor az egy hosszabb tesztvektor betöltésével egy lépésben elvégezhető.

Ezek alapján felvázolható egy több, peremfigyelést támogató integrált áramkört tartalmazó panelnek a szabványhoz illeszkedő sematikus elrendezése. A TMS, TCK és *TRST jeleket minden áramkör párhuzamosan kapja, az áramkörök pedig láncba vannak kötve. Ezt az 5. ábra mutatja.

A peremfigyeléses hurok nem csak ilyen egyszerű kialakítású lehet, a szabványban két javaslat található meg egy panelen vagy rendszeren belüli független peremfigyeléses hurkok kialakítására, de más megoldások is ismertek és használhatóak.

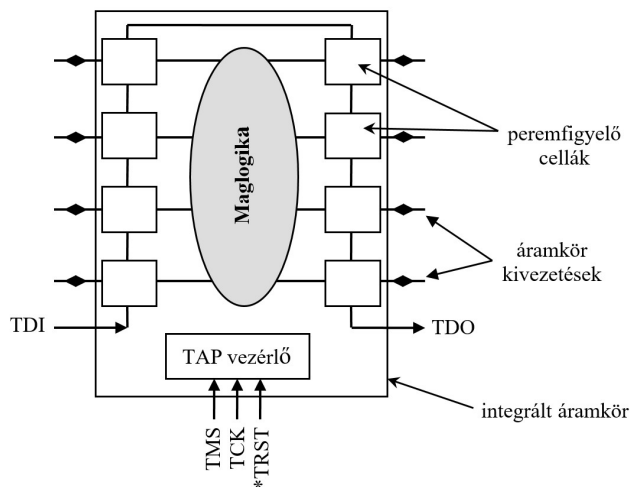
¹⁸ A szabvány „*” karakterrel jelöli azt, hogy a TRST jel 0 aktív.



5. ábra – Az IEEE 1149.1 szabvány szerinti peremfigyeléses hurok kialakítása¹⁹

Az IEEE 1149.1 szabvány szerint kialakított áramkörök maglogikája és a maglogika köré beépülő járulékos elektronikai egységek – a peremfigyelő cellák és a TAP vezérlő – kapcsolatát a 6. ábra mutatja.

A peremfigyelő cellák (Boundary Scan Cell, BSC) azok a „virtuális mérőtű” egységek, amelyekkel mintavételezhető a maglogika kimenetén vagy az integrált áramkör kivezetésén megjelenő logikai jelszint, és amellyel gerjeszthetők ugyanezek a pontok. A korábbiakban leírtak szerint ezek a gerjesztések beléptethetők peremfigyelő cellákból képzett léptetőregiszterbe, illetve a mintavételezett válaszjelek kiléptethetők ugyanezen pontokról.



6. ábra – Egy peremfigyelés lehetőségével rendelkező digitális áramkör vázlatos felépítése²⁰

A peremfigyelő cellák működését a TAP vezérlő befolyásolja. A felépítésük áramköri szinten meglehetősen egyszerű [23] p.56, két 2:1 multiplexerből és két tárolóból állnak. Funkcionálisan, a vezérlőjeleket nem számítva négy csatlakozási pontjuk van:

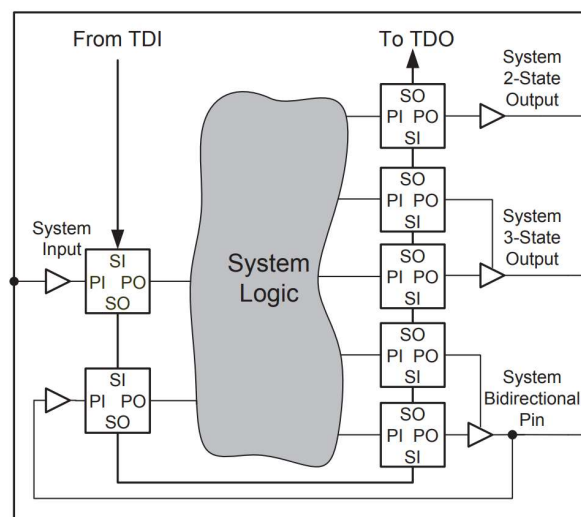
¹⁹ Forrás: szerkesztette a szerző [35]

²⁰ Szerkesztette a szerző [33] p. 53 alapján

1. SI (Serial Input) – soros bemenet: a felépített léptetőregiszter egy elemének bemeneti pontja, amely vagy a TDI kivezetésre csatlakozik (ha az adott peremfigyelő cella az első a sorban), vagy az előző peremfigyelő cella kimenetére (SO).
2. SO (Serial Output) – soros kimenet: a felépített léptetőregiszter egy elemének kimeneti pontja, amely vagy a TDO kivezetésre csatlakozik (ha az adott peremfigyelő cella az utolsó a sorban), vagy a következő peremfigyelő cella bemenetére (SI).
3. PI (Parallel Input) – párhuzamos bemenet: ezen a bemeneten keresztül olvasható be a maglogika kimeneti állapota vagy az integrált áramkör bemeneti csatlakozásának állapota
4. PO (Parallel Output) – párhuzamos kimenet: ezen a bemeneten keresztül adható rá a maglogika egy bemenetére gerjesztés vagy az integrált áramkör kimeneti csatlakozására adható gerjesztés

A peremfigyelő cellák ezen pontjainak azonosítását a 6. ábra kibővítése teszi érthetőbbé, amelyet az alábbi, a szabványból kivett ábra (7. ábra) mutat. A téglalap az integrált áramkör határfelületét szimbolizálja. (A „System Logic” és „System” szóval kezdődő névvel ellátott meghajtó egységek az integrált áramkör maglogikájának részei.)

A TAP vezérlő, és a hozzá kapcsolódó regiszterek szerepéről kell még említést tennem. A TAP vezérlő (TAP controller), az utasítás regiszter (Instruction Register, IR), valamint a tesztadat regiszterek (Test Data Register, TDR) csoportja kötelező elemei a tesztlogikának.



7. ábra – A peremfigyelő cellák kapcsolódása²¹

A TAP vezérlő lényegében egy hardveresen implementált állapotgép, amelynek a következő szerepei vannak:

²¹ Az ábra forrása: [23] p. 55. (A dolgozatban az átvett ábráknál az angol nyelvű megnevezéseket legtöbb esetben változtatlanul hagytam. Amennyiben az átvett ábrát szerkesztettem, az egyértelműen szerepel a lábjegyzetben.)

- fogadja a TCK-t és figyeli a TMS jel állapotát;
- előállítja az órajelet és/vagy vezérlőjeleket az utasítás- és tesztadat-regiszterek számára, valamint a tesztlogika egyéb részeinek;
- vezérli a működést (pl. alaphelyzetbe állítás, léptetés, mintavételezés, értékek kiadása);
- az utasításokat dekódolja, és biztosítja a következő művelet előkészítését azáltal, hogy meghatározza, hogy az majd melyik regiszterre (és a hozzá tartozó tesztlogikára) vonatkozik.

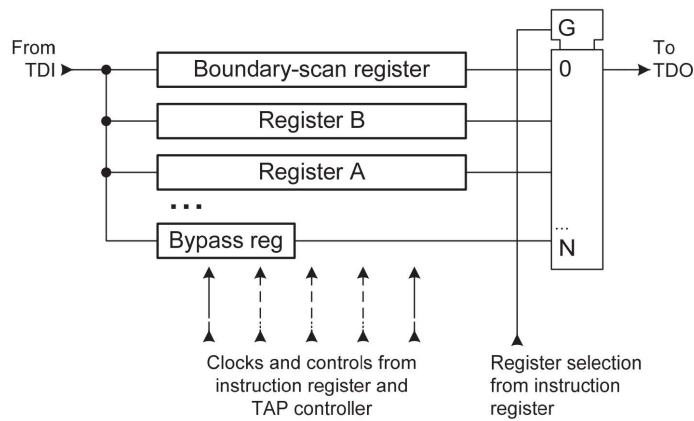
Az utasítás regiszter:

- lehetővé teszi, hogy az utasítás beléptethető legyen a tesztlogikába a TDI bemeneten keresztül. Az utasítás kiválasztja a következő tesztfeladatot, és/vagy meghatározza, hogy melyik tesztadat-regisztert kell elérni;
- soha nincs definiálatlan (nem meghatározott) állapotban, és mindig egyetlen, a TDI és TDO közé csatlakozó tesztadat-regisztert választ ki.

Tesztadat regiszterből sok implementálható, de kettő kötelező: az előzőekben ismertetett peremfigyelés cellákból (BSC) álló peremfigyelés regiszter, és az áthidaló (Bypass) regiszter. Ezek szerepe:

- a peremfigyelés regiszter a korábbiakban leírtak szerint a tesztadatok bevitelére és kiolvasására (beléptetésére és kiléptetésére) szolgál, valamint lehetővé teszi a mintavételezést, illetve a maglogika és a fizikai kivezetések elválasztását;
- az egybités áthidaló regiszter szerepe az, hogy képes lerövidíteni egy több integrált áramkört tartalmazó rendszerben a peremfigyeléses hurkot, azaz a peremfigyelés regiszterek „sorba kapcsolásából” kialakuló, esetenként meglehetősen hosszú léptetőregisztert.;
- opcionális tesztadat regiszterek a teljesség igénye nélkül szolgálhatnak például az integrált áramkör azonosítására (gyártó, típus, tokozás), inicializálásra, vagy implementálhatóak egyéb egyedi, tesztelést segítő célra is regiszterek.

Az alábbi, szabványból vett ábra példaként azt szemlélteti, hogy a kötelező peremfigyelés regiszter és az áthidaló regiszter mellett meglévő A és B tesztadat regiszterek hogyan kapcsolhatóak a TDI és a TDO kivezetések közé. Az ábra jobboldalán lévő szimbólum egy multiplexer, amelynek vezérlése (G) csak szimbolikusan van ábrázolva. Az ábrán látható, hogy az adatregiszterek kiválasztását az utasítás regiszter, a vezérlését pedig a TAP vezérlő végzi.



8. ábra – Példa két kötelező és két opcionális tesztadat regiszter implementálására²²

A következőben az utasításokat fogom áttekinteni egy korábbi publikációm alapul véve [24]. A szabvány meghatároz kötelezően megvalósítandó utasításokat, és lehetőséget ad opcionális utasítások definiálására is. Az utasítások többségének a kódja nem kötött, azt az integrált áramkör (a tesztlogika) tervezője határozhatja meg. (Az utasításokat a szabványban is alkalmazott módon, nagybetűkkel írom.)

A kötelező utasítások:

- **BYPASS:** a TDI és a TDO pontok összekapcsolódnak egy 1 bites regiszteren keresztül, ilyenkor a TDI jel 1 órajel késleltetéssel megjelenik a TDO lábon. A vizsgált áramkör eredeti funkcióját látja el. E parancs célját az áthidaló regiszter ismertetésénél leírtam.
- **SAMPLE:** hatására a TDI és a TDO pontok a peremfigyelő regiszterre csatlakoznak, de a vizsgált áramkör megőrzi eredeti funkcióját. A peremfigyelő cellával ellátott lábak állapota egy adott időpillanatban mintavételezhető.²³
- **PRELOAD:** hatására a TDI és a TDO pontok a peremfigyelő regiszterre csatlakoznak, de a vizsgált áramkör megőrzi eredeti funkcióját. Kiléptethető a SAMPLE utasítással mintavételezett érték, és előkészíthető egy tesztminta (tesztvektor). Ez a két tevékenység egyidőben, idővesztés nélkül elvégezhető, hiszen a kiléptetéssel egyidőben a léptetőregiszter sajátosságait figyelembe véve a tesztvektor beléptethető. (Ha nincs betöltendő tesztvektor, akkor tetszőleges érték léptethető be.)

²² Az ábra forrása: [23] p. 107

²³ Az IEEE 1149.1 szabvány eredeti változatában egyetlen utasításként definiált SAMPLE/PRELOAD később két külön utasítássá vált: SAMPLE és PRELOAD utasításokká. Eredetileg a két jelenlegi utasításnak megfelelő tevékenység két fázisban zajlott le az összevont utasítás hatására. A legutóbbi szabványverzióban sincs megtiltva az, hogy a két parancsnak azonos legyen a kódja, így a régi működés előidézhető.

- EXTEST: a TDI és TDO pontok a peremfigyelő regiszterre csatlakoznak. Az integrált áramkör kívülről nézve nem az eredeti funkciója szerint működik, hanem teszt üzemmódban van. Kimeneteire a peremfigyelő regiszterben (az adott kivezetéshez tartozó peremfigyelő cellában) lévő érték kerül, bemeneti lábainak állapota pedig tárolódik. Ezt az utasítást többek között az integrált áramkörök közötti kapcsolatok vizsgálatára (interconnect test), vagy a peremfigyeléssel nem rendelkező külső egységek tesztelésére (cluster test) lehet használni. Ennek az utasításnak a hatására bekövetkező állapotból csak reset hatására tud normál állapotba kerülni az integrált áramkör, szemben a többi utasítással, ahol ez a reset nem szükséges.²⁴

Az opcionális utasítások, „*” jelöléssel az ajánlottan megvalósítandó utasítások (Recommended):

- INTEST: a TDI és a TDO pontok a peremfigyelő regiszterre csatlakoznak. Az integrált áramkör kívülről nézve nem az eredeti funkciója szerint működik, hanem teszt üzemmódban van. Működését tekintve hasonló az EXTEST parancshoz, de nem a „külvilág”, illetve annak hatása, hanem a maglogika vizsgálható.
- RUNBIST: hatására a peremfigyeléses integrált áramkör beépített öntesztjének autonóm lefutása történik meg. A TDI és TDI pontok közé az önteszt eredményét tartalmazó regiszter kerül. A beépített önteszt előnye, hogy míg a peremfigyeléses tesztelés során nagyszámú tesztminta betöltése, a tesztmintákra adott válaszok begyűjtése, valamint kiértékelése szükséges a rendszer működőképességének megállapításához, addig ugyanezt az önteszt lefuttatásával gyorsabban, a peremfigyeléses vizsgálat szempontjából egyetlen utasítással el lehet végezni.
- CLAMP*: hatására a kimeneti lábak felveszik a hozzájuk tartozó peremfigyelő cella által tárolt értéket, a TDI és TDO pontok közé pedig az áthidaló regiszter csatlakozik. Tehát míg a kimenetek őrzik állapotukat, és egy másik áramkörnél például bemeneti gerjesztésre felhasználható, az integrált áramkör a peremfigyeléses hurokban átlátszó lesz (az 1 órajelnyi késleltetéstől eltekintve).
- IDCODE: a TDI és TDO pontok az opcionálisan megvalósítható eszközazonosító regiszterre csatlakoznak. Az utasítás kiolvasása onnan a gyártóra, az eszköz típusára, illetve verziószámára vonatkozó információkat.

²⁴ A szabvány első kiadásakor még nem definiálták a később ismertetésre kerülő HIGHZ utasítást, amellyel ez a probléma egyszerűbben megoldható.

- USERCODE: a TDI és TDO pontok az opcionálisan megvalósítható másodlagos eszközazonosító regiszterre csatlakoznak. Az utasítás kiolvasása onnan a felhasználó által definiált, az eszközre vonatkozó adatokat.
- ECIDCODE: a TDI és TDO pontok az opcionálisan megvalósítható elektronikus chip-azonosító (Electronic Chip IDentification, ECID) regiszterre csatlakoznak. Ez a regiszter lehetőséget ad az alkatrész sorozatszámának tárolására. Ennél az utasításnál az „opcionális” jelzőt úgy kell értelmezni, hogy ha van ECID regisztere az integrált áramkörnek, akkor kötelező az utasítás, de az ECID regiszter implementálása természetesen nem kötelező.
- HIGHZ*: az összes kimeneti lábat nagyimpedanciás állapotba helyezi, azokat is, amelyek eredeti funkciójuk szerint csak kétállapotúak. A TDI és TDO pontokat az áthidaló regiszterre kapcsolja. Egyszerű lehetőséget kínál a beültetett áramköri panel alkatrészeinek parametrikus tesztelésénél (in-circuit teszt) az adott peremfigyeléses eszköz kimeneti lábainak passzív (nagyimpedanciás) állapotba kapcsolására, így azok nem befolyásolják a mérési eredményeket, illetve a tesztelés közbeni meghibásodás esélyét ki lehet zárni.

Opcionális utasítások vannak még rögzítve, de ezeket területi okokból nem ismertetem. Céljuk nagyrészt és elsősorban a logikai szabványok körének jelentős kiszélesedése miatti integrált áramkörök közötti, illetve az egy integrált áramkörön belül használt többféle tápfeszültség és logikai szabvány okozta problémák megoldása.

A szabvány ezen felül megengedi az egyedi publikus és magáncélú parancsok definiálását. A publikus utasítások mindenki számára hozzáférhetőek (pl. diagnosztikai célú hozzáférés belső regiszterekhez, programozható eszköz törlése, programozása), a magáncélú utasítások viszont csak a tervező vagy a gyártó belső használatára készültek (pl. az áramkör magjának belső jeleihez való hozzáférés).

A szabvány mellékletei közül ki kell emelnem a BSDL (Boundary Scan Description Language, peremfigyelés leíró nyelv) definiálását (IEEE 1149.1 Annex B), amely a VHDL (IEEE 1076) szintaktikáját és elveit alkalmazva ad lehetőséget a peremfigyeléssel rendelkező integrált áramkörök teszteléssel kapcsolatos jellemzőinek leírására. Egy áramkör 1994 óta csak akkor felel meg a szabványnak, ha van érvényes BSDL dokumentációja. A BSDL elsősorban gépi felhasználásra készült, azaz a tesztrendszer szoftvere használja az alkatrész modelljeként a teszt összeállításához, de ember számára is olvasható szöveges formájú. A modell főbb elemei [25]:

- csatlakozások leírása (pl. ki- vagy bemenet, egybites vagy több bites);
- láb kiosztás leírása (csatlakozások melyik fizikai kivezetésen vannak);

- port csoportosítások (pl. differenciális jeleknél);
- TAP jellemzők (pl. maximális órajel értéke);
- az utasítások hossza és kódja (opcode);
- az alkatrész azonosítója (gyártó, típus, verziószám);
- az utasítások és az adott utasítás esetén a TDI és TDO közé kapcsolódó adatregiszter listája;
- a peremfigyelés regiszter leírása (pl. a regiszter celláinak típusa, funkcióval való párosítása).

1.2.1.2 IEEE 1149.4-2010 – A kevert jelű tesztbusz szabványa

Az alapszabvány (IEEE 1149.1) nem ad megfelelő lehetőséget analóg, vagy analóg és digitális (kevert jelű) áramkörök vizsgálatára. Bizonyos kompromisszumok árán és korlátozottan van ugyan lehetőség pl. az áramkör egy pontján feszültségmérésre, de ehhez egy integrált áramkörön belül megvalósított A/D átalakító vezérlő és adatregisztereit kell a peremfigyelő cellákon keresztül elérnünk [26].

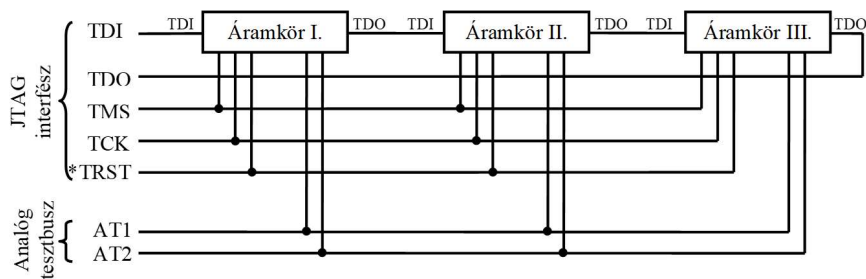
Ezt a problémát oldja fel a kevert jelű peremfigyelés szabványa [27], amely a digitális jelekkel elvégezhető egyszerű összeköttetés-tesztek (rövidzár/szakadás vizsgálata) mellett parametrikus mérési lehetőséget is ad. A szabvány nem írja elő a teszttáramkörök megvalósításának részleteit, bár a szemléltetés érdekében példákat ad lehetséges megvalósításokra. A szabvány továbbá megteremtí a BSDL (Boundary-Scan Description Language) olyan kiterjesztését, amely segítségével leírhatóvá válnak a peremfigyeléses integrált áramkörök analóg teszteléssel kapcsolatos jellemzői is. A szabvány céljai:

- az integrált áramkörök közötti összeköttetések vizsgálata analóg jelekkel
- parametrikus tesztelés – analóg (elsősorban passzív) alkatrészek jelenlétének és értékének vizsgálata az áramköri panelen belül, azaz egy analóg áramköri klaszterben
- magában a kevert jelű peremfigyeléssel rendelkező integrált áramkörben a belső analóg áramköri egységek tesztelése
- a fenti 3 pont alkalmazásával a hibalefedettség növelése, a tesztelés idejének csökkentése

Ezeknek a céloknak az eléréséhez ki kellett bővíteni a belső és a külső teszt-infrastruktúrát. Fontos megjegyezni, hogy jelgenerátor és mérőeszköz nem került sem a belső, sem a szűken értelmezett külső infrastruktúrába. (A gerjesztés és a mérés funkciókat kívülről csatlakoztatott tesztvezérlő valósítja meg.) Az integrált áramkörön belüli elemek a következőkkel bővültek az alapszabványhoz képest:

- az analóg tesztelés interfésze (Analog Test Access Port, ATAP), amely két kötelező és két választható hozzáférési pontot definiál. Ezekon a pontokon lehet (áram) gerjesztést adni vagy (feszültség) jelet érzékelni. A kötelező csatlakozások: AT1 (gerjesztés) és AT2 (érzékelés), az opcionálisak: AT1N és AT2N. (Utóbbiakat differenciális jelekkel való tesztelésnél kell használni.)
- tesztbusz-interfész áramkör (Test Bus Interface Circuit, TBIC), amely egy olyan egyszerű áramköri modul, amely lehetővé teszi a belső analóg tesztbusz vonalaira (AB1, AB2) való csatlakozást. Alapvetően az AT1 és AT2 pontok rá- vagy lekapcsolását végzi.
- analóg peremfigyelés cella (Analog Boundary Module, ABM), amely a magáramkör és egy analóg funkcióval rendelkező kivezetés közé kapcsolódó áramköri modul. Kissé bonyolultabb felépítésű, mint a DBM, a későbbiekben írok róla.

Az előző alfejezetben közölt 5. ábra és az itt leírtak alapján felvázolható az egy áramköri panelen belüli rendszer kialakítása, amely az alábbi ábrán látható.

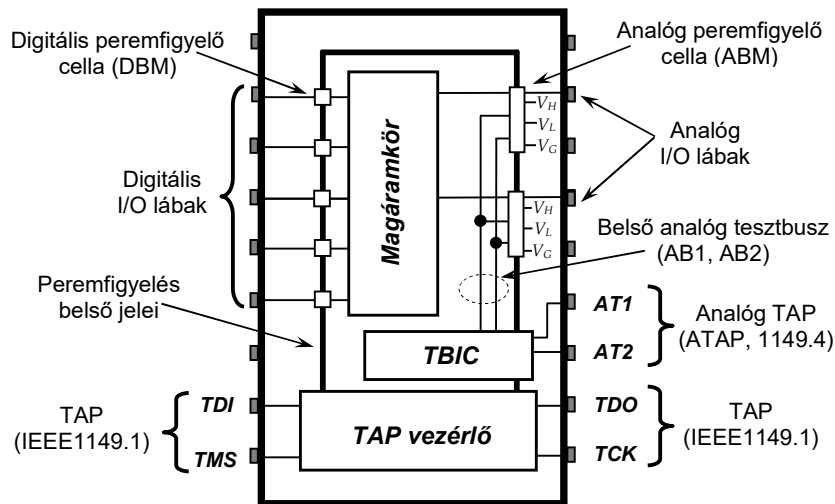


9. ábra – Az IEEE 1149.4 szabvány szerinti peremfigyeléses hurok kialakítása²⁵

A TAP (JTAG interfész) kialakításában is kompatibilis az alapszabványban definiálttal, a kiegészítést az analóg tesztbusz adja. Ennek két vonalára (AT1, AT2) az összes áramkör párhuzamosan csatlakozik. (AT1N és AT2N vonalakat nem ábrázoltam az egyszerűség kedvéért.) A hurokban nem kell minden áramkörnek IEEE 1149.4 kompatibilisnek lennie, vegyesen használhatóak IEEE 1149.1 és .4 szabvány szerinti integrált áramkörök.

Egy szinttel lejjebb lépve bemutatom, hogy egy kevert jelű integrált áramkört hogyan egészítenek ki a teszteléshez szükséges egységekkel. Az alábbi ábrán látható példa szerinti áramkör rendelkezik digitális és analóg funkciójú kivezetésekkel is.

²⁵ Szerkesztette a szerző [66]



10. ábra – Egy IEEE 1149.4 szabvánnyal kompatibilis alkatrész vázlatos felépítése²⁶

Mivel a digitális oldalt az előző alfejezetben már ismertettem, most csak a kiegészítő egységekre térek ki. Az ABM-ek konfigurálása a TAP-on keresztül lehetséges, ez magyarázza a DBM-ek láncolatába való befűzést. Az ABM-ek két belső analóg tesztvonalra (AB1, AB2) kapcsolódnak, amelyekre a TBIC kapcsolja rá vagy kapcsolja le róluk az ATAP AT1 és AT2 vonalait. A TBIC konfigurálása szintén az alapvető digitális peremfigyeléses láncon keresztül történik.

A TBIC felépítését az 11. ábra mutatja. (A továbbiakban a szabványban is alkalmazott kapcsoló jelölést alkalmazom, amely egy téglalap, amelynek a két átlója is be van rajzolva.) A TBIC két jól elkülöníthető feladatú egységből áll, amelyek az alábbi ábrán pontozott vonallal körbe vannak keretezve. A baloldali egység feladata, hogy az egységek közötti csatlakozások vizsgálatához a V_H vagy a V_L feszültségeket – mint H és L logikai szinteket – az S1...S4 kapcsolókkal az AT1 és/vagy AT2 vonalakra kapcsolja. Az itt lévő két analóg komparátor az ATAP AT1 és AT2 jeleinek 1 bites digitalizált értékét adja, amely a TBIC egy regiszterében tárolódik el. A komparálási szint V_{TH} . V_{TH} egy belsőleg előállított küszöbfeszültség, amely a szabvány szerint az alábbi határok között tetszőleges lehet (1. egyenlet).

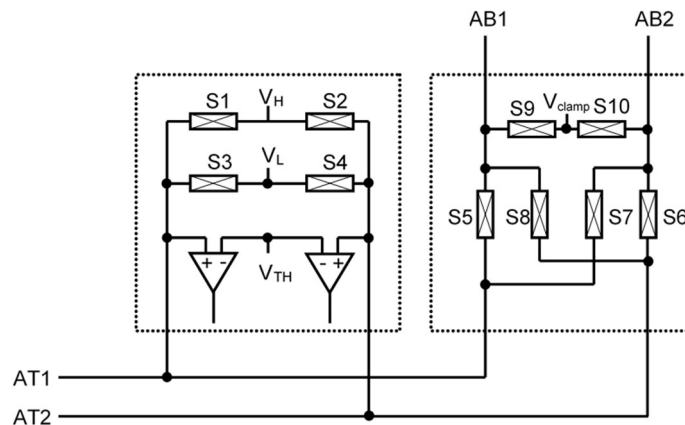
$$\left(\frac{V_H + V_L}{2}\right) - \left(\frac{V_H - V_L}{4}\right) \leq V_{TH} \leq \left(\frac{V_H + V_L}{2}\right) + \left(\frac{V_H - V_L}{4}\right)$$

1. egyenlet – V_{TH} korlátai a szabvány szerint

A jobboldali részben található S5 és S6 kapcsolókkal az AB1 az AT1 és/vagy az AB2 az AT2 vonalra kapcsolható. S7 és S8 segítségével lehetőség van AT1 és AT2 összekötésére, méghozzá úgy, hogy az S5 illetve S6 is az áramkörben vannak, így meghatározható a teljes jelút frekvencia- és

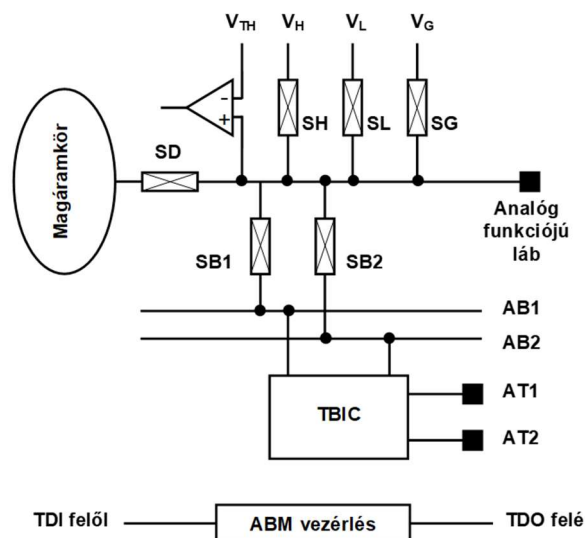
²⁶ Szerkesztette a szerző [66]

amplitúdómenetre gyakorolt hatása [28]. S9 és S10 egy belsőleg előállított feszültségre (V_{CLAMP}) köti a nem használt belső analóg tesztbusz-vonalat/vonalakat zavarvédelmi okokból [27].



11. ábra – A TBIC felépítése²⁷

Az analóg peremfigyelő cellák funkcionális felépítésüket tekintve tartalmaznak 6 darab kapcsolót és egy analóg komparátort. A cellák a magáramkör és az analóg ki- vagy bemeneti láb között helyezkednek el, valamint rákapcsolódnak az eszközön belül előállított, illetve rendelkezésre álló V_H , V_L , V_G és V_{TH} feszültségekre. Egy analóg kivezetés és a magáramkör közé csatlakozó ABM felépítését és belső kapcsolatait a belső analóg tesztbusz és a TBIC felé a 12. ábra mutatja.



12. ábra – Egy analóg lábra csatlakozó ABM felépítése²⁸

A magáramkör a hozzá tartozó lábtól az SD kapcsoló segítségével elszigetelhető, ilyenkor nem az eredeti funkció szerint működik az adott láb, hanem az SH, SL és SG kapcsolók segítségével a V_H ,

²⁷ Szerkesztette a szerző [66]

²⁸ Szerkesztette a szerző [66]

V_L és V_G feszültségek valamelyike kapcsolható rá. Mivel azonban a V_H , V_L és V_G feszültségek diszkrét értékűek, ezért önmagában az ilyen módú gerjesztés lehetőségeiben csak minimális többletet jelentene az IEEE 1149.1 szabvány szerinti digitális gerjesztéshez képest. A legfontosabb többlet-lehetőség, hogy az SB2 kapcsolón keresztül az analóg láb feszültsége az AB2 belső analóg tesztbusz-vonalra, és a később ismertetendő TBIC-en keresztül az ATAP AT2 vonalára kerülhet, ahol külső eszközzel (például nagyfelbontású digitális multiméterrel) megmérhető. A gerjesztés nem csak a belső feszültségekről, illetve az analóg lábra csatlakozó külső forrásból lehetséges. Az ABM-ben megvalósítható egy 1 bites digitalizálás is: az integrált komparátorral vizsgálható, hogy az adott analóg pont feszültsége nagyobb vagy kisebb, mint a V_{TH} feszültség.

Az IEEE 1149.4 szabvány ad szabályokat és ajánlásokat a járulékos áramkörök (azaz a belső teszteléshez szükséges áramkörök) analóg paramétereire. A szabványban rögzített cél a paraméterek meghatározásához $10\ \Omega$ és $100\ k\Omega$ közötti komplex impedanciák megmérése 1% pontossággal 100 Hz és 10 kHz között meghatározott 1 kHz-es sávzélességben. A főbb szabályok:

- a belső analóg tesztvonalak és bármely analóg funkciójú kivezetés közös jelútjának soros impedanciája legfeljebb $1\ \Omega$ lehet (pl. a bondolásoknál);
- az analóg funkciójú kivezetések esetében, ha ESD védelem van rajtuk, akkor a védelem miatt integrált soros ellenállások miatt 4-vezetékes mérési módszert kell alkalmazni;
- a gerjesztést adó, azaz az AT1 jelútban a kapcsoló maximális ellenállása $10\ k\Omega$ vagy $\frac{V_{DD} - V_{SS} - 200mV}{200\ \mu A}$ lehet (amelyik kisebb);
- a visszamért feszültségértéket adó, azaz az AT2 jelútban a kapcsoló maximális ellenállása $10\ k\Omega$ lehet;
- az AT1 és AB1 vonalaknak minimum $100\ \mu A$ csúcsértékű gerjesztőáramot kell elviselniük és átvinniük 1 kHz-en;
- az AT2 és AB2 vonalaknak minimum $100\ mV$ csúcsértékű válaszjel továbbítására kell alkalmasnak lenniük 1 kHz-en;
- 1 kHz-es frekvenciájú $100\ \mu A$ -es gerjesztésnél $1\ k\Omega$ -os terhelést alapul véve, a visszamért feszültség hibája 1% alatti kell, hogy legyen, 1 s alatt pedig nem változhat $1\ mV$ -nál nagyobb mértékben;
- a mérés során nem használt kivezetések elszigetelési ellenállása minimum értékének a kivezetés típustól függően $2 \dots 20\ M\Omega$ felett kell lennie;
- ajánlott, hogy az AT1-AB1 és az AT2-AB2 jelutak átvitele 10 Hz és 10 kHz között ne legyen egyenetlenebb 0,5%-nál.

A fentiek azért szükségesek, mert analóg áramkörrel lévén szó, a rendszert felépítő elemek hibája jelentős mértékben befolyásolhatná a mért mennyiségeket, megnövelve a mérési hibákat. A szabvány elterjedt alkalmazását véleményem szerint a fenti szigorú szabályok, és a digitális peremfigyeléshez képest jelentős mennyiségű belső, teszteléshez szükséges kiegészítő áramkör-igény akadályozza. A szabvány adta lehetőségeket a munkám egy későbbi részében mutatom be. A fenti szabályok ismerete és betartása a további munkám során fontos a szabvánnyal való kompatibilitás miatt.

1.2.1.3 Az IEEE 1149-es szabványsorozat további szabványai

Jelenleg (2023.07.) a két részletesebben ismertetett szabványon kívül a szabványsorozat következő elemei léteznek még:

- IEEE 1149.5
- IEEE 1149.6
- IEEE 1149.7
- IEEE 1149.8
- IEEE 1149.10

Az *IEEE 1149.5-1995* szabvány a szabványsorozat már kivont eleme, egy soros adatátvitelű, hátlapi (backplane) tesztelési és karbantartási célú buszt (MTM-Bus) definiált. A szabványt tanulmányoztam, mert az alapelvek egy része hasznosítható volt további munkám során.

Az *IEEE 1149.6-2015* – A fejlett digitális hálózatok peremfigyelése [29]

A digitális áramköröknek az IEEE 1149.1 szabvány szerinti peremfigyeléses vizsgálata azt feltételezi, hogy az egymáshoz kapcsolódó áramkörök között sokvezetékű (bit-párhuzamos), állandó időzítésű, galvanikus jellegű információátadás zajlik. A modern számítógépi interfészek és a VLSI áramkörök közötti nagysebességű kapcsolatok azonban újabb igényekkel lépnek fel [30]:

- csökkenteni kell az összeköttetések darabszámát a kivezetés-szám további növekedésének megakadályozása érdekében. Ezt a célt a soros jeltovábbítással lehet elérni. A soros jellegű kommunikáció ára az adó-oldalon a párhuzamos-soros átalakítás, vevő oldalon a soros-párhuzamos visszaalakítás (SERDES, azaz serializer/deserializer egységek) költségeiben és az információtovábbítás sebességének csökkenésében jelentkezik;
- az integrált áramkörök között a biztonságos (EMC-védett) információátvitel érdekében szimmetrikus (differenciális) logikai jelek használatára van szükség, mint ahogy például azt az LVDS szabvány megköveteli;

- az integrált áramkörök megnövekedett tápáram-felvétele miatt a földvezetékben jelentős DC zavarfeszültség keletkezik, és a jelszintek alacsony (1 V körüli) feszültségszintekre való csökkentése a galvanikus csatoláson való információátvitelt lehetetlenné teszi. Az áramkörök/egységek közötti galvanikus csatolás helyett kapacitív (AC) csatolás kialakítására van szükség.

A digitális áramkörök/egységek közötti adatforgalomnak a fenti alapvető változásai új igényeket támasztottak a peremfigyeléses vizsgálattal szemben is. A „statikus” jellegű, vagyis egy T_{CK} órajelen belül változatlan digitális jelek vizsgálata helyett/mellett szükség van a feltöltődő-kisülő csatolókkondenzátorok révén keletkező impulzusok észlelésére. A „fejlett digitális hálózatok” peremfigyeléses tesztelésének megfogalmazza azt az alapvetet, hogy az áramköri csatlakozópontok jelei feloszthatók DC és AC jelekre, és ezek lehetnek egyaránt aszimmetrikus (single-ended) és szimmetrikus (differenciális) jellegűek. Az AC-csatolású jelek vizsgálata érdekében a szabvány két új utasítást definiál: EXTEST_PULSE és EXTEST_TRAIN. Ezeknek lényegében az a hatása, hogy a kimenetre csatlakozó áramkörök tesztelése céljára kiküldendő (alapvetően statikusnak tekinthető) logikai jel kétszer (ill. többször) egymás utáni invertálásával AC-impulzusokat hoznak létre.

Az AC-csatolású és a differenciális jelekkel való adatforgalom (összefoglaló néven: Advanced I/O) peremfigyeléses tesztelésének formai leírására a BSDL nyelvet természetesen ki kellett bővíteni új attribútumokkal és szabályokkal, de szigorúan követve a „DC-jelek” peremfigyelésére kidolgozott BSDL nyelv szintaktikáját. Megjegyzem, hogy ez a szabvány némi átmenetet jelent a digitális és az analóg peremfigyelés között, mert a kapacitív csatolás miatt a jel analóg tulajdonságai is fontossá válnak a tesztelés szempontjából.

Az *IEEE 1149.7-2022* – Csökkentett kivezetésszámú, növelt funkcionalitású TAP és peremfigyelés-architektúra [31]

Ez a szabvány Compact JTAG, vagy cJTAG néven is ismert. Célja, hogy további tesztelési és hibakeresési (debug) funkciókat biztosítson bizonyos konfigurációk mellett kevesebb csatlakozási ponttal és nagyobb sebességgel, de természetesen megtartva a kompatibilitást az alapszabvánnyal. A TAP.7-nek elnevezett továbbfejlesztett TAP funkcionális szempontból a panelszintű tesztelés mellett újabb lehetőségeket is biztosít: a komplexebb belső szerkezetű integrált áramkörök (pl. SoC-ek) részletesebb belső vizsgálatát, a teljesítményfelvétel menedzselését, az alkalmazások hibakesését (debug) és a buszra csatlakozó áramkörök programozását. Ezeket a funkciókat hat, egymásra épülő osztályban (class) valósítja meg (T0...T5).

Az *IEEE 1149.10-2017* – Nagysebességű TAP és chipen belüli elosztást támogató architektúra [32]

Ennek a szabványnak a megalkotását szintén a SoC-ek nagymértékű terjedése és a felkonfiguráláshoz vagy programozáshoz egyre hosszabb időt igénylő nagybonyolultságú programozható eszközök (pl. FPGA-k) fejlődése indokolta. Lehetővé teszi a rendszerben lévő integrált áramkörök megfigyelését, konfigurálását és tesztelését.

Egy nagysebességű TAP-ot specifikál, és leír egy olyan elosztást segítő architektúrát, amely lehetővé teszi a tesztadatoknak a chipen lévő egységek felé való oda-vissza konvertálását. A nagy adatátviteli sebességet egy differenciális jelátvitelt használó TAP (HSTAP) oldja meg, amelyről a beérkező adatcsomagokat egy kódoló/dekódoló továbbítja a párhuzamos, akár egyidejűleg aktív peremfigyelés csatornák felé. Ezt az architektúrát csomag kódoló/dekódoló és elosztó architektúrának hívják (Packet encoder/decoder and distribution architecture, PEDDA). A HSTAP-ek láncba köthetőek.

Nem az IEEE 1149-es szabványsorozat eleme, és közvetlenül nem kapcsolódik a témához, de meg kell említenem az *IEEE 1532-2002* szabványt. A 1149.1-en alapul, és a rendszerben való programozást szabványosítja (In-System Programming, ISP). A szabvány célja az ISP-eszközök (pl. memóriák, PLD-k, mikrovezérlők) gyártás közbeni kezelésének egyszerűsítése. Az IEEE 1532 szabvány lehetővé teszi egy áramkörben több eszköz egyidejű programozását, minimalizálva a szükséges időt.

1.2.2 A peremfigyeléses vizsgálat szintjei, a felmerülő problémák és megoldásuk

Napjainkban rohamos fejlődés figyelhető meg az áramkörtechnikában. Egyrészt az alkatrészek bonyolultsága (integráltsága) mutat meredek emelkedést, másrészt az egy rendszerbe épített alkatrészek száma. Mindez a miniatürizálás igényével együtt a fizikai méretek csökkenését is jelenti. Ma már nem ritka a 0,1 mm nagyságrendjébe eső alkatrészláb-távolság, illetve a több száz kivezetéssel rendelkező integrált áramkör. Az egy áramköri panelen belüli nagyszámú alkatrész, és a nagy alkatrész-sűrűségű nyomtatott áramkörök nem teszik lehetővé az áramkörvizsgálat hagyományos módszerét. Az áramköri elemek közötti kapcsolatok, vagy az áramköri funkciók meghibásodását megfelelő biztonsággal csak különleges technikával – például peremfigyeléssel – lehet vizsgálni. [9]

Peremfigyeléssel bonyolult rendszer is kevés csatlakozással (digitális áramkör 4/5, analóg áramkör 6/7 pont) vizsgálható. Mivel a vizsgálat igen mélyreható is lehet, ezért az áramkör hibái nagy valószínűséggel és jól behatárolhatóan felderíthetők. Megjegyzendő, hogy a peremfigyeléses hurkon keresztül nem csak a tesztelés végezhető el, hanem a rendszerben lévő programozható áramkörök (memóriák, programozható logikák) tartalma is átírható. [33] p. 321. Ez egyebek között lehetőséget

teremt nagy távolságban, közvetlen emberi beavatkozás nélkül üzemelő rendszerek átprogramozására, amilyenek például a pilóta nélküli repülő eszközök. A peremfigyelési képességgel nem rendelkező egységek részleges vizsgálata a rendszerben lévő, vagy az áramkört kiegészítő, peremfigyeléssel ellátott áramkörök segítségével lehetséges. [33] p. 4-6. A tesztelés megvalósításának szempontjából fontos, hogy a peremfigyeléses vizsgálatához szükséges adatok jelentős részét automatikusan létre lehet hozni (pl. a peremfigyeléses hurok leírását, vagy adott bemeneti gerjesztésre a helyes működés esetén megjelenő kimeneti választ). [34] p. 83.

Az alkatrész szinten meglévő peremfigyeléses tesztelési lehetőség több alkatrész peremfigyelő interfészen keresztüli hurokba fűzésével egy modul (áramköri lemez) egészére kiterjeszhető. A magasabb szinten való alkalmazás hasonló módon lehetséges: a modulok külső peremfigyelő interfészeit alkalmazva kialakítható egy, a teljes rendszer vizsgálatára alkalmas hurok. Tehát az alkalmazás szintjei:

- alkatrész szint;
- modul szint;
- rendszer/készülék szint.

A technológia modul, illetve rendszer szintjén való alkalmazása számos problémát vet fel, amelyeknek a megoldása némi többlet-áramkörrel és a tesztelés szoftverének bonyolultabbá válásával jár. A tesztelés-vezérlő a gyártás, a rendszer felprogramozása, illetve általában a szerviz esetén is külső eszköz, üzem közbeni tesztelésnél és átprogramozásnál viszont belső eszköz (beágyazott processzor).

Az előző alfejezetben röviden áttekintettem, hogy alkatrész szinten, illetve egy egyszerű, néhány áramkört tartalmazó panel szintjén hogyan építhető ki a peremfigyelés. A következőkben az összetettebb panel szintre, illetve rendszer szintre való kiterjesztés szempontjaival, problémáival és megoldási lehetőségeivel foglalkozok, amit korábbi publikációm [35] felhasználásával teszek meg. Minél nagyobb és bonyolultabb a vizsgált rendszer, annál nagyobb jelentősége van a következő pontoknak.

1. A tesztelésbe bevonni kívánt áramkörök minél nagyobb hányada rendelkezzen peremfigyeléssel. A nem IEEE 1149.1 szabvány szerinti alkatrészek is tesztelhetőek bizonyos áramkör-kialakítás mellett, de a tesztelésük nehézkes és nem érhető el a megfelelő hibalefedettség (klaszter tesztelés, cluster testing) [36]. A ma gyártott LSI és VLSI integrált áramkörök nagy része rendelkezik peremfigyeléssel, az SSI és MSI áramkörök esetében sokkal kisebb ez az arány, mert a nagyobb chipméret és a megnövelt kivezetésszámú

tokozás többletköltséggel jár. Ez a többletköltség azonban a tesztelés egyszerűsödésében, a tesztelési folyamat felgyorsulásában és a hibabehatárolás jelentős pontosságnövekedésében bőségesen megtérül.

2. Azok az alkatrészek, amelyekben megvalósítottak peremfigyelést, de a peremfigyelés tesztbusza nem dedikáltan, hanem más funkcióval megosztva használja az alkatrész kivezetéseit. kerülendők. Az ilyen áramkör alkalmazása a peremfigyeléses hurokban számos problémát vet fel²⁹.
3. Az áramkörben programozható eszközök, feleljenek meg az IEEE 1532 szabványnak, mert akkor egyszerre, egyidőben fel- vagy átkonfigurálhatóak, szemben a nem IEEE 1532-kompatibilis eszközökkel, amelyek felkonfigurálása csak egymás után történhet.
4. Lehetőleg olyan elemeket kell választani a rendszer kialakításánál, amelyek a peremfigyelés szabványában szereplő nem kötelező, de ajánlott HIGHZ és IDCODE parancsokat is ismerik. (A HIGHZ parancs segítségével egyszerűen lehet passzíválni egy alkatrészt: az összes láb nagyimpedanciás állapotba helyezésével (majd az áthidaló regiszter bekapcsolásával) az adott alkatrész nem befolyásolja a tesztelés további tevékenységeit. Az IDCODE parancs a tesztbuszra fűzött áramkörök 32 bites eszközazonosítójának kiolvasásával lehetővé teszi, hogy azonosítsuk a buszra fűzött áramköröket, és megállapítsuk, hogy jelen vannak-e, a típusuk megfelelő, illetve a megfelelő helyre kerültek-e beültetésre.)
5. A tesztbuszról való leszakadás esetén a leszakadt áramkör ne tegye működésképtelenné a panelt. A peremfigyeléses eszközök TAP vezérlője lényegében egy állapotgép, amelynek átmeneteit a TCK órajel felfutó élénél a TMS jel szintje határozza meg. Ennek az állapotgépnek a szerkezete úgy van definiálva, hogy a TMS jel állandó magas szintje esetén néhány órajelen belül alapállapotba (Test-Logic-Reset) kerül. Ebben az állapotban az eszköz normál módban működik, teszt üzemmódja letiltott állapotú. Ahhoz, hogy az alapállapotba kerülés ebben az esetben minél előbb, és biztosan megtörténjen, alkatrész szinten és panel szinten is gondoskodni kell arról, hogy leszakadt TMS vonal esetén a TMS jel magas szintje biztosított legyen. (Pl. felhúzó ellenállással.) Ezen felül a TDI bemenetre is ajánlatos egy felhúzó ellenállást betervezni, ezzel a TDI láb leszakadása esetén biztosítható, hogy az áramkör néhány órajel után áthidaló (BYPASS) üzemmódba kerüljön (ugyanis a BYPASS parancs kódja csupa 1-ből áll) [37].

²⁹ Egy ilyen probléma az, hogy a megosztott lábak bekapcsolás után a normál működés szerinti alapfunkciójukat veszik fel, a másodlagos funkcióként meglévő peremfigyeléses tesztbusz-vonalakat külön engedélyezni kell.

6. Villamos szempontból a tesztport-csatlakozásnál a fentiekén kívül a következőket indokolt még megvalósítani [37]:

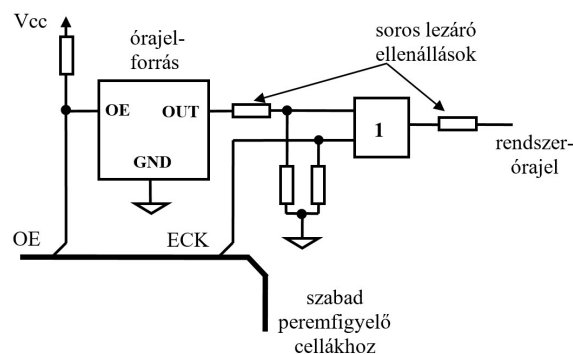
- 10 MHz-nél nagyobb frekvenciájú tesztórajel esetén a panel tesztportjánál a TCK vonalat illetően le kell zárni. Egyszerűsége, és viszonylag kis energiaigénye miatt egy soros R-C lezárást érdemes alkalmazni;
- a TDO kimeneten, a soros tesztbusz utolsó alkatrészéhez közel, a jelvisszaverődések csökkentésére egy soros ellenállást ajánlott elhelyezni;
- ha a TRST* vezérlővonal ki van építve, erre is (akárcsak a TDI és TMS vonalakra) érdemes elhelyezni egy felhúzó ellenállást, a határozott jelszint biztosítására;
- a külső tesztbusz-csatlakozásnál a megfelelő zavarvédelem és az áthallás csökkentése érdekében a jelvezetékek között egy földvezeték ajánlott vezetni.

7. Bár a peremfigyelés technológiáját alkalmazva elvileg egyetlen soros tesztthurokkal elvégezhető a tesztelés, esetenként több tesztthurok kialakítása kívánatos. A peremfigyeléses alkatrészek bizonyos megfontolások szerinti felosztását, és peremfigyeléses hurokba való szervezését particionálásnak nevezzük. A particionálás a következő esetekben ajánlatos, illetve szükséges:

- A különféle logikai áramkör családba tartozó, vagy azonos családba tartozó, de más tápfeszültségről működő alkatrészek számára külön-külön peremfigyeléses hurkot kell kialakítani. (Cél az inkompatibilitás vagy zajtartalék csökkenésének elkerülése.)
- Az optimális tesztelési sebesség eléréséhez ajánlatos több peremfigyeléses hurkot létrehozni. Cél a hibabehatárolás idejének csökkentése.
- A programozható eszközök közül lehetőség szerint olyanokat kell alkalmazni, amelyek a felprogramozása vagy felkonfigurálása az IEEE 1532 szerint történhet.
- A több áramköri panelt tartalmazó rendszerekben alkalmazni kell a particionálást, amely lehetővé teszi, illetve egyszerűsíti a panelek közötti csatlakozásvizsgálatot, az egyes panelek külön-külön való tesztelhetőségét, és a közösen használt rendszerbuszhoz való egyedi hozzáférést. A particionálás megvalósítására számos – lényegében multiplexer funkciót ellátó – integrált áramkör létezik. (A Texas Instruments kínálatát ismertetem és értékelem majd az értekezésem későbbi részében.)

8. A panelen belül a jelvezetés miatt fellépő jeltorzulások, késleltetések és egyéb jelenségek csökkentése érdekében betartandó még néhány szempont:
- Mivel a TCK és TMS jelek vezetői igen hosszúak is lehetnek, kialakításuk a peremfigyeléses rendszer működése szempontjából kritikus. (Ezt a két jelet a panelen lévő összes áramkör párhuzamosan megkapja, szemben a TDO-TDI összeköttetésekkel, amelyek csak a hurokban szomszédos alkatrészek között helyezkednek el). A huzalozásnál a két vonal hosszát azonos értéken kell tartani, és azonos módon kell vezetni, különben elcsúszás léphet fel. A jelvisszaverődések megakadályozása érdekében nem alkalmazható a huzalozásnál a derékszögű vezetéktörés. (Az említett példákon kívül még számos nyomtatott áramkör tervezési szempontot figyelembe kell venni.)
 - Ha a panelen belül a peremfigyelés buszána TMS és TCK jeleit sok alkatrészhez kell elvinni, akkor a panelen alkalmazott áramkörcsaládból származó buffer-áramkört kell alkalmazni.
9. A peremfigyeléses hurok kialakításánál gondolni kell a hurok fizikai lerövidítésének lehetőségére is. Előfordulhat, hogy egy áramköri panel kieső, (meghibásodó) alkatrésze miatt nem alkalmazható a peremfigyeléses technika. Ilyenkor fizikai áthidalást kell alkalmazni, és az áramkör további egységei tesztelhetőek maradnak.
10. Az áramköri panelen a peremfigyeléssel nem rendelkező egységek tesztelhetőségének biztosítására, azok környezetét nagy gondossággal kell kialakítani. A számos szempont közül, csak néhányat megemlítve:
- Ha a nem peremfigyeléses áramkörök csoportjának (cluster) határpontjai peremfigyeléses alkatrészekre csatlakoznak, a tesztelésbe bevonhatóak. Ha egy ilyen csoportnak vannak olyan pontjai, amelyek nem csatlakoznak peremfigyeléses áramkörökhöz (pl. csatlakozóra mennek), akkor ezen pontok gerjesztését, illetve érzékelését a tesztelhetőség érdekében meg kell oldani.
 - Külön figyelmet kell fordítani a nem peremfigyeléses eszközök engedélyező bemeneteire, azokat közvetlenül tápfeszültségre vagy földre nem szabad kötni, mert ez a tesztelhetőséget gátolja. Az ilyen bemeneteket egy ellenálláson keresztül kell a kívánt jelszintre kötni, és a vezérlés lehetőségét egy peremfigyeléses eszköz nem használt lábára való csatlakoztatással kell biztosítani.

- A panel órajelének, vagy órajeleinek peremfigyeléssel való vezérelhetőségét is meg kell oldani. Ehhez is szükség van szabad peremfigyeléses lábak felhasználására, ahogyan azt a 13. ábra mutatja. Normál üzemmódban az órajel-forrás kimenetén megjelenik az órajel, amely a VAGY kapun keresztül kapcsolódik a rendszerhez (a vagy kapu másik bemenete 0 logikai szinten kell, hogy legyen). Teszt üzemmódban az órajel-forrás kimenete letiltott, nagyimpedanciás állapotban van, a VAGY kapu ide csatlakozó bemenetét a lehúzó ellenállás földre köti. Ebben az esetben egy peremfigyeléses láb adhatja a rendszer órajelét (ECK), a VAGY kapu másik bemenetén keresztül.



13. ábra – Peremfigyeléssel való vezérlési lehetőséggel rendelkező órajel-forrás kialakítása³⁰

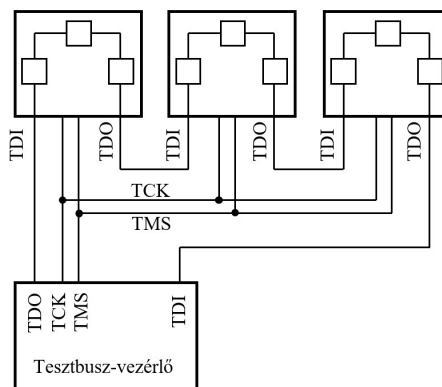
1.2.3 A peremfigyelés rendszerszintű kiterjesztésének architektúrái

Egy olyan rendszer esetén, amely több áramköri panelt tartalmaz, a peremfigyeléses tesztbusz megvalósítása többféle architektúra szerint lehetséges [36]:

- Gyűrű (Ring);
- Csillag (Star);
- Multidrop.

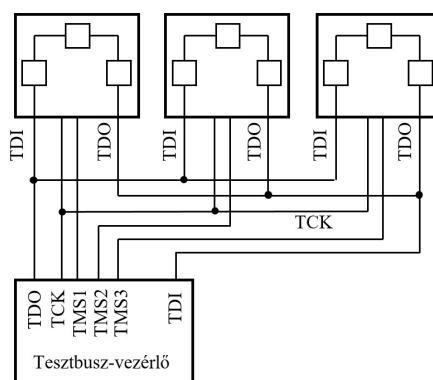
A gyűrű szerkezet (14. ábra) teljes mértékben átveszi a peremfigyeléses tesztbusz alapfelépítését. A rendszerben lévő áramköri panelek sorba kapcsolódnak a TDO és TDI lábaikon keresztül. A TMS és TCK jeleket párhuzamosan kapják a tesztbusz-vezérlőtől, a hátlapi buszrendszeren (Backplane) keresztül eljutnak minden kártyához. A szomszédos kártyák TDO és TDI pontjai is a hátlapi buszrendszeren csatlakoznak egymáshoz, de ez soros jelút csak akkor teljes, ha minden kártya a helyén van, és legalább bizonyos fokig (a teszteléshez szükséges mértékben) működőképes. Ezért ez az elrendezés meghibásodásokra igen érzékeny, ritkán használt architektúra.

³⁰ Szerkesztette a szerző



14. ábra – Gyűrű szerkezetű rendszer szintű peremfigyeléses hurok³¹

A csillag szerkezet (15. ábra) esetén a hátlapi buszrendszeren keresztül minden áramköri panel megkapja a tesztbusz-vezérlő TCK és a TDO jeleit. A panelek TDO jelei is közösítve vannak, és csatlakoznak a tesztbusz-vezérlő TDI pontjára. A TMS jelekből annyit állít elő a vezérlő, ahány kártya van a rendszerben (TMS1, TMS2...TMSn). Ezek a jelek az egyes kártyákra közvetlenül kapcsolódnak. Hátránya az ilyen felépítésű rendszernek, hogy nagyszámú áramköri panel esetén sok TMS jel előállítására van szükség, ami bonyolulttá teszi a tesztbusz-vezérlőt, valamint a huzalozás megvalósítását. Hátránya még, hogy egyszerre csak egy panel vonható be a tesztelésbe.

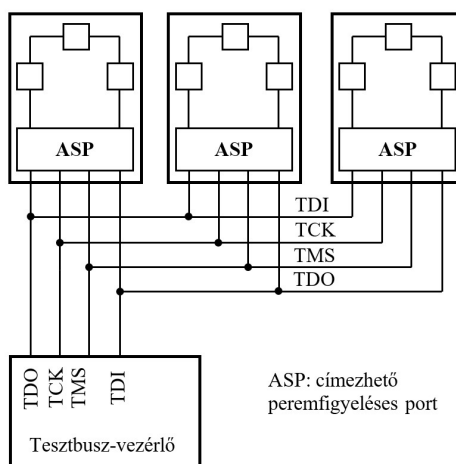


15. ábra – Csillag szerkezetű rendszer szintű peremfigyeléses hurok³²

A fenti problémákra a Multidrop architektúra (16. ábra) ad megoldást.

³¹ Szerkesztette a szerző [36] p. 7-18. alapján

³² Szerkesztette a szerző [36] p. 7-19. alapján



16. ábra – Multidrop szerkezetű rendszer szintű peremfigyeléses hurok kialakítása³³

Ebben az esetben a tesztbusz-vezérlő egy-egy TMS, TCK, TDI és TDO csatlakozással rendelkezik. Az összes panel párhuzamosan kapcsolódik ezekre a vonalakra. Minden panelnek van egy azonosítója (címe), amely lehet beprogramozott (szoftveres vagy hardveres úton), vagy függhet a kártya pozíciójától (Slot ID). A kártyák mindegyikén egy címezhető tesztport³⁴ van elhelyezve, amely tulajdonképpen nem más, mint egy kapcsolósor, amely akkor záródik, ha a tesztbusz-vezérlő arra a tesztportnak parancsot ad. Ha arra szükség van, egyszerre több tesztport – és így több kártya – is csatlakozhat a tesztbusz-vezérlőhöz. Véleményem szerint ez a kialakítás az, amely optimálisan és rugalmasan alkalmazható, amit szinte kizárólagos elterjedése is igazol.

A tesztelés vezérlésének lehetőségeiről kell még néhány szót ejtenem. A tesztelés megvalósítható külső és belső (beágyazott) tesztvezérlővel. A külső tesztvezérlő alkalmazása esetén a hátlapi buszrendszeren keresztül teremthet kapcsolatot a tesztvezérlő az egyes kártyákkal, amelyek azonosítása címük alapján lehetséges. A kártyákon belül, ha felépítésük particionált, akkor a különálló hurkok elérése megfelelő eszközökkel biztosított. A külső tesztvezérlő alkalmazásának előnye, hogy a korábban panel-szintre kidolgozott tesztelés változtatás nélkül használható. Hátránya, hogy a hátlapi buszrendszerhez való csatlakozás miatt a tesztelés csak akkor végezhető el, ha a tesztelendő rendszer és a tesztvezérlő fizikailag egy helyen van. A külső tesztvezérlő általában egy megfelelő buszillesztővel ellátott asztali vagy hordozható számítógép.

A beágyazott tesztvezérlő alkalmazása esetén a lefuttatandó tesztvektorok egy belső memóriában vannak letárolva, és a teszt eredmények is ide kerülnek. A tesztvezérlő lehet az egyébként is jelen lévő mikroprocesszor. Ennek a megoldásnak számos előnye van. Ha a teszt adatokat tartalmazó

³³ Szerkesztette a szerző [36] p. 7-20. alapján

³⁴ Gyártótól függően ezek az eszközök más-más néven található meg, azonos, illetve nagyon hasonló funkcióval. Ilyenek például a Texas Instruments ASP (Addressable Scan Port) eszközei.

memória távelérése megoldott (pl. az Interneten keresztül), akkor egy rendszer állapotáról nagy távólágból is lehet információt szerezni, és az esetleges hibákat nagy pontossággal be lehet határolni. Ebben az esetben a hibadetektáláshoz, illetve hibabehatároláshoz szükséges intelligencia a távoli eszközben van megvalósítva. Ha ez a képesség a helyi beágyazott tesztvezérlőben is megtalálható, akkor az így kialakított rendszer képes lehet öntesztre, állapotáról helyben (és távoli helyen is) adhat friss információt [38]. Ez az önteszt lefuthat automatikusan (pl. bekapcsoláskor vagy időnként, időzítve), vagy kérésre.

Amint látható, a beágyazott tesztvezérlős megoldásnál is szükség van külső számítógépre, de a szerepe más, mint a külső tesztvezérlős elrendezésnél. Tulajdonképpen ez egy szerver-kliens kapcsolat, ahol az alacsony szintű és a magasabb szintű tevékenységek elkülönült helyen futnak le. Az, hogy a határ hol van, tehát, hogy mi minősül alacsony, illetve magas szintű tevékenységnek, a beágyazott vezérlő intelligenciájától függ, elképzelhető olyan viszony is, hogy a külső vezérlő szerepe elhanyagolható, esetleg alkalmazása szükségtelen.

1.2.4 A peremfigyeléses vizsgálat eszközei

Kutatást végeztem annak érdekében, hogy megismerjem és rendszerezem a digitális és kevert jelű peremfigyeléses teszteléshez rendelkezésre álló elektronikai alkatrészeket. A célom az, hogy felfedjem azokat a területeket és/vagy problémákat, amelyekre jelenleg nincs „kész”, azaz kidolgozott megoldás. Az alfejezet további részében szerepel néhány olyan eszköz, amely kereskedelmi forgalomban nem kapható (csak a gyártótól rendelhető, vagy rendelésre gyártják, esetleg kifutófélben lévő (de még gyártott) típus). Ezeket a státuszokat az eszközöknél külön jelzem. Csak olyan típusok kerültek a listába, amelyek funkciója vagy működési elve véleményem szerint használható a kritikus beágyazott rendszerek üzem közbeni tesztelésében. A kritikus beágyazott rendszerek esetében gyakran szükséges a kiterjesztett hőmérséklet tartományban való működés, a felsorolt típusok legtöbbje létezik ilyen változatban, amelyek nem, azoknál ezt szintén egyértelműen jelzem. Kiemelném, hogy a következőkben nem olyan eszközök szerepelnek, amelyek peremfigyeléssel tesztelhetőek (ezek száma óriási), hanem olyanok, amelyek a tesztrendszer kialakítását segítik, támogatják. Ez az alfejezet korábbi publikációim alapján készült [35] [39], pontonként rövid összefoglalást és értékelést tartalmaz. További információk a hivatkozott publikációkban találhatóak.

1.2.4.1 A digitális peremfigyeléshez használható eszközök

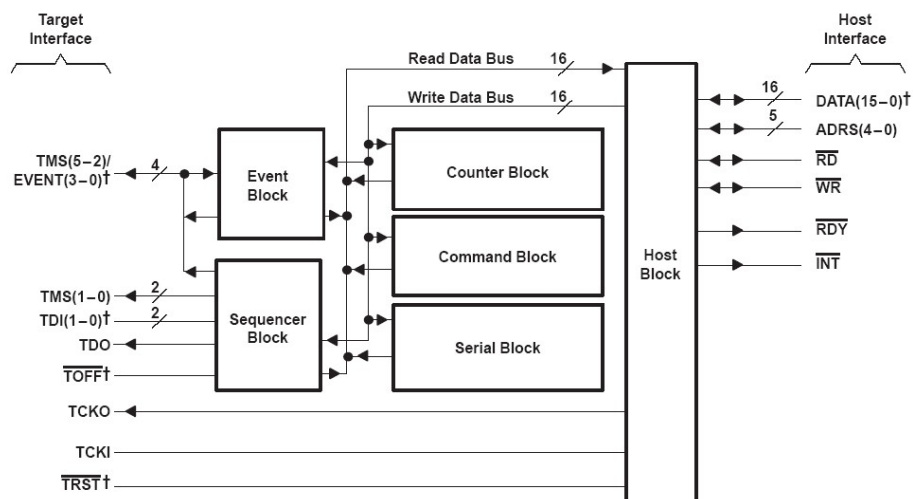
1. *Peremfigyeléssel rendelkező integrált áramkörök külön típus megkötés nélkül*

Korábban említést tettem arról, hogy egy peremfigyelést támogató rendszerben találhatóak olyan építőelemek, amelyek nem kompatibilisek a peremfigyelés technikájával. Ok lehet az,

hogy az adott alkatrészben nem gazdaságos megvalósítani a tesztelhetőséghez szükséges minimális infrastruktúrát sem, vagy egyszerűen egy diszkrét félvezetőről vagy akár nem félvezető alkatrészről van szó. Az ilyen alkatrészekből álló áramköri egységek klaszterként tesztelhetőek, azaz más peremfigyeléssel rendelkező alkatrészek felől adható rájuk gerjesztés, és más peremfigyeléssel rendelkező alkatrészek olvashatják ki a klaszter válaszát. Ehhez a vizsgálathoz tehát a peremfigyeléses tesztelésbe bevont integrált áramkörök adják a támogatást. Itt konkrét típust vagy típusokat nem említek, mert ahogy az előzőekben is írtam, a számuk hatalmas, és lényegében mindegyikük alkalmas klaszterek tesztelésére.

2. 54ACT8990 – Tesztbusz vezérlő

Ez a típus egy mikroprocesszorral vezérelhető IEEE 1149.1-kompatibilis tesztbusz-vezérlő. Segítségével egy áramköri panelen belül megvalósítható a particionálás, mivel az eszközzel akár 6 peremfigyeléses hurok vezérlése is megoldható. Az áramkör interfésze 5 V-os TTL jelszintekkel dolgozik, ami a mai rendszerekkel való használatot korlátozza. A mikroprocesszoros vezérlés lehetősége a beépített öntesztre alkalmassá teszi, az alkalmazásával elérhető particionálás pedig optimális hurokméretet kialakításának és külön tesztelhető részegységek megvalósításának lehetőségét biztosítja. [40] Blokkvázlatát az alábbi ábra mutatja.



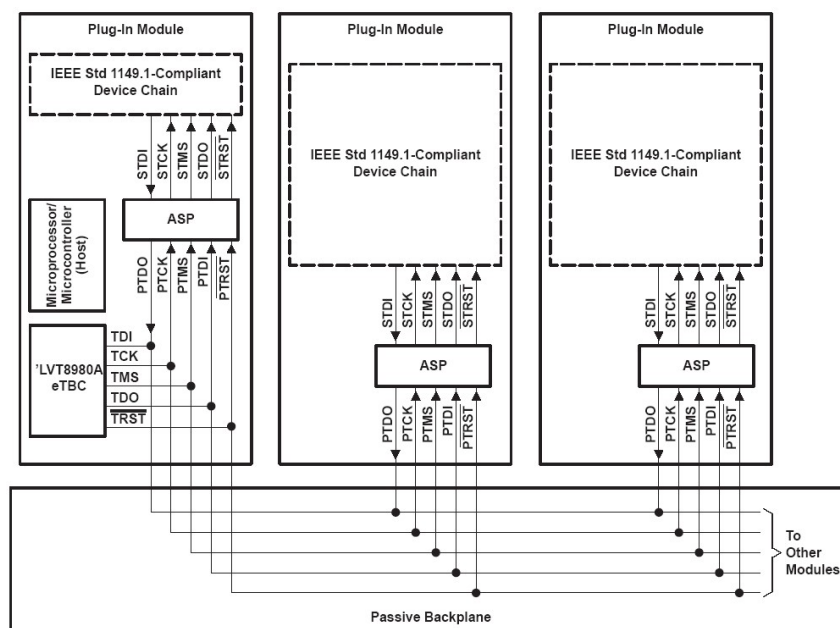
17. ábra – Az 54ACT8990 tesztbusz vezérlő felépítése³⁵

3. 54LV8980A – Beágyazott tesztbusz-vezérlő

Ennek az áramkörnek a használatával egy intelligens eszköz hozzáférhet az IEEE 1149.1 szabványú tesztbuszhoz mikrovezérlős rendszerekben, a 3 bites cím- és a 8 bites

³⁵ Az ábra forrása: [40] p. 4.

adatbuszának köszönhetően. Tápfeszültsége 3,3 V, de úgy tervezték, hogy bemenetei elviselik az 5 V-ot is, ezzel kiterjesztve a lehetséges alkalmazások körét. Alkalmazási vázlatot az alábbi ábra mutat. A példában az egyik rendszermodul tartalmazza a tesztbusz-vezérlőt, és az azt működtető mikroprocesszort. Az összes rendszermodulban egy-egy címezhető peremfigyeléses port (ASP, lásd korábban, multidrop rendszer) található, amelyeken keresztül a hozzájuk csatlakozó peremfigyeléses hurkok vizsgálata elvégezhető. [41] A kritikus beágyazott rendszerek beépített öntesztjében való alkalmazása akkor kerülhet fókuszba, ha moduláris a vizsgált rendszer, és vagy centralizált (egy tesztvezérlő keretként) vagy elosztott (minden kártyán külön tesztvezérlő) tesztelési struktúrát kell megvalósítani.



18. ábra – Az 54LVT8980a beágyazott tesztbusz-vezérlő alkalmazása³⁶

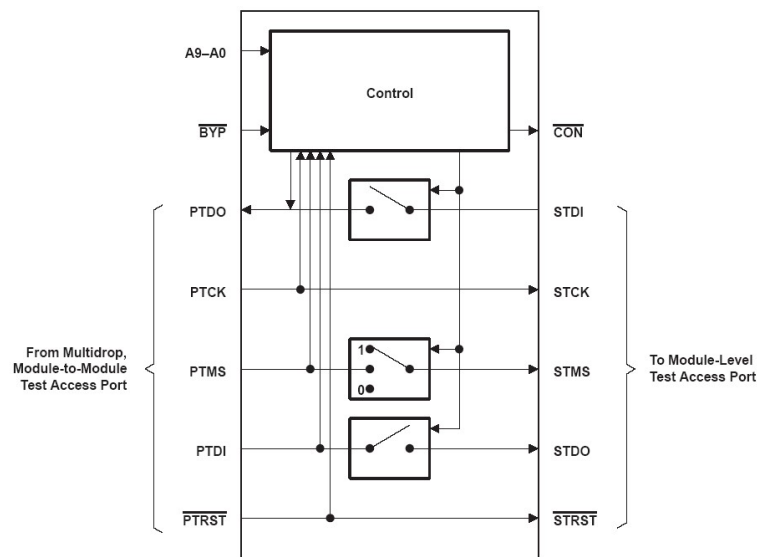
4. 54ACT8997 – Peremfigyeléses hurok be/átkapcsoló áramkör

Ennek az áramkörnek a segítségével a másodlagos hurkok közül egy, vagy több az elsődleges hurokba kapcsolható. Egy ilyen eszközzel 4 másodlagos hurok kezelhető, de több áramkör alkalmazásával a hurkok száma növelhető. Az áramkör azonosítója (ID), amely hardveresen (4 láb kivánt logikai szintre kötésével) beállítható, egy paranccsal lekérdezhető, így az eszköz egyértelműen azonosítható. Az áramkör ki- és bemenetei TTL kompatibilisek (5 V), ami a mai rendszerekkel való használatot korlátozza. Az integrált áramkör számos képességet hordoz, ezek közül kiemelném a particionálást. A nem használt (kikapcsolt) hurkok 1 bites késleltetést hoznak be a tesztelésbe. [42]

³⁶ Az ábra forrása: [41] p. 7.

5. *54LV8996 – Címezhető peremfigyeléses port*

A korábban már említett címezhető peremfigyeléses port (Addressable Scan Port, ASP) funkcióval, azaz ennek az áramkörnek az alkalmazásával a peremfigyeléses hurok kiterjeszhető panelszintről rendszerszintre. A multidrop rendszerekben alkalmazható áramkör, ahol a közös peremfigyeléses buszra (elsődleges tesztbusz) programozhatóan egy, esetleg több panel kapcsolódik rá (amelyekben a másodlagos tesztbuszok vannak kialakítva). Az alkalmazási terület miatt fontos, hogy ESD³⁷-védelemmel rendelkezik. Bár tápfeszültsége 3,3 V, de úgy tervezték, hogy bemenetei elviselik az 5 V-ot is, ami széleskörű lehetőséget biztosít a mai rendszerekben. [43] Az áramkör blokkvázlatát az alábbi mutatja.



19. ábra – A 74LV8996 címezhető peremfigyeléses port blokkvázlata³⁸

6. *54LV8986 – Bővíthető, címezhető peremfigyeléses port*

Ez az áramkör nagymértékben hasonlít az előzőekben tárgyalt típushoz, mind funkciójában, mind alkalmazásában, mind pedig elektromos tulajdonságaiban. A különbség annyi, hogy ez az eszköz kaszkadosítható, így legfeljebb 24 másodlagos tesztbuszig bővíthető. Az előző típussal együtt használható összetettebb multidrop rendszerekben. [44]

7. *SCANSTA111 – Multidrop módban is használható, címezhető peremfigyeléses multiplexer áramkör (kiterjesztett hőmérséklet tartományra nem gyártják)*

Az áramkör a peremfigyeléses vizsgálat panel szintről rendszer szintre való kiterjesztésére használható, multidrop rendszerekben is. Több áramkör kaszkádba köthető. 3 helyi portja van, amellyel az áramköri panelen belüli vizsgálatok végezhetőek el, majd ugyanez az eszköz

³⁷ ESD: Electro-Static Discharge

³⁸ Az ábra forrása: [43] p. 7.

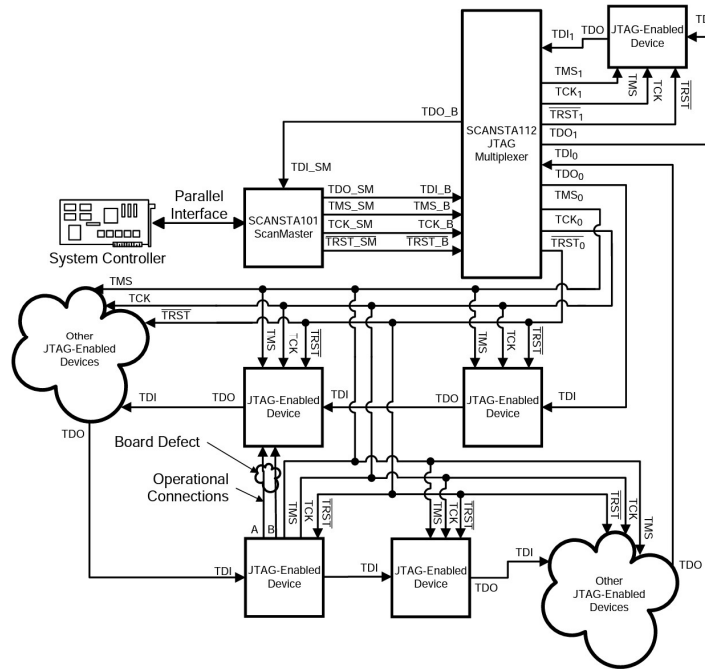
használható a teljes rendszerben is. Ekkor a központi tesztport felől egyedi címen lehet elérni az egyes egységeket, és támogatja a minden egységhez vagy egyes egység-csoportokhoz adatok és utasítások továbbítását (broadcast illetve multicast group). Ez az integrált áramkör újabb fejlesztésű, így a 3,3 V-os rendszerekhez illeszkedik. Támogat számos korszerű funkciót, de ezek nagy része nem kapcsolódik az önteszthez, a gyártás közbeni és végtesztben van szerepe (pl. FLASH programozás, vagy programhiba-keresés (debug) támogatása). Ami kiemelendő, hogy minden helyi tesztporthoz ad egy vezérlőjelet a rendszerben esetlegesen meglévő, kevert jelű peremfigyelést támogató integrált áramkörök számára, ha a helyi tesztportok valamelyike aktív. [45]

8. *SCANSTA112 – Multidrop módban is használható, 7 portos peremfigyeléses multiplexer áramkör (kiterjesztett hőmérséklet tartományra nem gyártják)*

Hasonló a SCANSTA111-hez, csak nagyobb a helyi peremfigyeléses portjainak száma. Ami többlet az előző típushoz képest, hogy támogatja a tesztvezérlő-váltást, és a multiplexálás nem csak hardveresen, hanem parancsokkal is elvégezhető. [46]

9. *SCANSTA101 – Peremfigyeléses rendszerszintű hozzáférés-vezérlő (kiterjesztett hőmérséklet tartományra nem gyártják)*

Az áramkör általános mikroprocesszor-interfészsel rendelkezik. Található benne egy kettős hozzáférésű memória, amely lehetőséget ad tesztvektorok előre betöltésére, így a tesztelés sebessége növelhető amellet, hogy tesztelés közben tehermentesíül a processzor. Definiálhatók teszt makrók, azaz tesztvektor szekvenciák. Bár tápfeszültsége 3,3 V, de úgy tervezték, hogy bemenetei elviselik az 5 V-ot is, ami széleskörű lehetőséget biztosít a mai rendszerekben. [47] A SCANSTA111 és SCANSTA112 áramkörökkel kombinálva kiváló megoldást ad összetettebb rendszerek tesztelésére is. Erre mutat példát az alábbi ábra, amelyben egy SCANSTA101 és egy SCANSTA112 oldja meg a rendszervezérlő felügyeletével egy particionált rendszerben (az egyszerűség kedvéért csak) két hurok vizsgálatát. [48] Célszerűen a SCANSTA112 többi portját lehetne használni a hosszabb hurok részekre bontásához. A „felhők” tartalmáról nem szól a forrás, de ezekben a részekben további particionálás csökkenthetné a tesztelési időt.



20. ábra – Példa a SCANSTA101 és SCANSTA112 áramkörök alkalmazására³⁹

1.2.4.2 A kevert jelű peremfigyeléshez használható eszközök

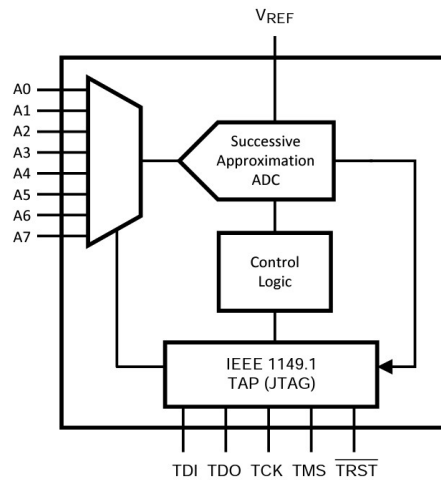
A kevert jelű peremfigyelés a korábbiakban vázolt problémák miatt kevésbé elterjedt, az analóg mérésekre, vizsgálatokra inkább az áttételes, és nem az IEEE 1149.4-ben szabványosított megoldást használják. (Ez az áttételes módszer a peremfigyeléses hurkon keresztül vezérelt A/D és D/A átalakítókat, valamint analóg multiplexereket használ.) A következőkben a fellelt, meglehetősen kisszámú megoldásokat sorolom fel, és értékelem.

1. SCANSTA476 – 8 bemenetű, IEEE 1149.1 szerint működő feszültségmonitor (kiterjesztett hőmérséklet tartományra nem gyártják, csak a gyártónál elérhető)

Amint az integrált áramkör megnevezéséből is látszik, az alkatrész nem kompatibilis a kevert jelű peremfigyelés szabványával, mégis ebbe a csoportba sorolom. Az egyetlen fellelt áramkör, amely peremfigyeléses hurokba kötve képes az áramkör különböző pontjain feszültséget mérni. A beépített A/D átalakító felbontása 12 bit, az A/D átalakító bemenetére egy 8 bemenetű multiplexer csatlakozik. Tápfeszültsége és referenciafeszültsége széles tartományban választható (2,7...5,5 V), a referenciafeszültség eltérhet a tápfeszültségtől. A mintavételezési sebesség akár 1 MSPS is lehet. A gyártó elsősorban általános feszültségmonitorozási célra javasolja az integrált áramkört, de a listában megjelenik az üzem közbeni

³⁹ Az ábra forrása: [48] p. 8.

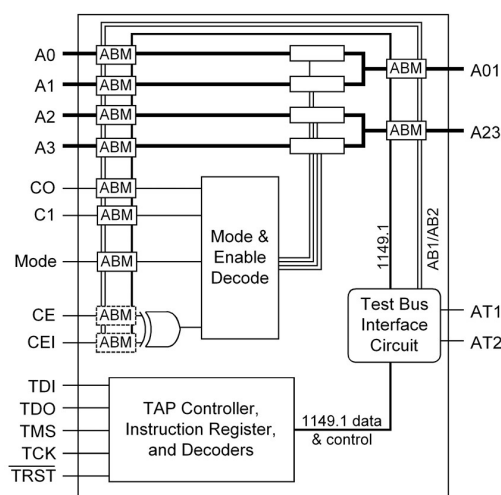
működőképesség-vizsgálat és meghibásodási prognózis is. [49] Az áramkör blokkvázlata az alábbi ábrán látható.



21. ábra – A SCANSTA476 belső felépítése⁴⁰

2. SCANSTA400 – Kétszeres 2:1 analóg multiplexer (kifutott típus, jelenleg még a gyártónál elérhető és rendelhető)

Ez az egyetlen valaha gyártott típus, amely széles körben elérhető volt. Teljesen kompatibilis a kevert jelű peremfigyeléssel. Minden kivezetés és a magáramkör megfelelő pontja között egy-egy analóg peremfigyelő cella található (összesen 11 darab), amelyekkel a szabvány ismertetésénél leírt funkciók elérhetőek. A gyártó a következő feladatokra javasolja az integrált áramkört: feszültség monitorozás, impedancia mérés (R, C, L elemek) kivezetések között, és egy kivezetés és a föld között. [50] Az áramkör belső felépítését a következő ábra szemlélteti.



22. ábra – Az STA400 belső felépítése⁴¹

⁴⁰ Az ábra forrása: [49] p. 1.

⁴¹ Az ábra forrása: [50] p. 3.

1.3 A peremfigyeléses vizsgálat üzem közbeni beépített öntesztben való alkalmazhatósága

Már doktori munkám legelején (és azóta időről-időre) irodalomkutatást végeztem, hogy milyen vizsgálatokhoz használják a peremfigyelést. Két területet lehet elkülöníteni:

1. A peremfigyeléses vizsgálat jelenleg az iparban, az elektronikai gyártásban a legelterjedtebb, ahol külső teszthezérő ideiglenes csatlakoztatásával gyártásközi és végteszteket végeznek a segítségével. Főleg digitális áramkörök teszteléséhez használt technológia, az összeköttetések, a magáramkör, és a digitális klaszterek vizsgálatára ad kiforrott technológiát. Ezen kívül még elvégezhető a segítségével az áramkörben való programozás/konfigurálás, illetve korlátozottan használják analóg gerjesztőfeszültség előállítására és feszültségmérésre, de csak áttételesen, A/D és D/A átalakítók közbeiktatásával. Ez a felhasználási terület távol áll kutatási témámtól.
2. Széles körben elterjedt a beépített öntesztekben való használata, de a felkutatott területek ugyancsak nem vágnak közvetlenül a kutatási témámba. Ennek az az oka, hogy ezekben az alkalmazásokban nem üzem közbeni öntesztet végeznek a segítségével. Az önteszt általában a rendszer indulásakor (bekapcsoláskor) fut le. A rendszer számos elemére kiterjedhet, az évek során sokféle általános és speciális megoldást (eszközt, struktúrát, metódust) publikáltak. Ezekkel a megoldásokkal általában meglehetősen jó hibafelderítési arány érhető el, de az első szintű eredmény sok esetben csak egy OK/FAIL jelzés. Az off-line módon végzett tesztelés során kapott eredmények estén fennáll annak a veszélye, hogy a hiba a teszteléskor nincs meg, üzem közben viszont megvan, vagy fordítva. Ezeknél a teszteknel a vizsgált rendszert valamilyen mértékben kiemeljük eredeti környezetéből, és így az üzemi körülmények is megváltoznak. Minél nagyobb mértékű ez a változás, annál jelentősebb az esélye a téves diagnosztizálásnak.

Ami az alkalmazási területek palettájáról hiányzik, az a normális üzem közbeni tesztelésben való alkalmazás, lényegében ez a hiány indította el a kutatásaimat. Ha az öntesztet a normális üzem közben lehet elvégezni, akkor a fenti problémák nem, vagy csak méréskelten jelentkeznek. Ebben az esetben a tesztelő rendszernek az alábbi követelményeknek ($K-n$) kell megfelelnie, amelyeket véleményem szerint a megjelölt módon lehet teljesíteni ($T-n$) [30]:

K-1. A normális üzem közben elvégzett peremfigyeléses vizsgálat nem akadályozhatja a készülék vagy rendszer alapfunkcióit.

T-1-a. A vizsgálatot csak látszólag végezzük üzemidőben. Az üzem közben végzett tesztek futtatása a készülék vagy rendszer belső egységeinek ciklikus működését kihasználva, azok aktivitásai közötti szünetekben lehetséges. Az inaktivitást jelezni kell a tesztvezérlő felé, ami lehetővé teszi a vizsgálat, vagy annak egy része elvégzését.

T-1-b. Ha a rendszer redundáns felépítésű, akkor több topológia esetén a tartalékolt elemen vagy elemeken el lehet végezni a normális üzemidőben a vizsgálatot a normális működés zavarása nélkül.

K-2. Az üzem közbeni tesztelés peremfigyeléses technikával való elvégzéséhez a készüléknek vagy rendszernek tartalmaznia kell intelligenciát (pl. processzort). Ez az intelligens elem lesz a tesztvezérlő.

T-2-a. A mai elektronikai készülékek szinte mindegyike tartalmaz egy vagy több intelligens elemet. Ha ezek számítási kapacitása lehetővé teszi a tesztvezérlő szerepének betöltését, akkor nem szükséges újabb tesztvezérlő beépítése.

T-2-b. Ha a beépített intelligens eszközök számítási kapacitása kicsi, vagy a tesztelési funkciót a megbízhatóság növelése érdekében külön akarjuk választani a normál funkcióktól, akkor újabb intelligens eszköz beépítése szükséges, ez azonban minimális többletköltséggel megoldható.

K-3. Elő kell állítani (ki kell számítani) és helyben kell tárolni a teszteléshez szükséges tesztvektorok és gerjesztések készletét, valamint a helyes válaszok listáját. Ezeket helyben kell összehasonlítani, és kiértékelni, valamint hibajelzést kell adni.

T-3. A tesztvektorok és a válaszok kiszámítása a peremfigyelés esetén is történhet automatikus generálással, ezt a fejlesztőrendszerek támogatják. Az analóg gerjesztésekre adott válaszok szintén kiszámíthatóak. Ezek összehasonlítását és kiértékelését a tesztvezérlő képes helyben összehasonlítani és kiértékelni. Helyben adhat hibajelzést (a többi egység vagy a felhasználó számára), a részletes hibalista, vagy további elemzésekhez a válaszok listája továbbítható távolabbi számítógépre, ahol könnyebb a továbblépés (hibadiagnosztika, hibahely megállapítása).

K-4. Minél több egységet kell bevonni a tesztelésbe. A digitális egységek közül a peremfigyeléssel rendelkezőket és a nem rendelkezőket (digitális klaszterek), az analóg peremfigyeléssel rendelkező egységeket és az analóg klasztereket (aktív és passzív, lineáris és nemlineáris, frekvenciafüggetlen és frekvenciafüggő hálózatok). Érdemes bevonni a megfigyelésbe az üzemi és környezeti jellemzőket (tápfeszültségek, környezeti hőmérséklet és páratartalom, légnyomás,

rezgések, hirtelen gyorsulások (ütések), stb.) Ezek ismerete segíthet a hiba okának felderítésében és az ok későbbi kiküszöbölésében, és ezek ismerete esetleg előre vetítheti későbbi meghibásodások valószínűségének növekedését.

T-4. A digitális áramkörök és klaszterek bevonása nem okoz problémát. Az analóg áramkörök és klaszterek bevonása részlegesen megoldott, ezen egységek bevonására további erőfeszítéseket kell tenni, illetve e területen kutatásokat kell végezni, módszereket kell kidolgozni. (A kutatások egy részét értekezésemben elvégzem, és javaslok módszereket, megoldásokat.) A környezeti és üzemi körülmények megfigyelése, naplózása megoldható, erre a későbbiekben visszatérek.

K-5. Az üzem közbeni peremfigyeléses tesztelés során biztosítani kell a visszahatás-mentességet. Ez azt jelenti, hogy a teszteléshez szükséges járulékos funkcionális egységek és kiegészítő áramkörök érzékelés (mérés) közben nem változtathatják meg az érzékelt jelet, amikor pedig az önteszthez szükséges gerjesztéseket adják rá a megfelelő pontokra, akkor ezek a jelek nem befolyásolhatják a tesztelt egység elsődleges⁴² kimeneti jeleit.

T-5-a. (Hardver oldal.) Ezek a követelmények nagyrészt megvalósíthatóak a peremfigyeléses tesztelés alkalmazásakor. A digitális vizsgálatoknál részben a technológia tulajdonságai miatt, részben ismert kapcsolástechnikai megoldásokkal teljes mértékben megvalósítható a visszahatás-mentesség. Ugyancsak (a fenti okok miatt és eszközök használatával) megelőzhető a gerjesztések elsődleges kimenetre való hatása. Analóg oldalról részben a szabványban rögzített megoldások miatt, részben pedig amiatt, mert az analóg jelek sérülékenyebbek mint a digitálisak, áramkörtervezési oldalról az ismert technikák körültekintő alkalmazása javasolt a visszahatás-mentesség (vagy a nem jelentős visszahatás) eléréséhez. Áramkörtervezési technikák megfelelő alkalmazásával megelőzhető a gerjesztések elsődleges kimenetre való hatása. A hardver oldal problémáival kapcsolatban végeztem kutatásokat, és az eredményeimet az értekezésem későbbi részében ismertetem.

T-5-b. (Firmware oldal.) A tesztvezérlő és a vizsgált rendszer vezérlőinek (illetve jelen esetben programjainak) összehangolt működése szükséges, valamint a tesztvezérlő programjának hardver vezérlési feladatait úgy kell összehangolni és ütemezni, hogy a követelmény (elsősorban a gerjesztések elsődleges kimenetre való hatása szempontjából) teljesülhessen. Ezzel a ponttal kapcsolatban részleges kutatásokat ugyan végeztem, de nagyobb mélységben és több nézőpontból kell még vizsgálnom a problémát ahhoz, hogy komolyabb eredményeket érjek el. Az

⁴² Azok a jelek, amelyek a tesztelt készülék vagy rendszer kívülről, a felhasználói oldalról is elérhető analóg és digitális kimeneti jelei. Nem ebbe a kategóriába tartoznak a belső, másodlagos kimenetek (tehát a belső áramköri kimeneti pontok), amelyek belső, másodlagos bemenetekre csatlakoznak.

értekezésében csak egy-egy mondat, vagy rövid bekezdés található erről a témáról külön kiemelés vagy hangsúly nélkül.

K-6. A peremfigyeléses technika felhasználásával végzett üzem közbeni öntesztelés tesztelő rendszerének magas megbízhatóságúnak kell lennie. Ennek az az oka, hogy egy biztonságkritikus beágyazott rendszerben alkalmazott újabb részegység vagy funkció nem csökkentheti annak eredő megbízhatóságát.

T-6. Két eset képzelhető el. Az első eset a kedvezőbb. Ekkor a célrendszert együtt tervezik és fejlesztik tesztelő rendszerrel. Figyelembe vehetőek a tesztelhetőségre tervezés⁴³ szempontjai és szabályai. A tesztelő rendszert együtt lehet fejleszteni a célrendszerrel, egy integrált rendszerként. A teljes fejlesztési folyamat a biztonságkritikus hardver és szoftverfejlesztés során alkalmazott irányelvek, szabványok és módszerek szerint történhet.

A másik esetben egy meglévő rendszert kell tesztelhetővé tenni. Mérlegelni kell, hogy ez megéri-e, hiszen biztonságkritikus rendszereknél ez lényegében egy teljesen előlről induló fejlesztési folyamatot jelent. A meglévő rendszer esetében véleményem szerint nem alkalmazható a peremfigyeléses beépített önteszt, mert implementálása nem éri meg. Javaslatom erre az esetre az, hogy a meglévő rendszert kell hagyni „kifutni”, azaz élettárama végéig használni, működtetni. Ezzel párhuzamosan a célrendszer fejlesztéseit és a tesztelő rendszer implementálását együtt lehet elvégezni (az első esetben leírtak szerint), így az eredmény egy összességében értékesebb és jobb képességekkel rendelkező rendszer lehet.

K-7. A peremfigyeléses technika használatával végzett önteszt esetén elvárt az, hogy minél pontosabban meg lehessen határozni a hiba helyét és okát. Helyben képesnek kell lennie a tesztrendszernek arra, hogy a vizsgált készülék vagy rendszert a működést gátló meghibásodás esetén a hiba mértékétől függően leállítsa, esetleg biztonsági üzemmódba állítsa. A pontos hibahely és hibaok meghatározása lehetőleg történjen a helyi tesztvezérlő által. Ha a számítási teljesítménye nem megfelelő, akkor a tesztelés során begyűjtött adatokat legyen képes távoli kiértékelésre elküldeni, vagy egy helyben csatlakoztatott kiértékelő eszközre elküldeni. Lehetőség szerint legyen alkalmas a tesztrendszer a meghibásodást nem okozó, de már észlelhető digitális vagy analóg parametrikus eltérésből, vagy rövid ideig fennálló, még korrigálható funkcionális hibából előre jelezni a várható meghibásodást.

⁴³ Design for Test, DFT

T-7. A peremfigyeléssel ellátott digitális áramkörök esetén a hibahely a kiforrott technikának köszönhetően nagyon jól behatárolható, akár áramköri csomópont szintig is. A lehetséges hibaokok száma az áramkör felépítésének ismeretében leszűkíthető. A digitális klaszterek esetében a hibahely kisebb határfokkal, de jól behatárolható, ugyanígy a lehetséges hibaokok listája is. A peremfigyeléssel rendelkező analóg és kevert jelű áramköröknél a technológiából adódóan a hibahely nagyon jól behatárolható, a hibaokok listája jól szűkíthető. Az analóg klaszterek vizsgálatára a későbbi fejezetekben bemutatott, javasolt új módszerek véleményem szerint csaknem olyan eredményt tudnak majd hozni, mint a digitális klaszterek esetében a meglévők, azaz a hibahely megfelelő mértékben behatárolható, a hibaokok listája megfelelő mértékben szűkíthető. A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás felhasználásával már ma is léteznek olyan megoldások, amelyek képesek a meghibásodás előrejelzésére. Kutatásaim szerint korábban főként mechanikai esetekre dolgoztak ki ilyeneket, de az utóbbi években elektromos, elektronikai és informatikai célú kutatásokat is többen végeztek [51] [52] [53] [54] [55]. Ezen módszerek tapasztalatai vélhetően értekezésem kontextusában is felhasználhatóak.

K-8. A járulékos, peremfigyelés alapú beépített tesztrendszer többletköltsége maradjon ésszerű határon belül a teljes készülék vagy rendszer költségéhez képest.

T-8. A költséget a készülék vagy rendszer teljes életciklusára értve, érdemes azt három fő komponensre bontani: a tervezési és fejlesztési költségre, a készülék vagy rendszer árára, valamint a készülék vagy rendszer üzemeltetésének költségére. Az első komponens értelemszerűen növekszik, hiszen a fejlesztés és tervezés sok tudást és munkát jelent, esetenként kutatásokat is kell végezni. Ez azonban egyszeri költség. A rendszer ára a beépített tesztrendszer következtében nőni fog, de az integrált áramkörökben meglévő, eddig ki nem használt infrastruktúra nem jelent külön költséget. Becslésem szerint a járulékos elemek költsége a tesztelendő készülék vagy rendszer árához képest nem lenne jelentős (20...35%), ugyanakkor számos előnyt hozhat, elsősorban a megbízhatóság növekedne. A rendszer fenntartási-karbantartási költségei csökkennének (pl. a karbantartások, ellenőrzések időközének növelése és a javításhoz szükséges idő csökkenése miatt, valamint a használatból való kiesés időtartamának költségei is kisebbek lennének), azaz az üzemeltetési költség csökkenne. Úgy gondolom, hogy a teljes életciklusra a rendszer költsége jelentősen csökkenthető lenne.

A fenti követelmények egyenrangúak, sorrendjük nem tükrözi a fontosságukat. A rendszerezésnél egy véleményem szerint logikus sorrendet tartottam.

1.3.1 Lehetőségek és korlátok

Ebben az alfejezetben összegzem a peremfigyelés technológiájának üzem közbeni beépített öntesztben való alkalmazásának lehetőségeit és korlátait.

Az általam felkutatott fontosabb lehetőségek [9]:

- A kritikus beágyazott rendszert tartalmazó elektronikai készülékkel szembeni elsődleges követelmény a megbízhatóság, ezért potenciális alkalmazási terület a megbízhatóságot növelő üzem közbeni önteszt számára.
- A terepi készülékek egy része kritikus beágyazott rendszert tartalmaz, amelyek tesztelése a fokozott meghibásodási veszély, illetve a folyamatos megbízhatóság miatt létfontosságú. Mivel a vizsgálatokkor nincs lehetőség a készülék szétszerelésére, külső eszközökkel való mélyreható vizsgálatára, ezért egy terepi készülék tervezése esetében törekedni kell arra, hogy ne legyen szükség külső eszközökre a teszteléshez, és a vizsgálatot a felhasználó, vagy a készülék saját maga képes legyen levezényelni. A terepi készülék potenciális alkalmazási terület a beépített üzem közbeni önteszt számára.
- Az önteszteléshez minél kevesebb járulékos áramkört, kell felhasználni, mert ezek növelik a meghibásodás valószínűségét. A minimálisan szükséges kiegészítő áramköröket nagy megbízhatóságú alkatrészekkel kell megvalósítani. Mivel a digitális peremfigyelés csekély járulékos áramkörrel, az analóg peremfigyelés viszonylag kis elemszámú járulékos áramkörrel megoldható, ezért potenciális alkalmazási terület a peremfigyelésen alapuló üzem közbeni önteszt számára.
- A hagyományos, periodikus, normális üzemen kívül (pl. bekapcsoláskor) végzett tesztelés rövid ideig tart, és ritkán fut le. Így azonban egyes hibák elfedve maradhatnak. (Pl. tranziens hibák, vagy a működés közbeni melegedés vagy egyéb stressz által okozott hibák. Ezért a normál üzem közben elvégzett öntesztek jobb hibafelderítési arányt adnak. Az ilyen célú használat is potenciális alkalmazási területnek minősül.
- Az üzem közben végzett beépített öntesztelnél funkcionális és parametrikus mérések elvégzése is szükséges. Ezekhez a digitális peremfigyelés kiváló támogatást ad, a kevert jelű peremfigyelés jelenleg csak részlegesen. Az általam javasolt kiegészítő módszerekkel azonban az analóg egységek tesztelésének lehetőségei is kiterjeszhetőek. A beépített öntesztelést jól kiegészítheti egy peremfigyeléssel megvalósított naplózás funkció (lásd későbbi fejezetek). A peremfigyeléses tesztelés alkalmazása az üzem közbeni öntesztben ebből a szempontból is perspektivikus.

- Az aktív redundáns melegtartalékos, és a hibrid redundáns rendszerek egy részénél [56] [57] a peremfigyelés alkalmas arra a célra, hogy a rendszer felügyeletet ellátó egység begyűjtse a digitális és az analóg be- és kimenetek adatait, majd ezek alapján döntsön azok működőképességéről, azaz arról, hogy maradhatnak-e aktív vagy tartalékolt egységek, vagy ki kell-e zárni őket a további működés során. A hagyományos hibadetektálási megoldásokat a peremfigyelés alkalmazása tehát kiegészítheti vagy leválthatja. Úgy gondolom, hogy a redundáns rendszerek bizonyos köre potenciális alkalmazási területnek tekinthető.

Az általam megállapított legfontosabb korlátok:

- A hardveres egységeknél egy-egy funkcionális egységen, vagy egységcsoporton általában csak akkor lehet öntesztet futtatni, ha az adott egység üresjárásban vagy használaton kívül van. Ez abban az esetben minősülhet üzem közbeni tesztelésnek, ha a készülék normális üzemi állapota ez az üresjárat (pl. periodikus aktivitás), ami kihasználható öntesztre. Ha ezt az üresjáratot mesterségesen kell létrehozni, vagy a bekapcsoláskor történik meg az önteszt, akkor nem beszélhetünk igazi üzem közbeni önteszt futtatásáról. A nem periodikusan aktív rendszerek esetében az üzem közbeni önteszt csak bizonyos redundáns rendszerekben, a rendszerek hidegtartalékolt [58] állapotában végezhető el, azonban a hidegtartalékok változathatóak.
- Azoknál a rendszereknél, amelyek több feladatot virtuálisan vagy valóságosan párhuzamosan képesek futtatni, az öntesztet vezérlő tesztprogram a készülék főprogramjával egyidőben is futthat, de a magas megbízhatóságú működést ekkor is biztosítani kell, és egymásra hatást ki kell küszöbölni. Ez az egy intelligens eszközt (pl. processzort) tartalmazó rendszerekben nem oldható meg a biztonsági követelmények teljes betartása mellett, így mindenképpen külön tesztvezérlő szükséges.
- A részletes önteszt során esetenként nagyszámú vizsgálatot kell elvégezni, ami jelentős időt igényel. Ez sokszor nem megengedhető. Csak úgy lehet a tesztelési időt ésszerű értéken tartani, ha – a fontosságuktól függően – a rendszer részegységeit osztályozzuk, és külön-külön megállapítjuk, hogy egy-egy egységen milyen gyakran, és milyen részletességű tesztet kell elvégezni. Összetettebb funkcionális egységeknél ez hozhat vállalhatatlan kompromisszumokat.
- Az öntesztelés elvégzéséhez természetesen szükség van a készülékben biztosan jól működő egységekre, hogy ezekből kiindulva lehessen elvégezni a teljes rendszer vizsgálatát. A probléma azonban az, hogy az önteszt kezdetén nem tudunk meggyőződni a hibátlanág tényéről egyetlen alkatrész esetében sem. Ezért ilyenkor a hibátlanágot csak feltételezzük,

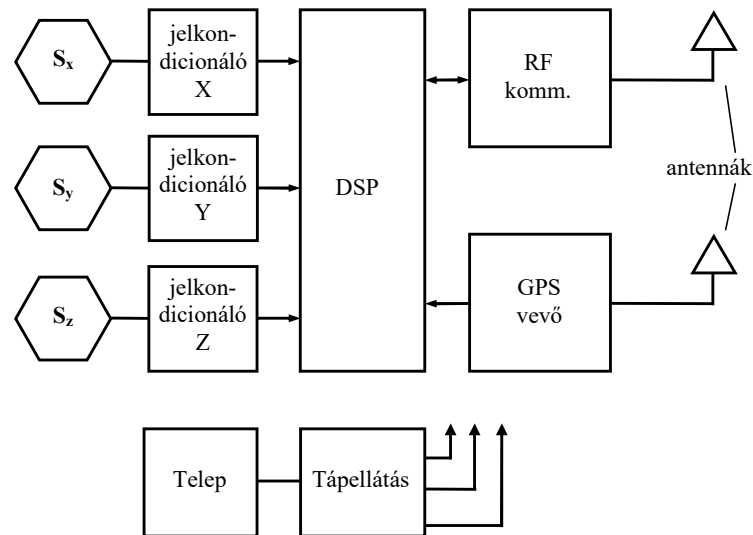
azután ezekből a hibátlannak feltételezett (minél kevesebb számú) áramköri egységből kiindulva végezzük el a rendszer igényelt mélységű vizsgálatát. Ezek az áramköri elemek szükségszerűen a helyi intelligens elem (processzor, mikrovezérlő, FPGA...), a hozzá közvetlenül csatlakozó nélkülözhetetlen elemek (pl. órajel-forrás), valamint a készüléken belüli kommunikációhoz szükséges infrastruktúra (buszrendszer), illetve szoftver oldalról a tesztrutinok. Ha ezek közül bármelyik hibás, az önteszt egy jelenleg ismert módszerrel, így a peremfigyeléses teszteléssel sem végezhető el.

- További korlát még az analóg funkcionális egységek jeleinek sérülékenysége, illetve az analóg tesztelés áramkörei által behozott hibák, ezekről korábban írtam.

1.3.2 Esettanulmány - Mágneses tér megváltozását érzékelő felügyelet nélkül üzemelő szenzor

A következőkben egy régebbi cikkem [59] alapján egy periodikus működésű katonai szenzornál a peremfigyelésen alapuló beépített önteszt megvalósításának lehetőségét tárgyalom. Tegyük fel, hogy öntesztelést kell kialakítani peremfigyelés alkalmazásával egy mágneses tér megváltozását érzékelő felügyelet nélkül üzemelő szenzornál. A szenzor belső felépítését (23. ábra) a különféle létező és fejlesztés alatt álló rendszerek (pl. REMBASS, MEMO, BSA) elemeiről szóló publikációk [60] [61] [62] [63] [64] tanulmányozása alapján kíséreltem meg rekonstruálni.

A készülék a mágneses tér X Y és Z komponenseit az S_x , S_y és S_z egymásra merőlegesen elhelyezett érzékelőkkel méri. Az érzékelők kimeneti feszültségét a jelkondicionáló egységek erősítik, annak érdekében, hogy a digitális jelfeldolgozó processzor A/D átalakítója részére előálljon a számára megfelelő tartományban változó bemeneti jel. (Amennyiben a mágneses tér viszonylag lassú változása miatt nem szükséges egy időben a három komponenszt mérni, akkor egy közös jelkondicionáló, és egyetlen A/D csatorna használható, átkapcsolással.) A DSP a mágneses tér három komponensével arányos jelet feldolgozza, szűri, elvégzi a detektálást és az azonosítást. Szintén a DSP veszi a GPS vevő által előállított pozíció adatokat, amelyekből a későbbiekben megállapítható a szenzor helye a terepen.



23. ábra – A mágneses teret érzékelő felügyelet nélküli szenzor lehetséges felépítése⁴⁴

Amennyiben szükséges (lekérdezéskor, vagy cél megjelenése esetén), rádiófrekvenciás kommunikációs csatornán történik az adatátvitel a terepi hálózat megfelelő elemei (ismétlő állomások, monitor egységek) felé. A szenzor telepes tápellátású, a kihelyezés után – attól függően, hogy hányszor aktiválódott – akár több hónapig is működőképes maradhat [64].

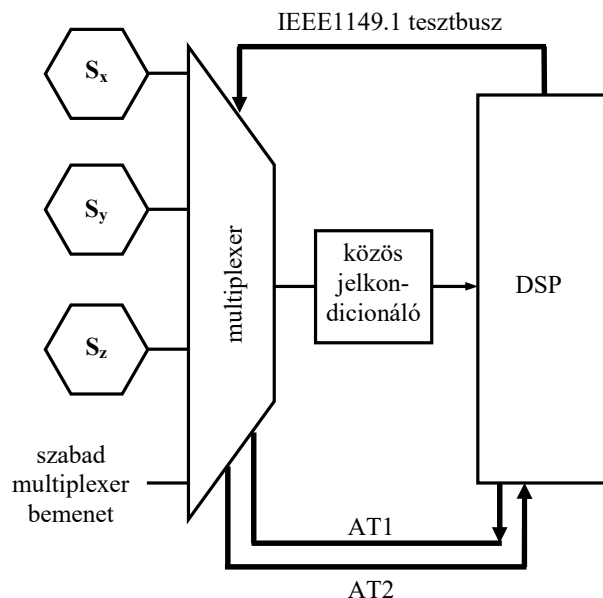
A monitor egység alkalmas lehet rendszerteszt elvégzésére is, azaz a hálózat elemeinek működőképességét felderítheti. Egy fejlett szintű rendszerteszt esetén elképzelhető egy indított önteszt, vagy egy folyamatosan futó, üzem közbeni beépített önteszt eredményeinek lekérdezése. (A meglévő rendszerek közül például a REMBASS rendszer szenzor monitorozó egysége (Sensor Monitoring Set, SMS) képes a rendszer funkcionalitását vizsgálni, valamint képes lehet az egyes egységek beépített tesztjének elindítását kezdeményezni, majd annak eredményeit megjeleníteni.)

A következőkben számba veszem a szükséges átalakításokat. A 23. ábra szerinti szenzorban megvalósítható az üzem közbeni önteszt, mivel van benne olyan egység (a jelprocesszor), amely az önteszt vezérlését elvégezheti. Az öntesztet a lehető legtöbb egységre érdemes kiterjeszteni, az analóg és a digitális áramkörökre is. Vannak olyan áramkörök, eszközök, amelyek nem, vagy csak részben vonhatóak be a tesztelésbe. Ilyen például a mágneses tér érzékelője, a GPS vevő, vagy a rádiófrekvenciás kommunikációs egység. A többi áramköri elem bevonható a tesztelésbe. A digitális áramkörök (pl. illesztők, pufferek) és a közöttük lévő kapcsolatok digitális peremfigyeléssel vizsgálhatóak. Hogy ez megvalósítható legyen, peremfigyeléses integrált áramkörökből kell felépíteni az áramkört. Az analóg egységek (pl. jelkondicionálók, tápegység) is bevonhatóak a tesztelésbe. Erre két lehetőség van. Egyrészt alkalmazható olyan peremfigyeléses feszültség monitorozó, amely

⁴⁴ Szerkesztette a szerző [59]

átkapcsolhatóan több áramköri pont feszültségét képes mérni, és a peremfigyelés buszon keresztül hozzáférhetővé tenni. Bizonyos esetekben (pl. tápfeszültségeknek, vagy a telep feszültségének, terhelőáramának mérése) ez a megoldás kielégítő. Másrészt alkalmazhatóak olyan analóg peremfigyeléssel rendelkező áramkörök, amelyekkel egy adott analóg áramköri pontra gerjesztés adható (mérőáram, vagy mérőfeszültség), illetve az adott pont feszültsége megmérhető. Ezen felül alkalmazható a későbbikben ismertetett, általam javasolt, kevert jelű peremfigyelést támogató áramkör is.

A következőkben blokkvázlat szinten vázolom (24. ábra), hogy hogyan kell a szenzor felépítését megváltoztatni ahhoz, hogy a jelkondicionáló egységek analóg peremfigyeléssel vizsgálhatóak legyenek. Csak az átalakítás elvét szeretném megmutatni, nem cél egy tökéletes elrendezés kialakítása.



24. ábra – A jelkondicionáló áramkör környezetének kialakítása peremfigyeléses vizsgálathoz⁴⁵

Az analóg peremfigyeléses alkatrészek kínálata napjainkban erősen korlátozott. Egy egyszerű megoldást mutatok be létező integrált áramkörrel. Nem vizsgáltam, hogy megengedhető-e a bemutatott átalakítás: egy jelkondicionálót és egy A/D csatornát alkalmazó változatot ábrázoltam, mert ezt lehet kialakítani az STA400 IEEE 1149.4 szabvány szerinti analóg multiplexerrel (22. ábra). A multiplexer csatlakozik az IEEE 1149.1 szabványú peremfigyeléses tesztbuszhoz, valamint az AT1 és AT2 analóg tesztbusz-vonalakhoz. Az AT1 vonalon a processzor egy PWM kimenete (aluláteresztő szűrő után), vagy D/A átalakítója adhat gerjesztést, az AT2 vonalon keresztül pedig a válaszjel

⁴⁵ Szerkesztette a szerző [59]

mérhető. Jelen elrendezésben az AT2 vonal nem használható a jelkondicionáló válaszelének mérésére, ami nem okoz problémát, mert kimeneti feszültsége a processzor egy A/D bemenetén mérhető. Ugyanakkor AT2 alkalmas a szenzorok által szolgáltatott feszültség, illetve a negyedik, szabad multiplexer bemenet feszültségének mérésére (pl. telepfeszültség).

A jelkondicionáló egység teszteléséhez például a következő méréseket lehet elvégezni:

1. Hibafeszültség mérése: bemenetét földre kötve, meg kell vizsgálni, hogy kimenetén mekkora a hibafeszültség.
2. Erősítés mérése: közepes bemeneti feszültség esetén ki kell számítani a kimeneti és a bemeneti feszültség hányadosát.
3. Linearitás mérése: az erősítés méréseit több bemeneti feszültségnél elvégezve, fel lehet venni a kimeneti feszültség-bemeneti feszültség kapcsolatát leíró függvényt.

Úgy gondolom, hogy ez az egyszerű példa jól szemlélteti a peremfigyelés alkalmasságát beépített öntesztben való alkalmazásra. Végeztem másik, eddig még nem publikált esettanulmányt redundáns rendszerek esetére is, azt terjedelmi okokból nem ismertetem, de ott is kedvező eredményre jutottam.

1.4 Összegzés

Ezt a fejezetet a mélyreható és széleskörű irodalomkutatásom lényegét kiemelő összefoglalásával kezdtem. Ebben a részben áttekintettem és elemeztem az öntesztelés lehetőségeit, a peremfigyeléses tesztelés szabványait és eszközeit.

Kutattam a peremfigyeléses vizsgálat alkalmazási területeit, és megállapítottam, hogy az üzem közbeni beépített öntesztben nem alkalmazzák ezt a technológiát. Ezek után megfogalmaztam a peremfigyeléses technika üzem közbeni öntesztben való alkalmazásának követelményeit, és számba vettem a követelmények teljesítésének lehetséges módjait. Ahol lehet, több szempontból is fogalmaztam meg teljesítési módot, illetve ahol lehet, azonos szempontból több teljesítési módot fogalmaztam meg.

A továbbiakban számba vettem és rendszereztem a peremfigyeléses technika üzem közbeni beépített öntesztben való alkalmazásainak lehetőségeit és korlátait. A korlátokat leszűkítettem, illetve több ponton utaltam arra, hogy ezek a korlátok véleményem szerint nagyrészt áttörhetőek.

Ezek után ismertettem egy korábbi esettanulmányomat, amelyben egy periodikus aktivitású terepi szenzor lehetséges átalakítását vázoltam olyan módon, hogy az öntesztjében a peremfigyeléses technika alkalmazható legyen.

Új tudományos részeredmények egyrészt a fenti követelményrendszer felállítását és a lehetséges teljesítések hozzárendelését, valamint a lehetőségek és korlátok rendszerezését tekintem. Ezekre a részeredményekre alapozva új tudományos eredmények tekintem, hogy megállapítottam, hogy a kritikus beágyazott rendszerekben kevés korlátozás mellett kiválóan alkalmazható az üzem közbeni öntesztben a peremfigyeléses technika, amely növelheti az eredő megbízhatóságot.

2 KEVERT JELŰ VIZSGÁLATOT TÁMOGATÓ INTEGRÁLT ÁRAMKÖRI STRUKTÚRA KIDOLGOZÁSA

2.1 A kevert jelű vizsgálat célja

Az 1. fejezetben már volt szó a kevert jelű peremfigyelésről, az ott leírtakat kiegészítve összefoglalom, hogy milyen feladatok merülhetnek fel a kevert jelű peremfigyelésnél. A fókusz az analóg mérésekre teszem, mert ezek a mérések összetettebbek, és több problémát vetnek fel, mint a digitális mérések. A szabvány által megcélzott területek a korábbiakban leírtak szerint:

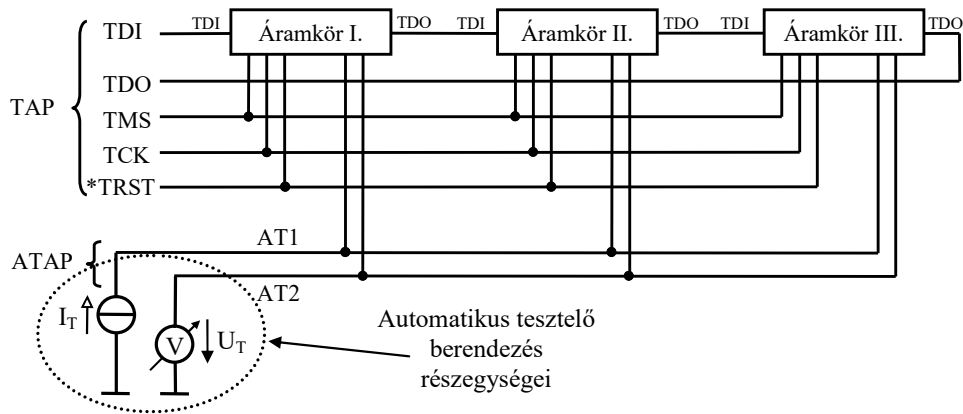
- az integrált áramkörök közötti összeköttetések vizsgálata analóg jelekkel;
- parametrikus tesztelés – analóg (elsősorban passzív) alkatrészek jelenlétének és értékének vizsgálata az áramköri panelen belül;
- magában a kevert jelű peremfigyeléssel rendelkező integrált áramkörben a belső analóg áramköri egységek tesztelése.

Az analóg jelekkel való összeköttetés-vizsgálat azért szükséges, mert két integrált áramkör között analóg jelek is kerülnek átvitelre akár aszimmetrikus, akár szimmetrikus (differenciális) csatornákon. Ezeknek az összeköttetéseknek a vizsgálata digitális jelekkel körülményes (járulékos digitális peremfigyelő cella lenne szükséges), és nem adna kielégítő eredményt. A parametrikus vizsgálatok DC és AC gerjesztéssel is történhetnek, mert a reaktív és összetett impedanciájú elemek esetén a paraméterek egy része csak AC gerjesztés mellett mérhető.

2.1.1 A kevert jelű vizsgálatnál felmerülő feladatok

A témakört az IEEE 1149.4 szabvány panel szinten kialakítandó minimális infrastruktúrája felől közelítem meg. Eszerint a digitális peremfigyelésben rögzített TAP csatlakozásokon és az alkatrészekből kialakított TDI-TDO hurkon kívül 2 külön vonalat kell megvalósítani, az AT1 és AT2 vonalakat. Ezek adják az analóg TAP-et (ATAP). Ide csatlakozhat az elektronikai panelen kívüli külső, vagy önteszt esetén a panelen vagy készüléken belüli belső tesztvezérlő. Az AT1 vonalra kell a gerjesztő áramot adni, az AT2 vonal pedig a válasz feszültség mérésére szolgál: ezen a vonalon kell feszültségmérést végezni. A 9. ábra kiegészítésével szerkesztettem meg az alábbi ábrát, amely mutatja a két, a tesztvezérlőben kialakítandó erőforrás, az áramgenerátor és a feszültségmérő csatlakoztatását is.

Az ábra alapján látható, hogy két, egymástól viszonylag jól elhatárolható funkciót kell megvalósítani egy külső vagy egy beágyazott tesztvezérlőben: a TAP és az ATAP kezelését.



25. ábra – Az analóg mérésekhez szükséges erőforrások csatlakozása (IEEE 1149.4)⁴⁶

Ebből következően két út áll rendelkezésemre a kitűzött cél eléréséhez, azaz a kevert jelű vizsgálatra alkalmas integrált áramköri struktúra kidolgozására:

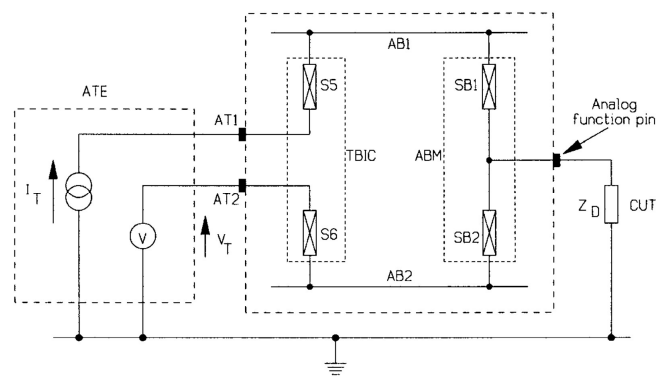
1. TAP vezérlésének és az ATAP meghajtásának és érzékelésének kialakítása az integrált áramkörben. Ez abban az esetben célravezető, ha a minél kompaktabb megoldást szeretnék megalkotni. A struktúra bonyolult, az integrált áramkör drága lesz. Ráadásul, ha egy rendszerben csak egy vagy néhány elem (elektronikai panelen) kell kialakítani a kevert jelű peremfigyelést, akkor lesznek duplikált, vagy ki nem használt vezérlő alegységek. PI. ha az elterjedt multidrop kialakításban a mester vezérlő TAP-je az adott panelre a címezhető tesztporton (ASP) keresztül beérkezik, és a panelen lévő kevert jelű vezérlővel kommunikál, akkor az IEEE 1149.1 szerinti egységeket felesleges a helyi kevert jelű vezérlővel kezelni, mert ezt az ASP is végezheti. Ezt a megoldást a fentiek miatt elvetem, mert úgy gondolom, hogy az elterjedést a várhatóan magas ár gátolná. (Ezen az álláspontomon az változtathatna, ha a kevert jelű vizsgálatra alkalmas vezérlőkre az igény megnőne – ezáltal az áruk csökkenhetne, – és gazdaságos lenne olyan helyekre is kevert jelű vezérlőt alkalmazni, amelyeken csak a digitális peremfigyelésre van szükség.)
2. Csak az ATAP meghajtásának és érzékelésének kialakítása az integrált áramkörben. Ez akkor célravezető, ha egyszerű és olcsó megoldást szeretnék megalkotni. Ezzel vélhetően elérhető az, hogy a megoldás gyorsabban terjed az iparban, mint az előző pontban ismertetett. A terjedése magával hozhatja azt, hogy igény merül fel az egy tokban elhelyezett TAP és ATAP struktúra kialakítására (azaz az 1. pontban megfogalmazott megoldásra). A továbbiakban erre a megoldásra fogok javaslatot tenni, de kiegészítésként és alapul az esetleges továbblépéshez a digitális egységek gerjesztéséről is fogok néhány szót ejteni.

⁴⁶ Szerkesztette a szerző [66]

2.1.1.1 Néhány mérhető jellemző és az analóg részegységek vizsgálati rendszerének mérés technikai problémái

Mielőtt a tovább lépnek, szükségesnek látom röviden az impedanciamérés és a feszültségmérés példáin bemutatni a kevert jelű peremfigyelés alkalmazását. Ehhez korábbi publikációmot használok fel. [65] [66] Csak aszimmetrikus (single-ended) eseteket tárgyalok, a szabványban [27] megtalálhatóak differenciális példák is.

Az első példa (26. ábra) egy analóg funkciójú kivezetés és a föld közé kötött impedancia mérési módszerét mutatja. Az ábrán (és a további ábrákon) csak a mérési módszer bemutatásának szempontjából fontos részletek (áramgenerátor, feszültségmérő, mérendő impedancia TBIC, ABM(-ek) láthatóak. Azok a kapcsolók, amelyek nyitottak, az átláthatóság érdekében nincsenek feltüntetve.



26. ábra – Impedancia mérése kivezetés és föld között⁴⁷

A cél Z_D értékének a meghatározása. A mérőáram (I_T) az AT1-en vezethető be, a mért impedancián eső feszültség (V_T) pedig az AT2-n jelenik meg. A mérőáram útja: AT1-S5-AB1-SB1- Z_D felső pontja-GND. Z_D felső pontján a mérőáram hatására kialakuló feszültség SB2-AB2-S6-AT2 útvonalon kerül ki a feszültségmérő felső pontjára. A mérés láthatóan 3 vezetékes, mert az áram-hozzávezetés és a feszültség-elvezetés más útvonalon történik. A mérést nem befolyásolja az áramút impedanciája (elsősorban a vezetékek és a kapcsolók ellenállása), mert közvetlenül a Z_D -n kialakuló feszültséget mérjük vissza. A feszültség visszavezetésnél ugyan akár jelentős ellenállás is kerülhet a jel-útvonalba, de azon jelentős áram nem folyik, így lényegében a Z_D -n eső feszültség jelenik meg AT2-n. Mindez akkor igaz, ha a földelő vezetékrendszer megfelelően alacsony ellenállásúra van kialakítva. Z_D értéke a mért értékek alapján egyszerűen kiszámítható. Az impedanciamérés elvégezhető két analóg funkciójú kivezetés közé kötött impedancia esetén, vagy akkor is, ha a mérendő impedancia egyik vége tápfeszültségen van.

⁴⁷ Az ábra forrása: [27] p. 61.

Ha a mérendő impedancia két analóg peremfigyeléses láb közé csatlakozik, két módon is el lehet végezni értékének meghatározását:

1. Az előzőekben ismertetett módszert alkalmazhatjuk, azzal a kiegészítéssel, hogy – mivel a mérendő impedancia egyik végpontja sem földelt, viszont a tesztelő berendezés áramforrása és feszültségmérője igen – a mérendő impedancia egyik végpontját az analóg lábra csatlakozó ABM segítségével (SG kapcsoló zárásával) földre kötjük. Ekkor azonban SG kapcsoló bekapcsolási ellenállása hibát okoz, mivel a rajta átfolyó mérőáram hibafeszültséget ejt.
2. Ezt a hibafeszültséget meg tudjuk mérni a gerjesztő áram változatlanul hagyása mellett, de a feszültségmérés pontját áthelyezve SG felső pontjára. Ekkor a mérendő impedancia értéke a két megmért feszültség különbségéből (azaz a mérendő impedancián eső feszültségből) és a mérőáramból számítható.

Második példaként egy külső feszültség megmérését hozom, és terjedelmi okokból szintén a 26. ábra alapján magyarázom. Tegyük fel, hogy a feladat Z_D felső pontján megjelenő feszültség megmérése, de a feszültség a kapcsolásban lévő más elemek hatására keletkezik. Ekkor mérőáram nem kell, tehát S5 és SB1 nyitott. A mérendő feszültség az előzőekhez hasonlóan SB2-AB2-S6-AT2 útvonalon kerül ki a feszültségmérő felső pontjára.

Az peremfigyeléses technika analóg célra való használhatóságát, illetve pontosságát – akár impedanciamérés, akár más mennyiség (feszültség, áram) mérése esetén – különféle mértékben több tényező befolyásolja. Röviden, pontokba szedve áttekintem a főbb felmerülő méréstechnikai problémákat [66] [67]:

- a legkisebb mérhető impedanciát a kapcsolók és a vezetékezés ellenállása, az AT1 gerjesztő vonal áramterhelhetősége, valamint az AT2 vonal jel-zaj viszonya határozza meg;
- a legnagyobb mérhető impedanciát az AT1 vonal szivárgási árama és az átvihető frekvenciasáv korlátozza;
- a kapcsolók (transmission gate-ek) bekapcsolt átmeneti ellenállása nem 0Ω , és függ az átvinni kívánt jel szintjétől;
- a kapcsolók kikapcsolt szigetelési ellenállása véges, szivárgás lép fel;
- a kapcsolók a fizikai működésük miatt, valamint az elektrosztatikus védelem miatt beépített védődiódák hatása miatt nemlineáris tulajdonságúak: váltakozó áramú használat során torzítás lép fel, és ez a torzítás ráadásul függ a jelszinttől is;

- a belső (és az elektronikai panelen kialakított) vezetékvezésnél az ellenállásán kívül az analóg tesztvezetékek közötti áthallás (amelynek mértéke a frekvencia növekedésével együtt nő), illetve a vezetékekbe jutó elektromágneses zavarjelek is problémát jelentenek;
- a viszonylag hosszú vezetékek nemideális volta (szórt kapacitás, parazita induktivitás) a frekvenciasáv felső határát bekorlátozza, ugyanakkor a frekvenciától függő fázistolást is visz a rendszerbe.

Ezek a káros hatás a gyártástechnológia fejlődésével várhatóan egyre elhanyagolhatóbb mértékűek lesznek.

2.1.1.2 A méréshez szükséges egységek és a velük szemben támasztott követelmények

A fentiekből látható, hogy az ATAP-ra csatlakozó – esetünkben – beépített teszter, illetve annak funkcionális erőforrás egységei kevés elemből felépíthetőek. A következő elemek szükségesek:

- áramgenerátor az AT1 pont meghajtásához;
- feszültségmérő az AT2 ponton való feszültségméréshez;
- IEEE 1149.1 szabvánnyal kompatibilis vezérlő, amely a fent két egység működését felügyeli.

Az áramgenerátor és feszültségmérő egységekkel kapcsolatban az IEEE 1149.4 szabványban leírtakat figyelembe véve, és egy rugalmas rendszer kialakítását célként szem előtt tartva a követelményeket a 2. táblázatban foglaltam össze.

	Áramgenerátor	Feszültségmérő
Kötelező követelmények	<ul style="list-style-type: none"> • forrásáram maximuma 100 μA • DC, AC és DC+AC gerjesztés előállítás • frekvenciatartomány: 0...10 kHz, szinuszos jel • egyenletesség: $\pm 0,5\%$ a fenti tartományban 	<ul style="list-style-type: none"> • mérhető feszültség tartománya: a tápfeszültségek között • DC, AC és DC+AC feszültségmérés • frekvenciatartomány: 0...10 kHz • mérési hiba: kisebb, mint 1%
Célszerűen figyelembe veendő követelmények vagy irányok	<ul style="list-style-type: none"> • programozható AC forrásáram-komponens 1 μA-es lépésekben • programozható DC forrásáram-komponens 1 μA-es lépésekben • programozható frekvencia • az áramgenerátor legyen elszigetelhető AT1-től • mérőáram tartomány növelése • frekvenciatartomány növelése 	<ul style="list-style-type: none"> • Változtatható méréshatár • bemeneti ellenállás 1 MΩ felett • bemeneti kapacitás 20 pF alatt • a feszültségmérő legyen elszigetelhető AT2-től • mérési hiba csökkentése • frekvenciatartomány növelése

2. táblázat – Az ATAP meghajtásával és érzékelésével kapcsolatos követelmények

A kötelező követelmények az IEEE 1149.4 szabvány alapján kerültek a táblázatba. Alapul azt vettem, hogy az ATAP meghajtó és érzékelő egységeinek nem lehetnek rosszabb minőségi jellemzői, mint amit a tesztelendő alkatrészekre a szabvány előír.

A figyelembe veendő követelmények magyarázata:

- Áramgenerátor:
 - Programozható áramkomponensek: a forrásáram kötelező maximumáig 100 lépésben állíthatóvá válik a gerjesztőáram. Ezzel a mérendő impedancia függvényében optimálisan lehet megválasztani a mérőáramot.
 - Programozható frekvencia: a mérési frekvencia alkalmazkodhat a mérendő impedanciához vagy egyéb áramköri jellemzőhöz. Célszerűen „folyamatos” (1 Hz vagy kisebb lépésekben történő) frekvenciaállítást érdemes megvalósítani, így pl. egy törésponti frekvencia pontosabban meghatározható.
 - Elszigetelés lehetősége AT1-től: ezzel a vizsgálat idején kívül teljesen leválasztható az AT1 vonalról az áramgenerátor (nem csak az egyes áramkörök TBIC kapcsolóival), így kevésbé befolyásolja a normál működést.
 - Mérőáram növelése: azoknál a jövőbeni alkatrészeknél, amelyek belső kialakítása lehetővé teszi majd a nagyobb mérőáram alkalmazását, a kisebb impedanciák mérési hibája csökkenthető, vagy a legkisebb mérhető impedancia értéke lejjebb tolható. Javaslom, hogy a kialakítás olyan legyen, hogy a kimeneti áramot két lépésben 5, illetve 10-szeresre lehessen növelni, megtartva az áramgenerátor 100 lépésben való állíthatóságát. Így a kiadható maximális áram értéke 500 μ A és 1 mA lenne.
 - Frekvenciatartomány növelése: a frekvenciatartományra a jelenlegi szabvány minimumot ad meg (DC és 10 Hz...10 kHz), célszerű ezt a frekvenciatartományt kiterjeszteni, hogy az esetleges későbbi IEEE 1149.4-kompatibilis áramkörök lehetőségeinek kihasználását ne korlátozza az ATAP meghajtó és érzékelő eszköz. Javasolom az 50...100 kHz-ig való kiterjesztést, a félvezetőgyártás technológiai megoldásai miatt ennél szélesebb frekvenciatartományt nem tartok indokoltnak.
- Feszültségmérő:
 - Változtatható méréshatár: a mérési tartomány a tápfeszültségek közötti teljes tartomány, ezt az előírt hiba mellett egyetlen méréshatárban mérni nem gazdaságos. Két javaslatom van a megoldásra. Az első egy egyszerű méréshatárváltás, amely lehetővé tesz pl. 50 mV-os, 500 mV-os és 5 V-os méréshatárt. Ezek a tartományok

számításaim szerint egy 10 bites A/D átalakítóval már biztosítják a maximum 1%-os mérési hiba teljesítését. A másik lehetőség egy állandó méréshatárú, vagy inkább mérési tartományú A/D átalakító alkalmazása, amelynek a mérési tartományát a referenciafeszültség alsó és felső értékével végig lehet „tolni” a teljes mérési tartományon. (Ha például egy 10 bites A/D átalakító mérési tartománya 500 mV, akkor azt kb. 0,5 mV-os hibával képes megmérni. Ha ezt az 500 mV-os sávot át tudjuk „tolni” a megmérni kívánt feszültség közelébe, akkor ott a mérés kellő pontossággal elvégezhető: 50 mV-os feszültségig teljesül az 1%-os hiba követelménye. Ez alá a mérendő feszültség szint alá nincs értelme menni zavarvédelmi okok miatt.).

- Bemeneti ellenállás 1 M Ω felett: a mérendő feszültség forrásimpedanciája a kapcsolók miatt a 100 Ω -os nagyságrendet is elérheti. Ha a teljes jelútra 1 k Ω -mal számolunk, akkor minimum 1 M Ω bemeneti ellenállás szükséges, hogy az okozott állandó hiba ne lépje túl a 0,1%-ot (ami növeli az eredő mérési hibát).
- Bemeneti kapacitás 20 pF alatt: a dinamikus tulajdonságokat és az AC mérési pontosságot befolyásolja. Tapasztalati érték, 10 kHz-en már kb. felére csökkenti a bemeneti impedancia abszolút értékét, ami a mérési hibát növelheti.
- Elszigetelés lehetősége AT2-től: ezzel a vizsgálat idején kívül teljesen leválasztható az AT2 vonalról a feszültségmérő (nem csak az egyes áramkörök TBIC kapcsolóival), így kevésbé befolyásolja a normál működést.
- Mérési hiba csökkentése: ha megoldható, akkor a fenti komponensek által okozott eredő hibát jóval 1% alatt kell tartani (cél: 0,5%), mert az eredő mérési hiba (a mérendő rendszer kiküszöbölhetetlen hatásai miatt) 1% fölé növekedhet.
- Frekvenciatartomány növelése: lásd az áramgenerátor azonos követelményénél leírtakat.

2.1.1.3 A mérési eredmények kiszámítása és kiértékelése

A mérési eredmények kiszámítása és kiértékelése alapvetően a vezérlő (számítógép, mikroprocesszor, mikrovezérlő, FPGA) feladata, azaz a tesztet levezenylő egységé. Oda érkeznek a mérési eredmények, és az aktuális, valamint a korábbi mérési eredmények alapján ott lehet legkönnyebben kiszámítani és kiértékelni azokat. Ezeknek a számítási feladatoknak egy részét az e fejezet tárgyát képező kevert jelű vizsgálatra alkalmas integrált áramkör vezérlője is végezheti. Az elvégzendő feladatok egy lehetséges körét az alábbi listában összegeztem:

- alpműveletek vagy magasabb szintű műveletek elvégzése, pl. ellenállásméréshez osztás, kapacitás értékének kiszámításához osztás, szorzás, impedancia abszolút értékének meghatározásához négyzetre emelés és gyökvonás;
- mérési sorozat alapján csúcsérték, effektív érték, középérték, átlagérték számítása;
- alacsony frekvenciájú jeleknél megoldható a fázisszögmérés (arány-számítás);
- a nemlineáris elemeknél a lineáris torzítás miatt a gerjesztés hatására létrejövő válasz-feszültség felharmonikusokat fog tartalmazni, amelyek értékéből lehet következtetni a négypólus felépítésére. Ehhez meg kell határozni a válasz-feszültség spektrumát. [67] Erre a célra jól implementálható algoritmusok állnak rendelkezésre (pl. FFT);

A kiértékelés a kiszámolt mérési eredmények eltárolt határértékhez való hasonlításával történik, amikor egy limit felett vagy alatt, vagy egy tartományban ritkábban egy tartományon kívül megfelelő az eredmény.

2.2 A kevert jelű vizsgálatot támogató integrált áramkör egy lehetséges struktúrájának elemei

A jelenlegi beépített öntesztelési megoldásokban az analóg vagy kevert jelű integrált áramkörök és egyéb áramköri egységek vizsgálatba vonása nem, vagy csak kerülőúton, részlegesen és nehézkesen oldható meg. Úgy gondolom, hogy ennek egyik fő oka, hogy a vizsgálathoz nélkülözhetetlen áramforrás és feszültségmérő a megfelelő kialakításban, és egyetlen, rendszerbe jól illeszthető funkcionális elemként nem érhető el.

Ahogy azt a 2.1.1 alfejezetben meghatároztam, a fenti problémára megoldást adó két lehetséges kialakítás közül azzal foglalkozok, amely csak az ATAP meghajtását és érzékelését képes elvégezni. Bár erre a tématerületre helyezem a hangsúlyt, de vázolom a digitális vizsgálat infrastruktúrájának és a vezérlésnek a kialakítását is. A következő alfejezetet korábbi publikációm alapján írtam meg. [68]

2.2.1 Az analóg vizsgálat infrastruktúrája

Az IEEE 1149.4 szabvány szerint a teszteléshez szükséges egy külső áramforrás, amely az AT1 vonalon keresztül biztosítja a mérőáramot, és egy feszültségmérő, amely méri a mérőáram által a mérendő impedancián vagy alkatrészen ejtett feszültséget az AT2 vonalon. Természetesen az áramkör egy adott pontján való feszültség mérése esetén a mérőáramra nincs szükség. Az előzőekben (2.1.1.1 alfejezet) közöltem a követelményeket, amely jó alap egy részletes specifikációhoz, itt csak az egységekkel, és azok részegységeinek kialakításával foglalkozom.

2.2.1.1 Analóg gerjesztés előállítása

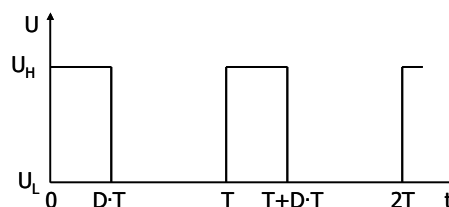
A gerjesztés áramjellel történik. Az analóg gerjesztőáramot a korábban megfogalmazott követelmények szerint programozható frekvenciával és amplitúdóval kell előállítani. Elképzelésem szerint a gerjesztéshez egy feszültség-vezérelt áramforrást használok, tehát a vezérlő feszültség jellemzőit (elsősorban a frekvenciáját) kell programozhatóvá tenni. (Az amplitúdó beállítását és a DC eltolást az áramgenerátor végzi, de ha a lenti módszerek lehetővé teszik e jellemzők befolyásolását, azt feltüntetem.) A gerjesztés előállítására a következő megoldásokat vizsgáltam:

- Analóg függvény-generátor

Az analóg jelgenerátor esetén az oszcillátor frekvenciáját analóg elemek (R-C, L-C) határozzák meg, amelyek hangolása nehézkes, ez a megoldás a digitális rendszerekhez nem illeszkedik. A hangoláshoz a frekvenciát meghatározó elemek közül csak az ellenállás értékének változtatása oldható meg digitális úton. Több gyártót megvizsgálva⁴⁸ a jelenleg rendelkezésre álló technológiával gazdaságosan 256/512, legfeljebb 1024 lépésben állítható digitális „potenciométer” gyártható. A használható frekvenciatartomány függ a potenciométer értékétől, hozzávetőlegesen kisebb ellenállás mellett kb. 4 MHz-ig terjed (ez megfelel a rögzített követelményeknek). A kapacitás és az induktivitás értékének változtatása legfeljebb frekvenciatartomány-váltásra jöhet szóba, multiplexer felhasználásával. Ismeretes olyan oszcillátor megoldás, amelyben a hangolás egy analóg szorzó egyik bemenetére adott hangolófeszültséggel végezhető el [69], amely már könnyebben illeszthető digitális rendszerekhez (azonban csupán ettől még nem tekinthető korszerűnek). A leírtak alapján a gerjesztő jel analóg módon történő előállítását nem javaslom.

- Analóg jel előállítása impulzus-szélesség modulációval (PWM)

Az impulzus-szélesség modulációval előállítható egyen, illetve váltakozó feszültség is. Digitális rendszerekben az unipoláris tápfeszültség használata miatt célszerűen az unipoláris PWM jel (27. ábra) alkalmazása jöhet szóba, azaz a PWM jel amplitúdója bekapcsolt állapotban a tápfeszültség (U_H), kikapcsolt állapotban pedig U_L (általában 0 V).



27. ábra – Unipoláris PWM jel

⁴⁸ Analog Devices, Microchip, Onsemi, Texas Instruments

Állandó kitöltési tényező esetén a PWM jel átlagértéke konstans (DC), AC jel változó kitöltési tényezővel állítható elő. Ha a PWM jel periódusideje T, kitöltése pedig D (D = 0...1), és mindkét jellemző állandó, akkor a PWM jel átlagértéke:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^{D \cdot T} U_H dt + \int_{D \cdot T}^T U_L dt \right) = \frac{1}{T} \cdot (D \cdot T \cdot U_H + T \cdot (1 - D) \cdot U_L) = \underline{\underline{D \cdot U_H + (1 - D) \cdot U_L}}$$

2. egyenlet – A PWM jel átlagértéke általános esetben

Ha $U_L = 0 [V]$, akkor

$$\bar{U} = D \cdot U_H [V]$$

3. egyenlet – A PWM jel átlagértéke, ha $U_L = 0 V$

Váltakozó feszültség előállításához a kitöltési tényezőt kell változtatni. Szinuszos gerjesztés előállításakor az elfogadható jelminőség (torzítás, jelhűség) biztosításához jelalaktól függően a PWM jel frekvenciájának 40...250-szer⁴⁹ kell nagyobbnak lennie, mint a legmagasabb kimeneti frekvencia. Ezt a viszonyszámot befolyásolja az átlagoló minősége is.

Az átlagoláshoz aluláteresztő szűrő szükséges, ami az egyszerű, kis helyigényű megvalósításhoz passzív vagy aktív RC szűrővel oldható meg. Minél közelebb van az előállított jel frekvenciája a PWM frekvenciához, illetve minél kisebb ingadozást (eltérést) engedünk meg a kimeneti jelben, annál magasabb fokszámú szűrő szükséges. Végeztem egy iránymutató számítást, szűrő tervezést és szimulációt. [68] Az ott leírtak szerint a megfelelő jelminőséghez DC jel létrehozása esetén minimum negyedfokú szűrő szükséges. A váltakozó feszültségű jel előállítása esetén a kitöltési tényező értékét a PWM jel minden ciklusában újra kell definiálni. Ez többféle módon történhet, de minden megoldás erőforrás igénye csekély. A PWM jellel való jelgenerálás jól illeszkedik a digitális rendszerekhez, és akár DC, akár AC jelek előállításánál használható. A PWM frekvencia által korlátozott jelfrekvencia, és a PWM frekvencia és a jelfrekvencia közelsége miatti nagy fokszámú szűrők alkalmazásának szükségessége azonban problémát jelent.

- Analóg jelek előállítása D/A átalakítóval

D/A átalakítók számos működési elv alapján létrehozhatóak (R-2R, binárisan súlyozott, delta-sigma stb.), és a digitális rendszerekhez optimálisan illeszkednek. Működésükhöz referenciafeszültséget igényelnek, amelynek pontosságától és stabilitásától függ a teljes D/A

⁴⁹ Több neves gyártó alkalmazási példáinak (application note) tanulmányozása alapján becsült érték

átalakítás precizitása. Minőségi jellemzőik jól kézben tarthatóak, magas minőségi követelményeknek megfelelő átalakítók is olcsón megvalósíthatóak. D/A átalakító felhasználásával egyen- és váltakozó feszültség (vagy struktúrától függően áram) is előállítható. AC kimenet előállításánál hasonló módszerek lehetségesek, mint a PWM-mel való jelgenerálásnál, és a felmerülő problémák is hasonlóak. Különbségként említhető, hogy a D/A átalakítókkal való egyenfeszültség (vagy áram) előállítása esetén nem szükséges a kimeneten szűrő alkalmazása, de AC jelek előállításánál igen. 0,1%-os amplitúdó pontosság biztosításához elvileg 10 bit, a gyakorlatban – a D/A átalakító hibái miatt – 10 bitnél nagyobb felbontású (11 vagy 12 bit) D/A átalakító szükséges. A fenti D/A átalakító struktúrák közül 10...12 bit felbontású kivitelben bármelyik könnyen, olcsón integrálható. A D/A átalakítók használata reális alternatíva az analóg gerjesztőjelek előállításához.

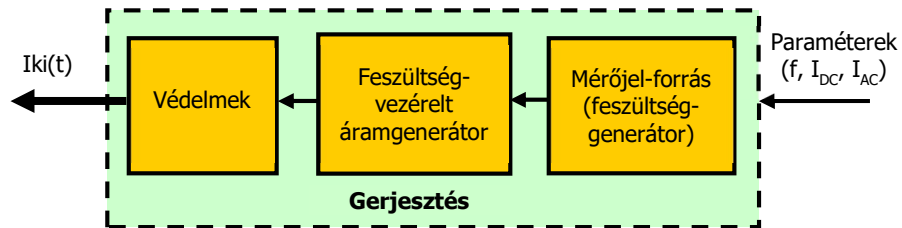
- Analóg jelek előállítása közvetlen digitális jelszintézissel (DDS)

A közvetlen digitális jelszintézis egy korszerű jelgenerálási módszer, amelynek segítségével nagy pontossággal (felbontással) és stabilitással lehet előállítani különféle periodikus jelalakokat, széles frekvenciatartományban. A módszert alapvetően szinuszos jelek előállítására dolgozták ki, de alkalmas a többi tipikus vizsgálójel (háromszög, négyszög) előállítására is. A megoldás különlegessége a D/A átalakítós megoldáshoz képest, hogy a 0 fázison való áthaladáskor nincs fázisugrás. [70] A DDS jelgenerátor kimenetén előálló analóg jel megfelelő szűrése nagy hatással van a jelminőségre. Mivel esetünkben az előállítandó maximális frekvencia 100 kHz, és a DDS referencia frekvenciája 20...100 MHz, így a szűrő specifikációja nem túl szigorú, alacsony fokszámú szűrővel is megvalósítható. A DDS technika alkalmazása a teljesen digitális vezérlés miatt optimálisan illeszkedik a digitális rendszerekhez. A DDS jelgenerátorral DC jel is előállítható, ha a fázis-amplitúdó átalakító táblázata konstans értékeket tartalmaz. Az elv kiválóan illeszkedik digitális rendszerekhez, a fentiekén kívül rugalmassága és bővíthetősége miatt ezt a jelgenerálási módszert tartom alkalmasnak a jelenlegi feladatra.

- Áramgenerátor

Mivel az AT1 vonalra adott gerjesztésnek áramnak kell lennie, ezért az előállított analóg feszültség jelet árammá kell alakítani. Az áramgenerátornak biztosítania kell a megfelelő terhelhetőséget, illetve rövid és hosszú idejű stabilitást és a megfelelően alacsony hibát. Mivel a teljes mérési lánc összes hibáját a korábbiakban 2%-ban definiáltam (a gerjesztésre és a mérésre 1-1% hibát feltételezve), ezért az áramgenerátor hibája csak néhány tized százalékos (kb. 0,5%) lehet. Ez pontosság az áramgenerátor áramkör integrálásával könnyen megvalósítható. (Erre abból következtettem, hogy számos gyártó készen kapható

feszültségvezérelt és digitálisan programozható áramforrásainak adatait tanulmányoztam. [71] [72] [73]) A kis kimeneti áram (100 μA , kiterjesztett esetben 1 mA) nem okoz technológiai problémát nagyfokú integráltság esetén sem. Az áramgenerátor kimenetét el kell látni a szokásos védelmekkel (ESD, túlterhelés, túlfeszültség...).



28. ábra – A gerjesztés moduljának blokkvázlata⁵⁰

2.2.1.2 Analóg válaszjelek érzékelése

A mért analóg válaszjel feszültség. (Feszültséget kell akkor is mérni, ha gerjesztés nem történik, csak külső vagy belső pontokon kell jelen lévő analóg jeleket monitorozni.) Értelemszerűen a mérés a digitális rendszerhez való illeszkedés miatt A/D átalakítóval történik, de szükséges járulékos egységek (jelkondicionálás, bemeneti védelem) kialakítása is. A funkciókat ismét az áramkör belső pontjaitól a külső pontok felé haladva veszem sorra.

- Az A/D átalakító

Az A/D átalakítók számos struktúra szerint kialakíthatóak (pl. flash, szukcesszív-approximáló, integráló, szigma-delta). A mai félvezető technikával relatív olcsón megvalósítható A/D-k felbontása 20 bitig terjed, e felett megnövekszik az előállítási költség. A felbontást tekintve a követelmény az, hogy a méréshatár alsó részén is a maximum 1%-os hibával terhelt mérésre legyen képes a rendszer. A fejezet korábbi részében már végeztem előzetes számításokat a minimális felbontás meghatározásához, miszerint megfelelő jelkondicionáló fokozatot és ideális A/D átalakítót feltételezve 10 bit elegendő lehet. Az A/D átalakító hibái miatt, és a rendszerbe belépő egyéb hibaforrások miatt 12 bites A/D átalakítót javaslok használni.

A digitalizálás sebessége, azaz, hogy másodpercenként hány darab mintát képes előállítani az átalakító, szintén fontos jellemző. Ha egy 100 kHz-es jelkomponens (korábban tett javaslatom szerint ez a legmagasabb előforduló tisztán szinuszos jel vagy legmagasabb frekvenciájú felharmonikus) feldolgozását akarjuk elvégezni, akkor azt a mintavételezés szabályai szerint 200 kHz-nél nagyobb frekvenciával kell mintavételezni, azaz olyan A/D-re van szükségünk, amely legalább 200 kS/s gyakorisággal képes mintát venni. Minél nagyobb

⁵⁰ Szerkesztette a szerző [68] alapján

mintavételi frekvenciával mintavételezzük a jelet, annál alacsonyabbak a követelmények az átlapolódás-mentesítő szűrővel szemben (pl. kisebb lehet az oldalmeredeksége), és annál alakhűbben fogjuk megkapni a rekonstruált jelet.

A tervezett integrált áramkörhöz tehát olyan A/D átalakító struktúrát kell választani, amellyel olcsón valósítható meg 12 bites felbontás mellett nagyobb, mint 200 kS/s sebességű mintavételezés. A szukcesszív approximációs (SAR) struktúra – amelyet a legtöbb A/D perifériával rendelkező mikrovezérlőben is integrálnak – képes teljesíteni ezeket a követelményeket, ezt javaslom alkalmazni. A SAR A/D átalakító pillanatértéket mér, a mért értékekből számos, korábban már tárgyalt jellemző (csúcsérték, effektív érték, spektrum, stb.) meghatározható. Az A/D átalakítóhoz szükséges referencia-feszültség szintén jól integrálható, kész gyártmányokat vizsgálva véleményem szerint kedvező áron integrálható olyan megoldás, amelynek hibája $\pm 0,1\%$ -nál is kisebb, stabilitása pedig 50...100 ppm. (Ha a referencia két kimeneti feszültség programozott előállítására képes, akkor lehetőség nyílik a feljebb már vázolt, a mérendő feszültséghez illeszkedő mérési tartományú feszültségmérő megvalósítására is.)

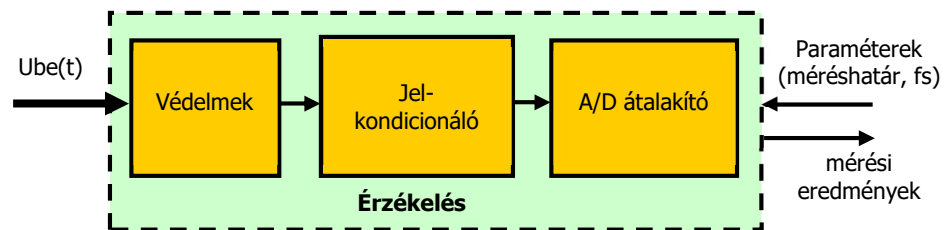
- Jelkondicionáló

A bemeneti fokozat és mérőerősítő igen fontos láncszem. Ha a mérőerősítő nem megfelelő minőségű, akkor az A/D átalakítás hiába precíz, a hibával terhelt, kondicionált bemeneti feszültségből már nem lehet a kellő pontossággal meghatározni annak értékét. A mérőerősítő feladata a viszonylag széles bemeneti feszültségtartománynak az A/D mérési tartományába való transzformálása, offszet- és erősítés-hiba mentesen, megfelelő linearitással. E fejezetben korábban leírtak szerint egy $1\text{ M}\Omega \parallel 20\text{ pF}$ -nál nagyobb bemeneti impedanciájú, minimum 3 méréshatárral rendelkező méréshatárváltó szükséges. A jelkondicionálónak el kell végeznie az átlapolódás-mentesítést, ehhez egy magasabb fokszámú, aktív aluláteresztő szűrő szükséges. Analóg módon nem szükséges a jeljellemzők mérése (pl. középérték, effektív érték), mert azt a mintavételezett jelből matematikai úton ki lehet számítani. A mérőerősítő bemenetének különleges védelmére nincsen szükség, csupán a szokásos védelmekkel kell ellátni. (Megjegyzem, hogy mind a gerjesztésnél, mind az érzékelésnél a zárt környezet miatt csak mérsékelt hatások ellen kell védelmet biztosítani ezeknek a védőáramköröknek.)

A kevert jelű peremfigyelés szabványa elsősorban a $10\ \Omega$ és $100\ \text{k}\Omega$ közötti impedanciák mérését célozza meg. Ha a maximálisan megengedett $100\ \mu\text{A}$ -es gerjesztő árammal számolunk, akkor a kimeneti feszültség $1\ \text{mV}$ és $10\ \text{V}$ közötti tartományban lesz. Ahhoz, hogy a fenti tartományba eső feszültségértékek az A/D átalakító bemeneti feszültségtartományába

kerüljenek, és optimálisan lehessen azokat digitalizálni, a kis feszültségek esetén erősítésre, nagy feszültségek esetében pedig csillapításra, vagy a mérőáram csökkentésére van szükség. Korábban végeztem erre vonatkozó számításokat [68], ezeket terjedelmi okokból itt nem írom le, és nem végzek további számításokat.

A fent leírtak alapján kialakított mérőrendszer blokkvázlatát a következő ábra mutatja.



29. ábra – Az érzékelés moduljának blokkvázlata⁵¹

2.2.2 A digitális vizsgálat infrastruktúrája

A korábbiakban leírtak szerint a digitális vizsgálat infrastruktúrájára csak rövid áttekintés szintjén térek ki, mivel a választott megoldás szerint a TAP vezérlését, és így a digitális vizsgálatokat nem az e fejezetben tárgyalt, tervezett integrált áramkör végzi.

Digitális áramkörök peremfigyeléses vizsgálatakor a teszthezélő tesztvektorok alapján állítja elő a gerjesztést, függetlenül attól, hogy a teszthezélő beépített vagy külső. A peremfigyelés során a gerjesztés és a válasz is soros digitális információ, ez a szintén digitális jellegű teszthezélő által könnyen feldolgozható. A gerjesztésre adott válasz kiértékelése után dönthető el, hogy a tesztelt áramkör helyesen működik-e. A módszer alapja az összehasonlítás, amikor a helyes működés során keletkező számított válaszokat hasonlítják össze a vizsgált áramkör válaszaival.

A tesztvektorok halmaza a mai összetett digitális rendszerekben automatikus tesztminta generátorral (Automatic Test Pattern Generator, ATPG) állítható elő hatékonyan, ami az áramköri elemek modelljét, a kapcsolási rajzot és a feltételezett (lehetséges) hibák halmazát veszi alapul. Az ATPG nem a tesztelt rendszerben van megvalósítva, hanem egy számítógépen. A tesztelő rendszer csak a generált adatbázist használja fel. Ezen felül lehetséges más módszerekkel is a tesztvektorok előállítását, bizonyos esetekben az álvéletlen jelet előállító lineárisan visszacsatolt léptetőregiszter (Linear Feedback Shift Register, LFSR) is megfelelő eredményt ad.

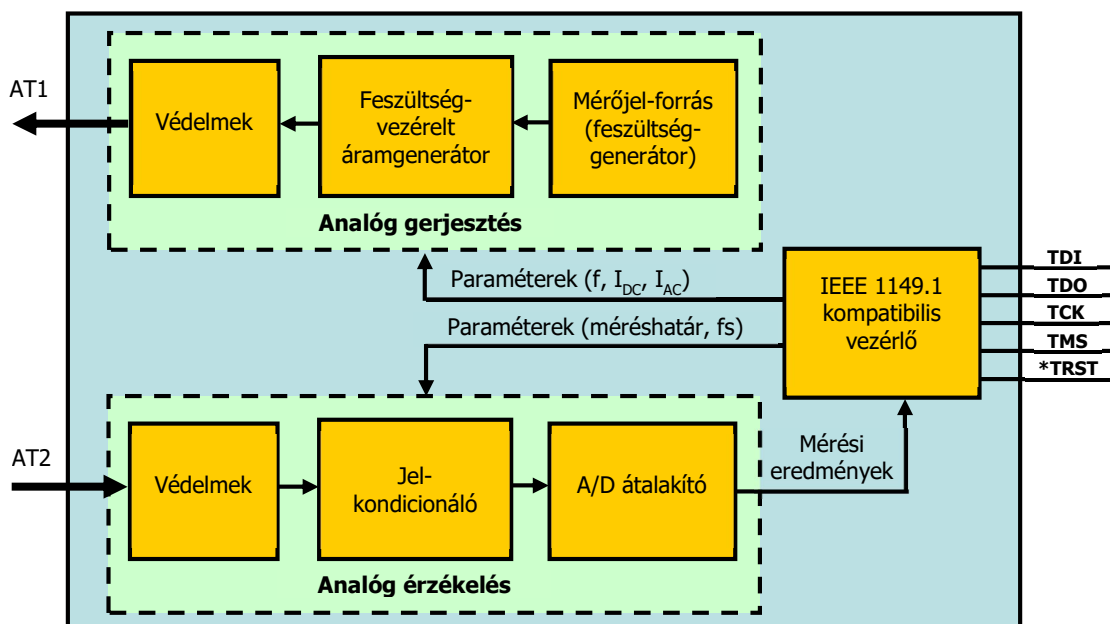
⁵¹ Szerkesztette a szerző [68] alapján

A fent leírtakból látható, hogy ezekből a funkciókból nem célszerű egyet sem a tervezett integrált áramkörbe vinni, mert felesleges, így igazolódott a fejezet elején tett döntésem. Ezekre a célokra a teszthezélő teljesen megfelel.

Ami további megfontolást igényel, hogy érdemes-e egy helyi memóriába áttölteni a teszthezélőket és a válaszok egy halmazát, és egy helyi teszthezélőt is implementálni. Így az integrált áramkör helyben képes lenne digitális teszthezélőket végezni az áramkör többi egységétől függetlenül. Ennek hozadéka, hogy párhuzamosan folyhatna több részáramkörben a teszthezélés, ami a sebességet növelné. Az előnyök közé tartozik még az is, hogy az üzem közbeni teszthezélés könnyebben megvalósítható, mert csak az éppen használaton kívüli egységek vizsgálata kezdeményezhető, a többi egységet a helyi vizsgálát nem zavarja.

2.2.3 A teljes infrastruktúra

Az alábbi ábrán a tervezett integrált áramkörnek a fenti részletekből összeállított, teljes elvi felépítése látható. A vezélő által a belső egységeknek küldött legfontosabb paramétereket feltüntettem. Berajoltam a külső csatlakozásokat, az IEEE 1149.1 interfészt és az ATAP AT1 és AT2 vonalait. Az ábra az első közelítésben lényeges elemeket és kapcsolatokat tartalmazza, az integrált áramkör megtervezéséhez további megfontolásokat kell tenni, esetleg kiegészítő egységeket kell betervezni, valamint a terv megvalósíthatóságának vizsgálata mikroelektronikai tervezőmérnök munkáját igényli.



30. ábra – A tervezett integrált áramkör belső felépítése⁵²

⁵² Szerkesztette a szerző

2.2.4 Az IEEE 1149.1 kompatibilis vezérlő: a kommunikáció és a vezérlés

Azt, hogy a fenti két területen belül melyik részterületről írok röviden ebben az alfejezetben, le kell szűkítenem. Ennek elsősorban terjedelmi okai vannak, másrészt úgy gondolom, hogy szűkítés nélkül az értekezés által lefedett terület túl nagyra bővülne. Így csak a tervezett integrált áramköri struktúrához szorosan kapcsolódó részterületekkel fogok foglalkozni.

Kommunikáció alatt azt értem, hogy a vezérlő képes az IEEE 1149.1 portra csatlakozni, a teszthezélővel üzeneteket váltani. Ez a felület az IEEE 1149.1 szabványban meg van határozva. Amit kiegészítésként ki kell dolgoznom, az a kötelező és az ajánlott utasításokon felül, a működtetéshez szükséges egyedi utasítások rendszere.

A vezérlés alatt azt értem, hogy a beérkező utasítások hatására, az egyes funkcionális egységek vezérlő regisztereibe be kell töltnie a konfiguráló biteknek, illetve ki kell olvasni a regisztereket, amelyekben az eredmények képződnek. Elképzelésem szerint a vezérlő regiszterek egy tömbben, a helyi vezérlő blokkjában vannak, de az egyes egységekre fejtik ki hatásukat. Elgondolásom szerint az A/D átalakító eredményregiszterének másolata, és a sorozat-mérésekhez szükséges memóriatömb szintén a helyi vezérlőben kerül kialakításra. A következőkben ismertetem a tervezett integrált áramkör egy lehetséges egyedi utasításkészletét 4. táblázat.

Utasítás	Paraméterek	Működés
Az analóg gerjesztéshez tartozó utasítások		
SETFREQ	<f>	beállítja a mérőjel frekvenciáját
SETCURDC	<a>	beállítja a mérőjel DC áramkomponensének értékét
SETCURAC	<a>	beállítja a mérőjel AC áramkomponensének értékét
SETWFORM	<w>	beállítja a gerjesztő jel jelalakját (a szabvány jelenleg csak szinuszos gerjesztést használ, az utasítás csak jövőbeni fejlesztéshez előkészítés)
Az analóg érzékeléshez tartozó utasítások		
SETSFREQ	<fs>	beállítja az A/D konverter mintavételi frekvenciáját
SETRNG	<r>	beállítja a megfelelő méréshatárt
GETVOLT	-	legutolsó mérési eredményt kiolvassa az A/D átalakítóból
GETSVOLT	-	egyetlen mintát vesz az A/D átalakító, nem a beállított mintavételi frekvenciával működik (S: single). Kiolvassa a mérési eredményt az A/D átalakítóból.
GETPVOLT	<n>	n darab elemet tartalmazó mérési sorozatot olvas ki, a minták eredeti formájukban elérhetőek
GETAVOLT	<n>	n darab mérés átlaga képződik, ezt kiolvassa

3. táblázat – A tervezett integrált áramkör egyedi utasításai

Az utasítások paraméterezését, paraméter-tartományát pontosan nem definiálom, úgy gondolom, hogy a jelenlegi kidolgozottsági fázisban ennek még nincs létjogosultsága. A „beállítja” annyit jelent, hogy az üzenet alapján a vezérlő feltölti a saját adott regiszterét, a „kiolvassa” annyit jelent, hogy a belső egységek adott regisztereit a vezérlő kiolvassa, és betölti a saját adott regiszterébe vagy regisztereibe.

A fent leírtakból és a 3. táblázatból megalkotható a szükséges regiszterek listája is, amit a 4. táblázatban ismertetek. (További pontosítás, bővítés szükséges lehet. Ennek az az oka, hogy a regiszterek szorosan kötődnek a fizikai felépítéshez, a végleges fizikai felépítés pedig csak a mikroelektronikai tervezés során alakulhat ki.)

Regiszter neve	Regiszter feladata
FREQ_REG	A gerjesztés frekvenciájának regisztere
CURRDC_REG	A DC gerjesztőáram értéke
CURRAC_REG	Az AC gerjesztőáram értéke
WFORM_REG	A beállítandó hullámforma azonosítója
SFREQ_REG	A mintavételezés frekvenciájának regisztere
RNG_REG	A méréshatárt beállító regiszter
VOLT_REG	Egyszeri vagy a legutolsó mérés eredményének regisztere
AVOLT_REG	Az átlagolt mérésekből adódó érték regisztere
PVOLT_REG0...n	A mérési sorozatot tartalmazó regisztertömb, minimum 1024 elemű (n = 0...1023)

4. táblázat – A tervezett integrált áramkör regisztereinek előzetes listája

2.3 A kidolgozott infrastruktúra alkalmazhatóságának kérdései

A fentiekben bemutatott integrált áramköri struktúra alkalmazása nem csak kritikus beágyazott rendszerekben, hanem minden olyan területen megfontolandó, ahol egyébként is használnak peremfigyelést, és igény van analóg részegységek tesztelésére is. Figyelembe véve azonban a kevert jelű peremfigyelés korábban említett problémáit (paraméterek esetleges romlása, zaj bejutásának lehetősége, esetleges jeltorzítás, többlet-terület igény a chipen, stb.) az alkalmazási köre ugyanúgy korlátozott, mint ahogy magának az IEEE 1149.4 szabványú kevert jelű peremfigyelésnek is. Ettől függetlenül bőven marad olyan kis, közepes és részben nagy precizitású analóg részáramkör, amelynél a behozott előnyök jóval nagyobbak, mint az okozott problémák.

2.3.1 Lehetőségek és korlátok

A következőkben az irodalomkutatásom és a saját eredményeim alapján összegyűjtöttem a kidolgozott infrastruktúra adta lehetőségeket és korlátokat, elsősorban a beépített öntesztre szűkítve.

Lehetőségek:

- A fentiekben tárgyalt integrált áramkör segítheti a kevert jelű peremfigyelés elterjedését, ugyanis a beépített öntesztben való, új alkalmazási lehetőségeket körvonalaz.
- Egy (kritikus) beágyazott rendszerben, vagy a számára jeleket szolgáltató, illetve a tőle jeleket fogadó áramkörökben számos analóg áramköri részlet található. Ezek öntesztben vonása jelenleg nem megoldott. Ennek egyik oka, hogy az önteszt során szükséges gerjesztések előállítására és az érzékelésre (mérésekre) nincs kész, integrált formában rendelkezésre álló áramköri funkció. Ezt a rést képes betölteni az általam vázolt integrált áramkör.
- A javasolt áramköri struktúra nem csak az önteszt során használható, hanem a gyártás, a karbantartás, és a szervizelés során is, ami az üzemeltetési és a javítási költségeket csökkentheti, a javítási időtartamot csökkentheti, így a rendszer üzemből való kiesésének ideje csökkenthető.
- A javasolt integrált áramköri struktúra lehetőséget ad arra, hogy – az áramkör megfelelő kialakítása mellett – az előző analóg funkció felől érkező bemenő jeleket mérje, illetve a következő analóg funkció felé továbbadandó kimenő jeleket előállítsa, így az integrált áramkört tartalmazó egység előtti és utáni egységek (korlátozott) vizsgálatára is alkalmas. Adott esetben az analóg egységek öntesztje kiterjeszhető anélkül, hogy újabb ilyen integrált áramkört kelljen alkalmazni.
- Megfelelő képességekkel rendelkező, és megfelelően nagy számítási kapacitású beépített vezérlővel (pl. digitális jelfeldolgozó processzor, DSP) helyben elvégezhetőek azok a műveletek, amelyek a mért jelekből adott paramétereket határoznak meg, vagy kiszámítható a mért jel spektruma, frekvenciamenete, stb.
- Bizonyos esetekben célravezető a sztochasztikus gerjesztéssel végzett vizsgálatok. Véleményem szerint a javasolt integrált áramköri struktúra alkalmazása a beépített öntesztben lehetőséget adna ilyen vizsgálatokra.

Korlátok:

- Az áramkör integrált áramkörben való fizikai megvalósításáról, így annak gyártási költségéről jelenleg nem áll rendelkezésre információ. Technológiai korlátot nem látok, mert minden részegység megtalálható más integrált áramkörökben. Megfelelő tömegben gyártva az integrált áramkör ára ésszerű értéken tartható. Az viszont nem biztos, hogy olyan értéken, hogy az áramkör a kritikus, vagy egyéb, nagyértékű beágyazott rendszerek körén kívül is

alkalmazható legyen. Ez problémát jelenthet az elterjedésben, ami visszahat a megfelelő darabszámban való gyárthatóságra.

- Az üzem közbeni öntesztelésben való alkalmazásokhoz ki kell alakítani egy új szemléletű rendszer-struktúrát, amiben az általam kidolgozott integrált áramkör hatékonyan, problémamentesen használható. Amíg ez nem történik meg, addig az alkalmazások köre nem terjeszthető ki kellő mértékben. Egy ilyen struktúra kialakítására tesztek kísérletet az értekezés 4. fejezetében.

A fentiek alapján elmondható, hogy a lehetőségek köre széles (és tovább bővíthető), az általam felfedett korlátok pedig teoretikusak vagy áthidalhatóak.

2.4 Összegzés

Ebben a fejezetben először megvizsgáltam, hogy milyen erőforrások szükségesek a kevert jelű peremfigyelés elvégzéséhez, majd tanulmányoztam, hogy különböző mérések hogyan végezhetőek el az IEEE 1149.4 szabvány szerint. Feltérképeztem azokat a felmerülő problémákat, amelyek a technológia alkalmazása mellett az analóg méréseknél előfordulhatnak. Irodalomkutatásom és ipari tapasztalataim alapján feltérképeztem és rendszereztem a főbb erőforrásokkal (áramgenerátor, feszültségmérő és vezérlő) kapcsolatos követelményeket. Ezek alapján több megoldás értékelése alapján kiválasztottam ezen erőforrások véleményem szerint helyes megvalósításának módját, illetve irányát. (Nem tartottam szükségesnek a digitális vizsgálatokhoz szükséges gerjesztő és érzékelő egységek implementálását, mert azokat a peremfigyeléses rendszer már tartalmazza.) Ezek után lefektettem egy új áramköri struktúra alapjait: kidolgoztam az analóg gerjesztés és az analóg érzékelés moduljait, valamint definiáltam a vezérlő főbb funkcióit és az ezekhez szükséges utasítások és regiszterek rendszerét, majd integráltam ezeket az egységeket egy kész megoldássá. Végül feltérképeztem az alkalmazás lehetőségeit és korlátait.

Új tudományos eredménynek ebben a fejezetben azt tekintem, hogy megalkottam egy olyan integrált áramkör struktúrát, amelynek segítségével kevert jelű (de elsősorban analóg) áramköri elemek működése vizsgálható. Az integrált áramkör képes IEEE 1149.1 interfészen felprogramozva analóg gerjesztőjelek előállítására, valamint a vizsgált áramkör analóg válaszainak mérésére.

3 ANALÓG ÁRAMKÖRÖK DIGITÁLIS JELEKKEL VALÓ RÉSZLEGES VIZSGÁLATA

3.1 Analóg áramkörök gerjesztése digitális jelekkel

Az analóg áramkörök digitális jelekkel való vizsgálata nem terjedt el sem az iparban, sem a beágyazott rendszerek beépített öntesztjében. Nem tartoznak a digitális jelekkel végzett vizsgálatokhoz azok a megoldások, ahol a gerjesztés előállítását digitális információ alapján történik, de analóg jel kerül a vizsgált hálózat bemenetére, pl. egy D/A átalakító közbeiktatásával. Szintén kívül esik ezen a körön az, ha az analóg válaszjelek digitalizálása adja az analóg áramkör válaszában digitális formáját (A/D átalakítás után). Bizonyos szempontból digitális jellel való gerjesztésnek felel a nagyjelű négyszögjellel végzett vizsgálatok esetében a 0...5 V-os egységugrás jel, pl. egy erősítő felfutási meredekségének vizsgálatakor, de mivel a válasz már egyértelműen analóg jel (az információt az egységnyi idő alatt bekövetkezett feszültség változás adja, és nem feltétlenül a gerjesztés jelszintjének megfelelő tartományban), ezért digitális válaszjel-érzékelés nem alkalmazható. A következőkben megvizsgálom a feltételezeten használható új módszer létjogosultságát és alkalmazhatóságát. A fejezet további részében felhasználom korábbi publikációm. [74]

3.1.1 A megoldás létjogosultsága

A tesztelési tevékenységek sokfélesége az előnyei (a specializálódás miatti hatékony és gyors működés) mellett jelentős hátrányokkal is jár: a sokféle eszköz nem kompatibilis egymással, mindegyikük kifejlesztése, alkalmazása és üzemeltetése külön munkát vagy erőforrást felhasználást jelent. A vizsgálatok terjedelmét korlátozza az éppen rendelkezésre álló vizsgálóeszköz vagy vizsgáló technológia képessége.

Az elektronikai rendszerek digitális részegységei jól vizsgálhatók digitális peremfigyeléssel (az IEEE 1149.1 szabvány szerint). Az analóg részegységek tesztelésére a peremfigyeléses vizsgálat elve eddig közvetlen módon nem volt használható. Ezeknek a részegységeknek a teszteléséhez vagy másik technológiát kellett használni, vagy a kevert jelű peremfigyelésnek megfelelően kellett az áramkört kialakítani. Utóbbi megoldást korlátozza, hogy – mint azt korábban leírtam – a kevert jelű peremfigyelésre alkalmas áramkörök száma jelenleg csekély, a tesztvezérlőnek pedig kiterjesztett feladatokat kell ellátnia.

Véleményem szerint előnyös lenne egy olyan megoldás, amely az IEEE 1149.1 szabványt felhasználva, minimális (analóg) járulékos áramkör használatával lehetővé tenné legalább a részleges tesztelését ezeknek az áramköri egységeknek. Úgy gondolom, hogy ha kompromisszumot

kötvé jelentős mértékben engedünk a rendszerbe, az áramköri panelre, illetve az áramköri panelt alkotó alkatrészekbe integrálható, a tesztelést támogató áramköri kiegészítések adta képességek és lehetőségek oldalából, akkor más módon is elvégezhető az analóg részegységek tesztelése. Az így elvégezhető vizsgálatnál az analóg – és esetleg a digitális – tesztpontokra kellene csatlakozni a digitális ki- és bemenetekkel, amelyeken keresztül elvégezhető a vizsgálat. Ekkor a teszteléshez szükséges analóg jelek előállítására és mérésére egy, az IEEE 1149.4 szabványt megkerülő, az IEEE 1149.1 szabványra épülő, de korlátozott tesztelési lehetőségeket megvalósító megoldást kell alkalmazni. Előzetesen úgy látom, hogy parametrikus oldalról kevés, funkcionális oldalról viszont több vizsgálat lenne így elvégezhető anélkül, hogy a használt tesztelési technológián változtatni kellene, vagy másik technológiát kellene bevonni.

3.1.2 A digitális jelek felhasználhatósága analóg áramkörök tesztelésére

Az elmélet kidolgozását onnan indítottam, hogy megvizsgáltam, hogy egy egybités digitális jelből hogyan lehet analóg, elsősorban feszültség gerjesztőjelet előállítani, illetve az analóg (feszültség) jelből hogyan lehet egybités, érzékelésre alkalmas digitális jelet előállítani.

Az első feladat, a digitális-analóg jelátalakítás jelen esetben csak annyit jelent, hogy a digitális jelszinteket olyan tartományba kell áthelyezni, és olyan jellegűre kell alakítani, amely az adott analóg vizsgálatra alkalmas. Első közelítésben a következő jeltranszformációkra lehet szükség:

- a jel szintjének csökkentése (csillapítás);
- a jel szintjének növelése (erősítés);
- a DC komponens eltávolítása (AC gerjesztő jelek előállításához);
- a jel DC eltolása (offset állítás);
- a fentiek kombinációja.

Az ezekkel a transzformációkkal kapott gerjesztőjel szintén négyszögjel lesz, de a négyszögjel bizonyos transzformációk után veszíthet a jellegéből (pl. két feszültség tüskévé redukálódik a négyszögjel).

A második feladat az analóg-digitális jelátalakítás, amit megint nem a szokásos értelmezés szerint kell elképzelni. Itt a feladat az, hogy az analóg áramkör feszültség válaszelét érzékelhetővé kell tenni a digitális bemenetek számára. Ehhez a következő transzformációk lehetnek szükségesek:

- a jel szintjének növelése (erősítés);
- a jel szintjének határolása (vágás);
- a jel szintjének eltolása (offset állítás);

- 1 bites, zajmentes A/D átalakítás (komparálás hiszterézissel);
- a fentiek kombinációja.

Ezeknek a transzformációknak a hatására a változatos jelformájú és jellemzőjű analóg jelekből négyszögjelek lesznek, amelyek élei, vagy magas, illetve alacsony szinten való tartózkodásuk ideje fogja hordozni az információt.

A korábban említett, az elvből adódó kompromisszumokra két példa: egy erősítő esetében a hagyományos értelemben vett feszültségerősítést nem lehet megmérni egy adott frekvencián (annak méréséhez kisjelű, tisztán szinuszos gerjesztés kellene), de a kimeneti négyszögjel amplitúdójából lehet következtetni arra, hogy az erősítő a funkcióját betölti-e. Egy integráló áramkör időállandóját pontosan nem lehet megmérni, de egy adott idejű és amplitúdójú négyszögjel gerjesztésre adott válaszána komparálásával hozzávetőlegesen meg lehet mérni azt az időt, amennyi szükséges az áramkör kimeneti jelének, hogy elérje a komparálási szintet. Ebből az időből lehet következtetni arra, hogy az integrátor betölti-e a funkcióját.

3.2 A digitális – analóg és az analóg – digitális jelformálás

3.2.1 Feladatok és a szükséges kiegészítő áramkörök digitális – analóg irányba

A 3.1.2 alfejezetben felsorolt feladatok megvalósítására teszek javaslatot a következőkben. Áramköri funkcióban a jeltranszformációkhoz a következő megoldásokat tartom alkalmasnak:

- a jel szintjének csökkentése és növelése: erősítő, amelynek erősítése beállítható egységnyi, egységnyinél kisebb, és egységnyinél nagyobb értékre is. Bár a csillapítás és az erősítés nélküli jeltranszformáció megoldható passzív osztóval is, de az aktív megoldásnak megvan az az előnye, hogy a kimeneti ellenállása elhanyagolható, tehát jó minőségű feszültséggenerátoros meghajtást kaphatnak a gerjesztett bemenetek.
- DC komponens eltávolítása: AC erősítő, a fenti képességekkel és megfontolások miatt. A DC komponens leválasztása egy soros kapacitással, vagy beiktatott C-R taggal is megoldható egyszerűbb esetekben. A négyszögjel szintjeit ilyen módon csak korlátozottan lehet átvinni (tetőesés), sőt magas törésponti frekvencia (erősítőnél) vagy kis értékű kapacitások esetén (soros C, vagy C-R tag) lényegében csak az élék átvitele történik meg. Ez nem feltétlenül jelent hátrányt, ahogyan azt a később olvasható esettanulmányban bemutatom.
- DC eltolás: összeadó, amely a négyszögjelhez (akár előzetes erősítés, csillapítás vagy DC komponens eltávolítás után) DC komponenszt képes adni. Erre szükség lehet akkor is, amikor negatív irányba kell eltolni negatív gerjesztés érdekében a jelszintet.

A fenti funkciók és áramköri megvalósítások kombinálhatóak, „recept” erre nincs, legfeljebb egy javaslat lista dolgozható ki, amitől területi okokból most eltekintek.

3.2.2 Feladatok és a szükséges kiegészítő áramkörök analóg – digitális irányba

A 3.1.2 alfejezetben már felsorolt feladatok megvalósítására teszek itt is javaslatot a következőkben.

Áramköri funkcióban a jeltranszformációkhoz a következő megoldásokat tartom alkalmasnak:

- a jel szintjének csökkentése és növelése: erősítő, amelynek erősítése beállítható egységnyi, egységnyinél kisebb, és egységnyinél nagyobb értékre is. Bár a csillapítás és az erősítés nélküli jeltranszformáció megoldható passzív osztóval is, de az aktív megoldásnak megvan az az előnye, hogy nem terheli jelentős mértékben az analóg kimeneteket.
- DC eltolás: összeadó, amely a válaszjelhez (akár előzetes erősítés, csillapítás után) DC komponenst képes adni. Erre szükség lehet akkor is, amikor negatív irányba kell eltolni negatív gerjesztés érdekében a jelszintet.
- 1 bites, zajmentes A/D átalakítás: hiszterézises komparátor. Ha a válasz (vagy az előző funkciók valamelyikével módosított válasz) négyszög jellegű, akkor nem szükséges komparálás funkció, különben igen. A hiszterézis azért szükséges, mert ha az érzékelt jel zajos, vagy nem elég meredek a komparálási szint közelében az emelkedése, akkor a komparátor kimenete billeghet, és hamis jelet érzékelhetünk.

Ugyanaz elmondható itt is, mint a gerjesztésnél: a fenti funkciók és áramköri megvalósítások kombinálhatóak, „recept” erre nincs, legfeljebb egy javaslat lista dolgozható ki, amitől területi okokból most eltekintek.

3.3 A vezérlés gerjesztés és érzékelés esetén

A vizsgálandó analóg áramkört és a hozzá tartozó járulékos elemeket logikai hálózati klaszternek (cluster) tekintem. A klaszter, mint korábban említettem, olyan logikai áramköri részlet, amely nem tartalmaz peremfigyelésre alkalmas integrált áramköröket, de csatlakozik olyan hálózathoz, amelyben vannak ilyenek [75]. Annál kedvezőbben vizsgálható egy-egy ilyen klaszter, minél több bemenete vezérelhető peremfigyeléses cellákról, és minél több kimenete érzékelhető ilyenekkel. A feladat tehát:

- tesztvektorok definiálása és azok kiadása a klaszter bemeneteire a peremfigyeléssel rendelkező áramkörökön keresztül;
- ezek után a klaszter válaszána érzékelése és azok beolvasása peremfigyeléses áramkörökön keresztül;
- végül a beolvasott válaszok kiértékelése, azaz összehasonlítása a várt (helyes) válaszokkal.

A rendelkezésemre álló JTAG Provision rendszerben a tesztvektorok definiálására és az elvárt válaszok leírására a Signal Definition File (.sdf), és a Signal Level File (.slf) szolgál.

A jeldefiniálás az „.sdf” kiterjesztésű szöveges állományban tehető meg. Itt adható meg a jelek fizikai helye (tesztelt panel. teszter), a jel neve, a teszteredményt tartalmazó táblázatban elfoglalt oszlopa és a jel jellege (be/kimenet). A fájlban „#” karakter után megjegyzés helyezhető el.

A gerjesztéseket és a válaszokat az „.slf” kiterjesztésű szöveges állományban definiálhatjuk. A fájlban a jeleket definiáló („.sdf”) fájlnak megfelelő sorrendben, 1-től induló számozású sorokban adhatjuk meg a jelek értékét. Gerjesztésnél logikai 0 esetén „D” (Down), logikai 1 esetén „U” (Up) karaktert kell elhelyezni az adott sor megfelelő oszlopban. A válaszok esetén, abban az esetben, ha alacsony szintet várunk „L” (Low), ha magas szintet várunk „H” (High) karaktert kell írni. Ha nem kell figyelni az adott ciklusban egy válaszelet (például nem számít a jelszintje), akkor ezt egy „X” karakterrel jelezhetjük.

Maga az elv több gyártó peremfigyeléses klaszter tesztet lehetővé tevő rendszerében igen hasonló, bár a szintaktikában vannak különbségek. A fenti két fájl és az áramkör, valamint az alkatrészek modellje alapján már legenerálható a teszteléshez szükséges állomány. Ez az állomány természetesen más úton is létrehozható, itt csak az elvet szerettem volna szemléltetni, és a következő esettanulmányt megalapozni.

3.4 Esettanulmány – Egy ADSL DSLAM erősítő fokozatainak vizsgálata

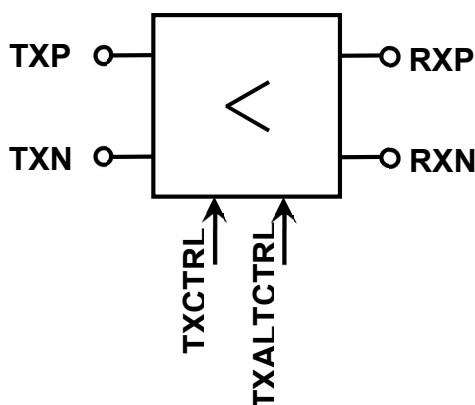
Előre bocsátom, hogy az esettanulmány nem beépített öntesztet mutat be, hanem egy gyártás végén elvégzett ellenőrzést, de az elv alkalmazható a fent leírtak figyelembe vételével beépített öntesztel való vizsgálatban is. Az esettanulmány publikációban is megjelent. [76]

A vizsgálandó objektum egy magyarországi bérnyártó cég által gyártott, Alcatel tervezésű DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) volt. A feladat biztosítani azt, hogy a 24 csatornás ADSL DSLAM végellenőrzésénél ne csak a digitális áramkörök peremfigyeléses vizsgálatát lehessen elvégezni, hanem az analóg áramkörök bizonyos szintű funkcionális ellenőrzését is. A feladathoz a JTAG Technologies cég JT3710/USB TAP vezérlőjét és ProVision szoftverét használtuk. A JT3710/USB vezérlő (31. ábra) USB porton kapcsolódik a számítógéphez és képes egyszerre akár 4 TAP vezérlésére is. A TAP jelek 3,3/5 V logikai szintűek (azaz a meghajtás 3,3 V, de a bemenetek az 5 V feszültséget is elviselik), az általa előállított tesztelő órajel (TCK) 100 kHz-től 25 MHz-ig állítható. Képes FLASH-programozásra, ehhez előállítja az AW (AutoWrite) jelet, valamint 32 Mbyte belső memóriával rendelkezik [77]. A ProVision program segítségével peremfigyeléses alkalmazások hozhatóak létre, szerkeszthetőek, és a mérési eredmények megjeleníthetőek, kiértékelhetőek.



31. ábra – A JT3710/USB TAP vezérlő⁵³

A vizsgálandó kapcsolás első (nulladik) csatornájának blokkvázlatát a 32. ábra mutatja. A TXCTRL0 és TXALTCTRL0 bemenetek a fokozat nagyáramú kimenettel rendelkező műveleti erősítőjének teljesítmény-felvételét befolyásoló vezérlőjelei, amelyek a panelen lévő FPGA-tól érkeznek. Hatásukra a műveleti erősítő a kikapcsolt állapottól (Power Down mód) a teljes kimeneti áramú üzemmódig négy teljesítmény-felvételű üzemmódban működtethető. Ezek a pontok a tesztelés során kívülről nem érhetőek el, a megfelelő kombinációt (TXCTRL0=0, TXALTCTRL=1) a vezérlő FPGA megfelelő lábainak 0, illetve 1 állapotba állításával lehet beállítani. Az FPGA természetesen a panel számos peremfigyelési hurka közül az egyikben megtalálható, így ezeknek a kimeneteknek a beállítása nem okoz problémát: a vezérlő lábához tartozó peremfigyelő cellákat úgy kell vezérelni, hogy a tesztelés idejére a fenti vezérlést biztosítsák.



32. ábra – Az ADSL központ egy csatornájának erősítőfokozata⁵⁴

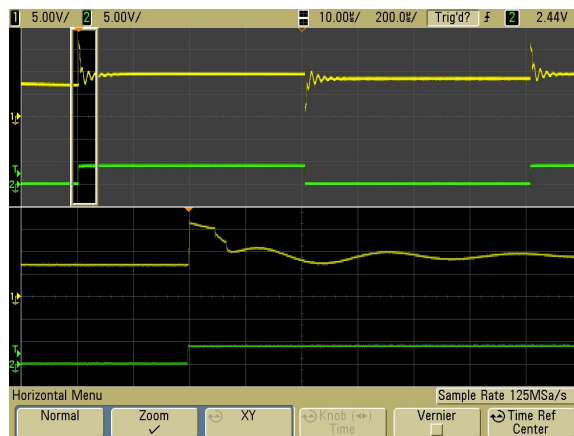
A TXP0 és TXN0 a fokozat bemeneti, az RXP0 és RXN0 pedig a kimeneti jelei. A „P” és „N” jelölések utalnak arra, hogy szimmetrikus fokozatról van szó. A fokozat normál üzemben egy csúcstól-csúcsig 10...50 mV bemenő jelet 500 mV amplitúdójúra erősít. A be- és kimenetek AC-csatolásúak.

Mivel a digitális peremfigyeléses teszteléssel csak digitális jelek állíthatóak elő, ezért a rendelkezésre álló, a tesztelés során felhasználható „analóg” bemeneti jelek készlete a logikai szinteknek megfelelő DC szintekre (0/3,3 V) és az ezzel azonos jelszinteken létrehozott impulzusokra korlátozódott. A DC

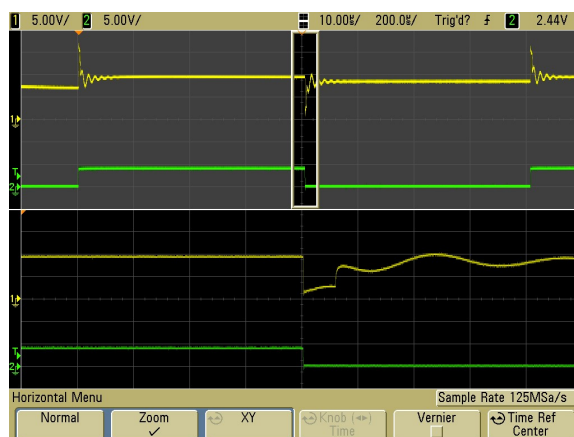
⁵³ Készítette a szerző

⁵⁴ Szerkesztette a szerző

szintek az erősítő fokozat AC csatolása miatt nem használhatóak, tehát a vizsgálatot az 0/3,3 V impulzusok segítségével kellett elvégezni. Tesztpontként hozzáférhetőek a bemeneti csatoló kondenzátorok utáni belső áramköri pontok, ezeket lehetett használni a gerjesztéshez. Ide egy-egy 2,2 μF értékű kondenzátoron csatoltam a bemeneti jeleket, amelyeket TAP vezérlőre csatlakozó integrált áramkörök egy-egy peremfigyelő cellájával állítottam elő. Kimenatként az erősítőfokozat kimeneteit használtam, megfelelő jelformálás után ide is egy-egy peremfigyelő cella kapcsolódik. A bemenetre adott 0/3,3 V négyzetjelre adott választ a 33. ábra (felfutó él) és a 34. ábra (lefutó él) mutatja. Az alsó (zöld) jel a bemenet, a felső (sárga) jel pedig a kimenet. (Mindkét ábra ugyanazt a jelfelvételt mutatja, csak a nagyítás egyszer a felfutó, egyszer pedig a lefutó élre van állítva.)



33. ábra - Az erősítő felfutó élre adott válasza⁵⁵



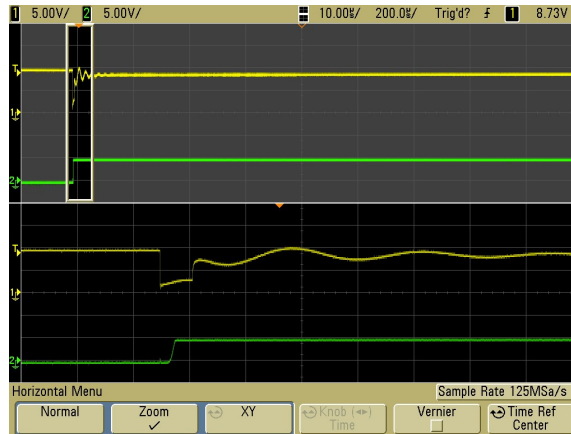
34. ábra – Az erősítő lefutó élre adott válasza⁵⁶

A kimeneten, hogy az erősítő kimeneti jelét digitalizáljuk, egy komparátort alkalmaztam. A komparátornak kettős feladata van: a kimeneti jelről el kell távolítani a zavaró összetevőket (zaj és

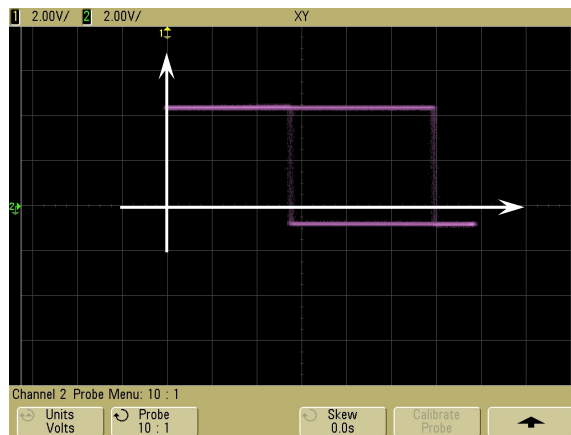
⁵⁵ Készítette a szerző

⁵⁶ Készítette a szerző

lengések), valamint a jelszintet a logikai jelek szintjére kell beállítani. Az erősítő kimeneti jelét (33. ábra, 34. ábra) megvizsgálva látható, hogy egy körülbelül 8,5 V DC szinten $\pm 1,5$ V változást kell detektálni, úgy, hogy a szintváltás utáni első lengés amplitúdója eléri az előző állapot szintjét. Az elkészült komparátor bemeneti (sárga) és kimeneti (zöld) jeleit a 35. ábra, transzfer karakterisztikáját a 36. ábra mutatja.



35. ábra – A komparátor be- és kimeneti jelei⁵⁷

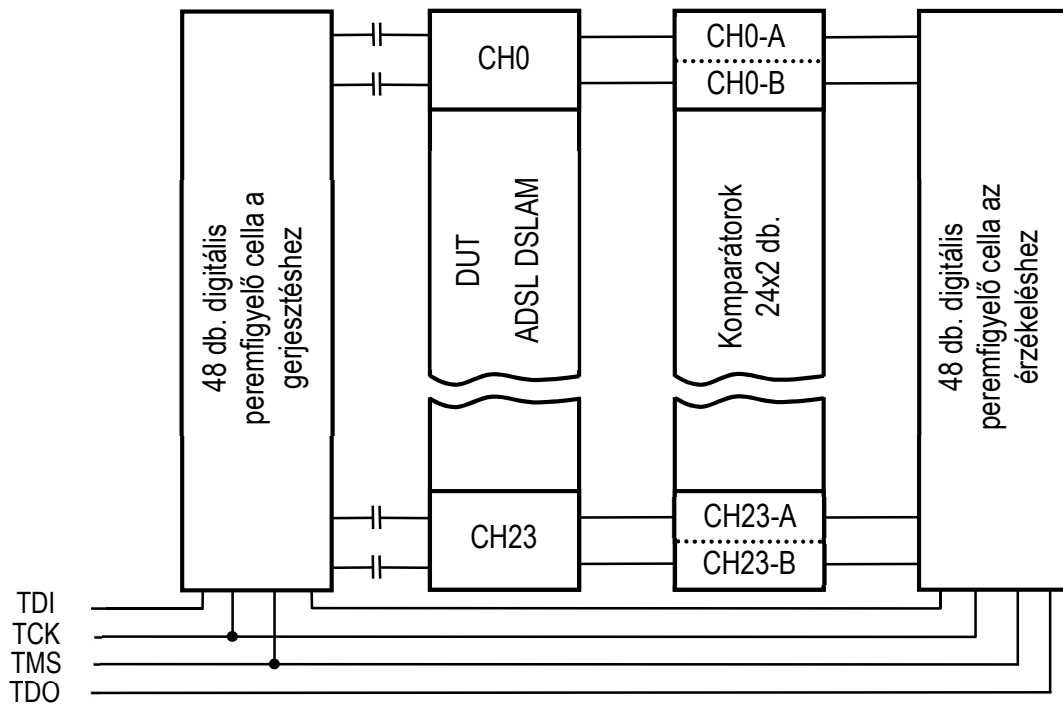


36. ábra – A komparátor transzfer karakterisztikája⁵⁸

A komparátorok jelét peremfigyeléses busz meghajtók fogadják (típusuk: SN74ABT18502 [78] és SN74ABT18504 [79]), amelyek alapfunkciójának természetesen jelen esetben nincs jelentősége. Számomra a viszonylag kis tokozásban található nagyszámú peremfigyelő cella fontos, ezeken keresztül végezhető el a vizsgálandó analóg fokozatok vezérlése, illetve a komparátorok jelének visszaolvasása. A busz meghajtók egy külön peremfigyeléses hurkot alkotnak, amely a peremfigyelés vezérlő egy szabad TAP-jára csatlakoztatható. A teszter blokkvázlatát a 37. ábra mutatja.

⁵⁷ Készítette a szerző

⁵⁸ Készítette a szerző



37. ábra – A teszter blokkvázlata ⁵⁹

A tesztelendő analóg erősítőket (és a hozzájuk kapcsolódó komparátorokat) peremfigyeléssel nem rendelkező, de a tesztelésbe bevonni kívánt áramkörként, úgynevezett „cluster”-ként kezeltem. Az ilyen áramkörök tesztelésére biztosítja a ProVision a Cluster Test lehetőséget. A Cluster Test-hez definiálni kell a vizsgálathoz felhasznált jeleket. Ezek jelen esetben fizikailag két helyen találhatóak: a TXCTRL0 és TXALTCTRL0 a vizsgálandó panelen, a szimmetrikus bemenetek (TXP0, TXN0) és a szimmetrikus kimenetek (RXP0, RXN0) pedig a teszteren. Az első csatorna jeleinek definiálása az alábbiak szerint történt.

```
#ADSL Analog Front End Channel 0
SDFVERSION "2.0"

"3ec-40137-daaa_1"    "TXCTRL0"    1    |
"3ec-40137-daaa_1"    "TXALTCTRL0" 2    |
"PF2152_1"           "HR0"        3    |    # TXP0
"PF2152_1"           "HR1"        4    |    # TXN0
"PF2152_1"           "RH0"        5    O    # RXN0
"PF2152_1"           "RH1"        6    O    # RXP0
```

38. ábra – Az első csatorna jeleinek definiálása⁶⁰

⁵⁹ Szerkesztette a szerző

⁶⁰ Szerkesztette a szerző

A jelek definiálása után meg kell adni, hogy egy-egy tesztelési ciklusban milyen gerjesztéseket kell az áramkörre adni, illetve milyen válaszokat várunk. Az előzőekben leírtak alapján értelmezhető az alábbi fájl, amely az első analóg csatorna tesztelését végzi el, egymás után kétszer.

```
#ADSL Analog Front End Channel 0
1      DUUDXX
2      DUUDLH
3      DUDUXX
4      DUDUHL
5      DUUDXX
6      DUUDLH
7      DUDUXX
8      DUDUHL
```

39. ábra – Az első analóg csatorna vizsgálata⁶¹

A fájl 1. és 2. számú sorában ugyanazt a gerjesztést alkalmazzuk: a TXCTRL0 vonalra D, a TXALTCTRL0 vonalra U, a TXN0 bemenetre D, a TXP0 bemenetre pedig U vezérlést adunk. Az 1. sorban nem várunk határozott állapotot az RXN0 és RXP0 kimeneteken, megvárjuk az állandósult állapotot, és csak a következő ciklusban (2. sor) vizsgáljuk, hogy megjelennek-e a várt szintek (L és H). Ezután megfordítjuk a vezérlést a bemeneteken, és újra elvégezzük a vizsgálatot (3. és 4. sor), majd az előző tevékenységeket még egyszer megismételjük. A lefuttatott teszt eredményét a 40. ábra mutatja. A 6. oszlopban (RH1_Pf2152_1) a pirossal jelölt helyeken hiba van, azaz a tesztelés során kapott eredmény nem egyezik meg a várttal. Ennek oka, hogy szándékosan, hibagenerálás céljával megszakítottam az RXP0 kimenet és a hozzá tartozó komparátor között a kapcsolatot.

3.4.1 A megoldás értékelése az esettanulmány alapján

A megoldásom az esettanulmány (konkrét ipari projekt) alapján alkalmas az analóg áramköri egységek részleges tesztelésére digitális gerjesztés és érzékelés felhasználásával úgy, hogy illesztő áramköröket is szükséges felhasználnunk a rendszer kiépítésében. A módszer analóg impulzustechnikai áramköri egységeken került tesztelésre. Az esettanulmányban korlátozott szintű funkcionális vizsgálatot végeztem. A módszer működőképessége bizonyított (a termék tesztelése a gyártmány kifutásáig ezzel történt, és a gyártó cég nem jelzett vissza sem fals negatív sem fals pozitív hibát). A módszer segítségével nem minden analóg funkcionális egység vizsgálata valósítható meg, vagy az alkalmazása nem ad elegendő információt bizonyos esetekben. A javasolt megoldásom alkalmazhatóságával kapcsolatban további kutatásokat kell végezni.

⁶¹ Szerkesztette a szerző

		RH1_Pf2152_1	RH0_Pf2152_1	HR1_Pf2152_1	HR0_Pf2152_1	TXALCTRL0_3ec-40137-daaa_1	TXCTRL0_3ec-40137-daaa_1
Nets / Vectors	1	L	H	H	L	X	X
	2	L	H	H	L	0	0
	3	L	H	L	H	X	X
	4	L	H	L	H	1	0
	5	L	H	H	L	X	X
	6	L	H	H	L	0	0
	7	L	H	L	H	X	X
	8	L	H	L	H	1	0

40. ábra – Az első csatorna tesztjének eredménye⁶²

3.5 Összegzés

Általánosan megfogalmazható, hogy egy elektronikai gyártmány esetében cél az áramkörök minél nagyobb hányadának bevonása a tesztelésbe. A javasolt, de már ipari alkalmazásban bizonyított megoldással ez a cél teljesíthető, mert az analóg egységek költséghatékony tesztelésére ad lehetőséget. Értelemszerűen az ár alacsony értéken tartása kompromisszumokkal jár: a módszer segítségével nem minden analóg funkcionális egység vizsgálata valósítható meg kellő mélységben. Fontos előnye a megoldásnak, hogy minimális számú kiegészítő egység szükséges a megvalósításához, a szükséges áramkörök nagy része megtalálható a célrendszer integrált áramköreiben. A módszer leginkább impulzustechnikai áramkörök funkcionális vizsgálatára, azok alapfunkcióinak ellenőrzésére használható. Előnyként megfogalmazható, hogy a gerjesztéshez és az érzékeléshez meglévő infrastruktúrát és meglévő gerjesztést és érzékelést leíró nyelvet használók az elvben. Hátrányként említhető, hogy a két „világot” (analóg és digitális) összekötő áramköri egységek szükségesek a teszteléshez, de ezek nem járnak jelentős költséggel.

Új tudományos eredményként azt a kidolgozott vizsgálati elvet és módszert tekintem, amely alkalmas a kevert jelű rendszerek analóg egységeinek digitális gerjesztéssel és érzékeléssel való mérésére úgy, hogy a gerjesztési és érzékelési célra meglévő IEEE 1149.1 infrastruktúrát használhatunk egyszerű analóg-digitális interfész áramkörökkel kiegészítve.

⁶² Képkivágás a ProVision tesztelési eredményt mutató táblázatából, készítette a szerző

4 KRITIKUS BEÁGYAZOTT RENDSZEREK MŰKÖDÉSÉNEK KÖVETÉSE ÉS MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK NÖVELÉSE ÖNTESZT ALKALMAZÁSÁVAL

4.1 A beágyazott rendszerekre jellemző meghibásodások

Mint korábban már leírtam, a beágyazott rendszerek meghibásodásai vagy a hardverben keletkeznek, vagy szoftver/firmware okokra vezethetőek vissza. A szoftver/firmware aspektussal dolgozatomban nem foglalkozok, így a következőkben csak a hardver meghibásodásokat elemzem. (Meg kell jegyezni, hogy a hardveres hibák detektálása természetesen a működtető (teszt)program nélkül nem lehetséges.) Irodalomkutatásom és ipari tapasztalatom alapján a beágyazott rendszerek hardver meghibásodásai előfordulási hely szerint négy csoportra bonthatóak [80]:

- vezérlő meghibásodása;
- memória meghibásodása;
- periféria egységek meghibásodása;
- tápfeszültség ellátás meghibásodása.

A vezérlő meghibásodása alatt azt értjük, hogy a beágyazott rendszer vezérlője (processzor, mikrovezérlő, FPGA...) nem képes maradéktalanul ellátni a feladatát. A meghibásodása lehet teljes, vagy részleges. A teljes meghibásodás (működésképtelenség) nyilvánvaló, ilyenkor legfeljebb az egység kiesését lehet detektálni, a hibák és pontos (vezérlőn belüli) hibahely behatárolása lehetetlen. A részleges meghibásodás esetén a vezérlő hibás vezérlőjeleket ad ki, hibás bemeneti jeleket érzékel, vagy hibásan végzi el a műveleteket. Ilyenkor van lehetőség a hibák és hibahely behatárolására, bár ennek inkább utólagos szerepe van, célja lehet a gyártástechnológia vagy a tervezési hibák javítása.

A vezérlő akár teljes, akár részleges meghibásodása a mai gyártási technológia mellett kis valószínűségű, és általában másik egység meghibásodása (pl. tápegység) vagy külső hatás (pl. mechanikai hatás, elektromos hatás) okozza. Komoly kihívás a vezérlő meghibásodásának kiderítése, mert a rendszer létfontosságú eleme, minden vezérlésben részt vesz, így az öntesztben is. A kritikus beágyazott rendszerek esetében a vezérlő meghibásodásának detektálását könnyíti, hogy gyakran használnak többmagos processzorokat, illetve legtöbbször redundáns egységek is találhatóak a rendszerben, így több mag vagy több vezérlő működése szoftver és hardver eszközökkel összehasonlítható. [81] [82]

A beágyazott rendszerekben a memória kapacitása az elmúlt években folyamatosan nőtt. Míg 15 éve ezekben a rendszerekben a jellemző memóriaméret a kilobájtos tartományban mozgott, addig a mai egyszerűbb rendszerek is több megabájtos memóriamérettel jellemezhetők, és nem ritka a több gigabájtos memóriakapacitás. A gyártástechnológia fejlődése miatt ez a hatalmas kapacitás növekedés nem okozta a meghibásodás gyakoriságának növekedését, mert a hibás cellák (és így chippek) kiszűrése már tokozatlan állapotban megtörténik. A memóriák esetében elsősorban a tranziens hibák felbukkanásával kell foglalkozni, ez azonban szoftver eszközökkel szinte lehetetlen, hardver eszközökkel pedig magas hibalefedettség gazdaságosan nem megvalósítható. Az alkalmazott módszerek közé tartozik a bekapcsolási önteszt, illetve az ellenőrző összegek alkalmazása.

A periféria eszközök közé tartozik minden digitális és kevert jelű periféria eszköz, amelyeket a vezérlő kezel. Ezek kevésbé integráltak, mint az előző két egység, és így a különálló részegységek miatt azok meghibásodási valószínűsége nagyobb. A perifériák felmerülő hibái széles skálán mozoghatnak, és a hagyományos módon ellenőrizhetők [80].

- megszólítással (válaszol-e);
- visszahurkolással (visszaérkezik-e egy kiküldött üzenet);
- válaszidő ellenőrzéssel;
- valóság vizsgálattal (statikus, vagy túl gyorsan változó válasz vizsgálata).

Ezek a funkciók többnyire csak a digitális tartományban elérhetőek és valósíthatóak meg, a kevert jelű egységek megfelelő mélységű vizsgálata önteszt esetén nem megoldott.

A tápellátás egy elektronikai rendszer legfontosabb eleme, ennek hibátlan működése alapfeltétel a többi részegység működéséhez. A tápellátás részegységei analóg vagy kevert jelű áramköröknek tekinthetőek. A mai elektronikai rendszerek többféle tápfeszültséget igényelnek. Ezeknek a feszültségeknek a toleranciája, a tranziens-, terhelés- és hőmérséklet-stabilitása, a váltakozó feszültségű és áramú, valamint sugárzott zaja mind olyan jellemzők, amelyek befolyásolhatják egy beágyazott rendszer biztonságos működését.

Ennek, az irodalomkutatásomat összegző alfejezetnek a végén a következő következtetéseket vontam le:

- A vezérlő és memória öntesztbe vonása nagyrészt integrált áramkör tervezési és szoftveres feladat, és jól működő megoldások vannak rá.

- A perifériák és a tápegység esetében az öntesztbe vonás külső, kiegészítő elemekkel oldható meg, amelyeknek integrálhatónak kell lennie egy komplex öntesztet végezni képes rendszerbe. Ez a terület csak részlegesen megoldott.

A fő ok, hogy ez a két részegység-csoport kevésbé integrált, és nem tisztán digitális elemekből áll. A következőkben egy olyan elméleti megoldást mutatok be, amely véleményem szerint megfelelő választ a fenti problémára.

4.2 A naplózás, az öntesztelés és a működés követésének jelentősége

Ez a fejezet korábbi publikációm [83] felhasználásával készült. Az értekezésemben ezt kibővíttem az azóta kialakult újabb javaslataimmal, valamint a korábban leírtakat pontosítom.

A kritikus beágyazott rendszerek elemeitől (továbbiakban: a célegységek) elvárt megbízhatóság elérése és az események utólagos (post-mortem) felderítésének elősegítése érdekében kiegészítő elemek alkalmazása szükséges. [84] Tehát, ha a célegységek a biztonságkritikus (döntéshozó) egységeken kívül tartalmaznak olyan járulékos elemeket is, amelyek megvalósítják a következő kiegészítő tevékenységeket:

- az események naplózása
- öntesztelés (rendszeresen, ill. külső parancs hatására)

akkor ezek az elemek növelik a rendszer működésének átláthatóságát és eredő biztonságát. A kialakításnak olyannak kell lennie, hogy ezen kiegészítő elemek működésükkel, illetve meghibásodásuk esetén nem befolyásolhatják a döntéshozó egységek biztonságos működését.

4.2.1 A naplózó rendszerrel szemben támasztott követelmények

A kiegészítő elemeknek gyűjtenie, tárolnia és külső kérésre a fogadó számára alkalmas formában kibocsátja a következő információkat (eseményeket):

- a célegységek információs peremfelületére érkező analóg vagy digitális jeleket, parancsokat, állapotjelzéseket és üzeneteket az eredeti (kódolatlan, esetleg hibás/sérült) formájukban;
- a célegységek által hozott döntések hatására létrejövő, a célegységből kiküldött analóg vagy digitális jeleket, parancsokat, állapotjelzéseket és üzeneteket, a megvalósult formájukban és paramétereikkel (jelszint, időtartam);
- a kezelőszerveken keresztüli beavatkozásokat, konfigurálási tevékenységeket;
- a célegységek tápellátásában, hőmérsékletében, ill. egyéb környezeti körülményeiben (páratartalom, rázkódás, stb.) bekövetkező lényeges változásokat;
- az önellenőrző (öntesztelő) rendszer tevékenységeit és döntéseit;

- az esemény-tárolókkal kapcsolatos eseményeket (olvasás, törlés).

A fenti eseményeket és információkat esemény-típusonként külön kialakított, nem felejtő memóriában kell tárolni, és biztosítani kell, hogy a benne tárolt adatok véletlen felülírása ne történhessen meg. Minden eseményhez el kell tárolni egy időbélyeget, amely megfelelő felbontással jelzi az esemény kezdetét/végét. Eseményenként meg kell fontolni ezt a felbontást. (Egy kezelőszervről, vagy egy hőmérséklet szenzorról érkező információt szükségtelen pl. 10 ms gyakorisággal mintavételezni és időbélyeggel ellátni, valamint eltárolni, itt a változások lassúak. Elegendő 50...100 ms-os, esetleg még nagyobb időköz, vagy eseményvezérelt adatgyűjtést kell alkalmazni. Ugyanakkor egy mikroprocesszorból kilépő végrehajtó jelnél szükséges lehet μ s nagyságrendű, vagy akár sűrűbb felbontású tárolás is.) Az időbélyeg létrehozására egy valós idejű órát érdemes alkalmazni, így az események abszolút és relatív időpontja is meghatározható a későbbiekben, valamint az egymáshoz való időbeliségük is elemezhető. Ha az eseménytároló mérete megfelelően nagy, lehetőség nyílik az egységes, a szükséges legsűrűbb felbontással való tárolásra. A tárolt események elavulása után azok felülírhatóak, tehát cirkuláris memóriaszervezés használható. Az adatok elavulási idejének meghatározásánál körültekintően kell eljárni, mert egy-egy esemény akár sok idővel később is hatással lehet a működésre.

A kiegészítő elemeknek lehetővé kell tenniük a működési hierarchiában felettük álló egység részére, valamint egy speciális interfészen keresztül hozzá csatlakozó külső (leolvasó) készülék részére az esemény-memóriákban tárolt információk olvasását. Az esemény-memóriák tartalmának parancs útján való törlésének eseményét szintén naplózni kell, ezek az események azonban nem lehetnek egyszerűen törölhetőek. A véletlen törlésüket csak magasabb rendű felhasználó végezheti. Az ilyen jellegű eseményeket külön, védett memóriaterületen érdemes tárolni.

4.2.2 Az önteszteléshez szükséges kiegészítő rendszerrel szemben támasztott követelmények

A kiegészítő elemeknek kell a beépített önteszt tevékenységek teljes körét ellátnia. Az elemek alkotta rendszernek alkalmasnak kell lennie arra, hogy:

- helyettesítsék az analóg és digitális információs peremfelületeken a normál üzemmódban várható jeleket, üzeneteket, parancsokat, kezelői beavatkozásokat előre meghatározott vizsgálati eseményekkel/jelekkel;
- regisztrálják azt, hogy milyen eseményekkel/jelekkel és mekkora időközességgel válaszol a vizsgálati eseményekre a döntéshozó egység;

- össze kell hasonlítani a vizsgált rendszer válaszait a helyes (számított, vagy hibátlan egység működése közben felvett) válaszokkal, és döntenie kell, hogy azok a megengedett hibahatáron belül rendben vannak-e.

A vizsgálati események/jelekre adott válasz események nem jutnak ki a cél-egységből, ezek helyességének megállapítását és memóriában tárolását követően helyreáll a célegység normál üzemmódja, illetve szükség esetén hibaüzenet küldésére kerül sor a hierarchiában felette álló egység felé.

Az önellenőrzési időköz nagysága széles határok között változhat. Az időköz, és a normál üzem szünetelésének feltétele minden rendszernél megfontolás tárgya. Az önellenőrzés kezdeményezhető:

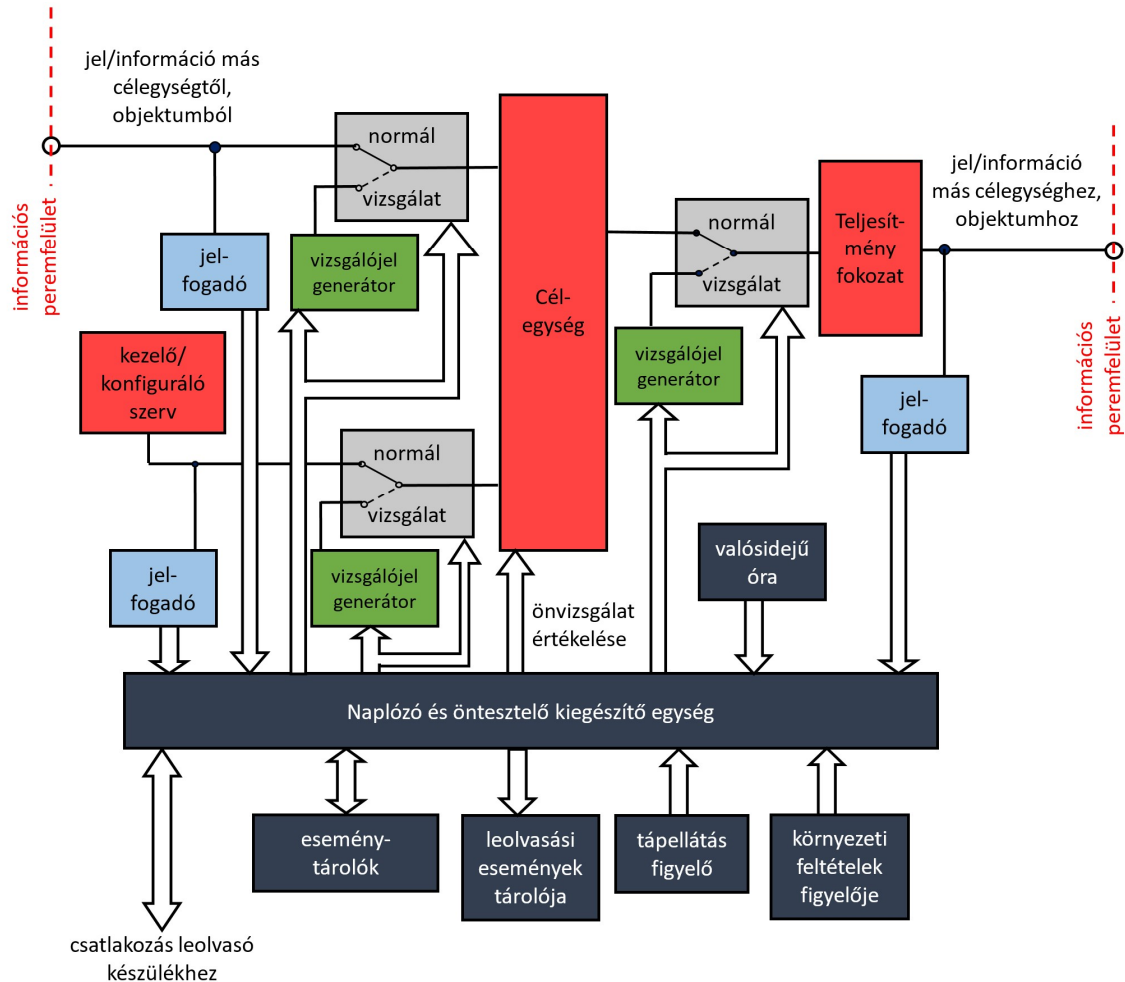
- a rendszer tápellátás alá helyezésekor;
- rendszeres időközökben, feltéve, hogy ebben az időszakban nincs igény a normál üzembeli működésre. Ez a vizsgált rendszer üzemszünetében, vagy redundáns rendszerekben a tartalékol rendszer esetében teljesül. (A redundáns rendszerekben az aktív és tartalék egységek közötti váltással megvalósítható az összes egység vizsgálata);
- a hierarchiában felette álló egység parancsával;
- kezelői beavatkozással.

Az önellenőrzés kezdeményezőjének azonosítója, kezdetének és befejezésének időpontja, kiértékelésének eredménye és az esetleges hibaüzenet ténye nem törlődő memóriában tárolandó. A feltételek a törléshez azonosak, azzal, amit az előző alfejezet végén összefoglaltam.

4.3 A kiegészítő naplózó és önellenőrzést végző rendszer javasolt kialakítása

4.3.1 Strukturális kialakítás

A javasolt rendszer vázlatos strukturális kialakítását az alábbi ábra mutatja.



41. ábra - A célkészülék valamint a naplózó és öntesztelést végző kiegészítő egységek kapcsolata⁶³

A fenti ábra a kritikus beágyazott rendszer – célegység –, valamint az eseményeket naplózó és az öntesztelést végző kiegészítő elemek vázlatos kapcsolatát mutatja. Az ábrán szereplő egységek:

- a célkészülék blokkjai (piros);
- normál üzemben és vizsgálat közben szükséges jelátvitelt (jelkapcsolást) *analóg és/vagy digitális kapcsolók* valósítják meg (szürke);
- a *vizsgálójel generátorok* (az önteszthez szükséges jeleket állítják elő) (zöld);

⁶³ Szerkesztette a szerző

- a naplózó és önellenőrző egység felé a célkészülék bemeneteiről és kimeneteiről a vizsgálandó jeleket *jelfogadók* közvetítik (világoskék). Ezek elsődleges feladata a szintillesztés, védelem, és az esetleges galvanikus leválasztás;
- a *naplózó és önellenőrző egység*, valamint a hozzá tartozó elemek (memóriák, RTC, környezeti szenzorok) adják a kiegészítő elemek intelligenciáját (sötétkék).

Az egyvonalas kapcsolatok analóg/digitális jeleket, a nyilak információ-áramlást szimbolizálnak.

Az itt vázolt elvi elrendezés, valamint a leírt elv megvalósításához és a követelmények teljesítéséhez több ponton alkalmazható a peremfigyeléses vizsgálat, valamint a korábbi fejezetben tárgyalt analóg áramkörök beépített öntesztbe vonását támogató integrált áramkör.

4.3.1.1 A vizsgált rendszerre hatás minimalizálásának elvei és megoldásai

Magát a tesztelő rendszert hasonló elvek mentén kell megtervezni, mint a vizsgált, biztonságkritikus beágyazott rendszert. Ezen felül, a tesztelő rendszert úgy kell kialakítani, hogy esetleges meghibásodásai ne befolyásolják a készülék/rendszer normális működését. Ebből a szempontból kritikusak a kapcsoló és a jelfogadó egységek, mert ezek közvetlenül az analóg vagy digitális jelekhez kapcsolódnak. Ugyancsak kritikus a naplózó és öntesztelő egység, amely a kapcsolókat vezérli. A többi egységnél a célegységre hatás táphálózat útján (pl. rövidzár vagy túlterhelés hatására a célegység tápfeszültsége leesik) vagy elektromágneses zavarással (vezetett vagy sugárzott) jöhet létre. Ez előbbiekre külön tápegység adhat megoldást, az utóbbiak ellen pedig EMC-re tervezéssel (szokásos, bevált és korszerű tervezési megoldások (state of the art) alkalmazása, szabványok betartása, önzavarás kizárása) védekezhetünk.

A jelfogadó egységek esetén nagyimpedanciás csatlakozás szükséges a minimális visszahatás érdekében. Ezt megfelelően kialakított, megfelelően megválasztott, nagy megbízhatóságú alkatrészekből felépített aktív, analóg vagy digitális bufferekkel vagy adott esetben (ha megengedhető) a jelútba sorosan kötött, nagyértékű ellenállással valósítható meg.

A kapcsolók esetén nagy megbízhatóságú, és megfelelő paraméterekkel (pl. bekapcsolt ellenállás, szigetelési ellenállás, áthallás, szivárgóáramok) rendelkező alkatrészeket kell használni. A kapcsolástechnikában legalább az egyszeres hibára kell tervezni, azaz egy alkatrész hibája még nem befolyásolhatja a kapcsoló működését olyan mértékben, hogy az észrevehető legyen. (Ugyanakkor ezt a meghibásodást tudnia kell a kapcsolónak detektálnia és jelentenie.)

Általánosságban elmondható, hogy a minimális ráhatást több, egymásra épülő és egymásra ható szinten végzett tervezési munka határozza meg:

- az alkatrész-választás;
- az áramköri tervezés;
- az elektronika kiviteli technológia;
- a készülék mechanikai konstrukciója és kivitelezése;
- a beágyazott program kialakítása;
- a kommunikáció külső készülékekkel/rendszerrel.

További, pontosabb megfontolásokat, szempontokat és követelményeket ebben a témában az elv megvalósításával párhuzamosan, illetve laboratóriumi kísérletek eredményeinek kiértékelése után lehet megfogalmazni.

4.4 Az alkalmazhatóság vizsgálata

4.4.1 A vizsgált rendszerben szükséges átalakítások a módszer alkalmazásához

A vizsgált rendszerben a járulékos részegységeket és strukturális átalakításokat a 41. ábra mutatja. Ebben az alfejezetben a járulékos részegységek kialakításával és a naplózó és öntesztelő egység firmware-jének kialakításával foglalkozok.

- A célegység elemeiben nem kell átalakításokat végezni.
- A kapcsolók váltókapcsoló funkciójúak, digitális esetben 1 bitet vagy több párhuzamos bitet, analóg esetben 1 vagy több párhuzamos analóg jelet kell átkapcsolni. Digitális jelek esetében bitenként 2:1 multiplexert, analóg jelek esetén transmission gate vagy egyéb többcsatornás analóg kapcsoló áramkör használható. Szükség esetén galvanikusan leválasztott kapcsolókat kell alkalmazni.
- A jelfogadók vagy digitális jeleket fogadnak, vagy analóg jeleket. Digitális jelek esetében szint-áttétel, analóg jelek esetében szinteltolás, csillapítás vagy erősítés lehet szükséges. Itt is szükség lehet galvanikus leválasztásra, de analóg jelek esetén meg kell fontolni, hogy van-e lehetőség A/D átalakító használatára, amelynek digitális vonalait költséghatékonyabban lehet leválasztani, mint az analóg jeleket.
- A vizsgálójel generátorok analóg vagy digitális vizsgálójeleket állítanak elő. Az analóg vizsgálójelek előállításáról a korábbi fejezetekben már volt szó, célszerűen digitális úton kell ezeket előállítani, majd D/A átalakítóval kell analóg jellé konvertálni. [85] Az esetlegesen szükséges galvanikus leválasztás így könnyen megoldható. (A vizsgálójel lehet áram, vagy feszültség, de ha egy érzékelő csatlakozik az információs peremfelületre, elképzelhető, hogy ellenállás, kapacitás, stb. vizsgálójelet kell előállítani.) Digitális jelek esetében egy vagy több bites tesztmintát kell generálni. Nem javasolt a teljes körű vizsgálat (exhaustive testing),

amikor minden lehetséges bemeneti kombinációt előállítunk, mert bizonyos bemenetszám felett nem végezhető el a tesztelés. [86] Helyette a számos, kidolgozott digitális tesztminta generálási módszerből érdemes választani: álvéletlen jellel való vizsgálat, feltételezett hibákra történő vizsgálat, stb. Ezek nem adnak 100%-os hibalefedettséget, de a jellemző hibák felfedhetőek. [87] [88]

- A naplózó és öntesztelő kiegészítő egység végzi a tesztelő rendszer elemeinek vezérlését. Elsődleges a biztonságos működés, ennek minden más szempont elé kell kerülnie. Ennek érdekében hardver oldalról a biztonságkritikus kialakítást, firmware oldalról pedig a biztonságkritikus fejlesztés lépéseit és szempontjait kell alkalmazni. [89] Funkcionális oldalról a valós idejű óra, a tárolók (memóriák), a tápellátás és környezeti feltételek felügyelő egységei kezelését kell ellátnia, valamint interfészt kell biztosítani a külső diagnosztikai eszközök felé. Emellett a korábbiakban leírt módon vezérelnie és ütemeznie kell a vizsgálójel generátorokat, a kapcsolókat, feldolgozni a jelfogadók jelét. Ennek az egységnek a feladata a tesztminták kiválasztása, és a tesztminták hatására adott válaszok összehasonlítása az eltárolt helyes válasszal. A naplózó funkcióhoz elő kell állítania az időbélyegeket, összeállítania az eltárolandó adatrekordokat. Önellenőrzéssel kell rendelkeznie, meghibásodása esetén passzíválnia kell a teszteléshez kiépített járulékos áramköröket, biztonsági állapotba kell kerülnie, és ha képes rá, akkor hibajelzést kell adnia a magasabb szintű egységek felé.

4.4.2 A kiértékelés módja

A válaszok kiértékelésénél digitális jelek esetén egyértelmű a helyzet: teljes egyezés esetén hibátlan az éppen tesztelt funkció vagy részegység, ha eltérés van, akkor hiba lépett fel. A peremfigyeléses technika alkalmazása esetén a hibás bitekből egyértelműen lehet következtetni a hiba helyére és jellegére. A hiba lehet pillanatnyi, de a pillanatnyi hibákat is naplózni kell, és jelenteni, mert később a hiba állandósulhat [90], de akár rövidebb-hosszabb idő után a teljes rendszer működésére nézve komolyabb, akár katasztrofális befolyással is lehet [91]. Az összehasonlítás eszköze egy egy- vagy több-bites komparátor [92], amely a referenciát hasonlítja össze a mért értékkel.

Analóg jelek esetén meg kell állapítani egy hibahatárt, amin belül az analóg jelet elfogadjuk, azon kívül elutasítjuk. A hibasávot mindig az adott áramköri részegység határozza meg: a hibasávot egyrészt a szélessége, másrészt a szimmetriája jellemzi. A hibasáv lehet a névleges értékre szimmetrikus vagy aszimmetrikus, és elképzelhető olyan analóg funkció, aminél egy határérték alatt vagy felett bármilyen érték megfelelő. [93]

Hosszú idejű vizsgálatoknál a digitális jelek helyes értékei jellemzően nem változnak meg, az analóg jelek viszont az öregedés hatására megváltozhatnak. [94] Előfordulhat, hogy a lassú változásokat, vagy több mért jellemző együttes, adott tendencia szerinti változását még elfogadhatónak minősítjük, azonban ha a változás gyors, vagy több jellemző nem együtt változik, akkor azt hibásnak értékeljük. A naplózó rendszer esetleges meghibásodáshoz kapcsolódó eltárolt eseményei nem csak utólagos hibafelderítésre használhatóak, hanem a hiba kategorizálása után (kezelhető hiba vagy veszélyes hiba) a vezérlő dönthet arról, hogy a rendszer használható-e korlátozott vészüzemben, vagy azonnali leállítás szükséges [14].

Azt gondolom, hogy főként az analóg jeleknél a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás fejlődése hamarosan lehetővé teszi bonyolultabb biztonságkritikus beágyazott rendszerek célzott tesztelését, illetve a begyűjtött adatok hatékonyabb kiértékelését, valamint a változási tendenciákból a várható meghibásodások pontos előrejelzését. A digitális rendszereknél ugyanezek a technológiák az automatikus, célzott tesztminta generálást támogathatják. [95] Témám szempontjából érintőlegesen ez a terület, de röviden kutattam, hogy mik a tendenciák. Mélyrehatóbb publikációt nem leltem fel ebben a témában, inkább a lehetőségek feltérképezése folyik.

4.5 Összegzés

Ebben a fejezetben a célom egy olyan naplózást és beépített öntesztelést megvalósító modell kialakítása volt, amely a vizsgált kritikus beágyazott rendszer eredő megbízhatóságát képes növelni. A két funkciót (naplózás és öntesztelés) integrált egységként tekintve helyeztem el azt egy kritikus beágyazott rendszer mellé. Megfogalmaztam a kiegészítő rendszerrel kapcsolatos követelményeket, és felépítettem a működés vázát mind a naplózás, mind az öntesztelés funkcióval kapcsolatban.

Ezek után javaslatot tettem a naplózó és önellenőrzést végző rendszer kialakítására. Blokkvázlatot készítettem, lefektettem a működési elv alapjait. Elvégeztem a javasolt kiegészítő rendszer alkalmazhatóságának vizsgálatát, és vázoltam a kiértékelés egy lehetséges módját.

Véleményem szerint sikerült megalkotni egy olyan kiegészítő rendszer modelljét, amely alkalmas kritikus beágyazott rendszerek megbízhatóságának növelésére, és a hibák okainak utólagos felderítésére. Az utólagos felderítéssel, majd az azt követő újratervezéssel a célrendszer következő, vagy javított változatának megbízhatósága növelhető.

Új tudományos eredménynek azt látom, hogy sikerült megalkotnom egy olyan naplózó és önellenőrzés végzését támogató modellt, amely két komponensének együttes használatával az üzem közbeni megbízhatóság, illetve a naplózó funkcióval rögzített adatok alapján a rendszer hibaokai azonosíthatóak, így egy későbbi változatban ezek a hibák kiküszöbölhetőek.

5 A SOROS VEKTOROS FORMÁTUM PARANCSRENDSZERÉNEK KIEGÉSZÍTÉSE ANALÓG ÁRAMKÖRI PARAMÉTEREK MÉRÉSE CÉLJAIRA

5.1 A soros vektoros formátum és jelenlegi alkalmazása

2023-ban szinte minden programozható logikai eszköz (FPGA és CPLD), de sok mikrovezérlő és FLASH memória is rendelkezik IEEE 1149.1 interfésszel. A soros vektoros formátumot (Serial Vector Format, SVF) a Texas Instruments és a Teradyne közösen fejlesztette ki. A legelterjedtebb az „E” változat (Revision E), amit 1999-ben adtak ki. Az IEEE 1149.1 szabvány használata gyorsan terjedt, és igény merült fel arra, hogy a tesztvektorokat könnyen lehessen reprezentálni és tárolni az (automatikus) tesztgeneráló szoftverekben, és egyszerűen lehessen használni a teszterekben. [96] Példának hozható a teszteléshez szükséges adatok JTAG interfészen való letöltése a tesztvezérlőről a tesztelendő áramkörbe.

5.1.1 A soros vektoros formátum specifikációja, parancsrendszere

A tovább lépéshez röviden szükséges ismertetnem a soros vektoros formátum specifikációját. A specifikáció gyártófüggetlen, magas szintű IEEE 1149.1 buszműveleteket ad meg, amelyek általában léptetési műveletekből és az IEEE 1149.1-ben rögzített, a működést leíró állapotdiagram stabil állapotai közötti lépkedésből állnak. Az SVF fájl

- szöveges (ASCII) formátumú fájl, amely SVF utasítások halmazából áll;
- egy sorban legfeljebb 256 karakter lehet, de egy SVF utasítás (statement) többsoros is lehet;
- minden utasítás egy parancsból és a hozzá tartozó paraméterekből áll;
- minden SVF utasítás pontosvesszővel zárul;
- az SVF nem érzékeny a nagy- és kisbetűkre;
- az SVF-fájlba megjegyzéseket lehet illeszteni a „!” , a „/” karakterek után;
- az utasításon belüli adatok hexadecimális formában vannak rögzítve, és zárójelek között kell lenniük;
- az adatok nem lehetnek hosszabbak, mint az adott peremfigyeléses lánc bithossza (de az MSB bevezető nullái nem számítanak bele a hosszba);
- a bitsorrend egyezik az IEEE 1149.1-ben rögzített bitsorrenddel. [97]

A specifikációban rögzített parancsokat az alábbi táblázatban mutatom be.

SVF parancs	A parancs működése
<i>ENDDR</i>	Megadja az alapértelmezett záró állapotot adatregiszter (DR) figyelés (scan) műveletekhez.
<i>ENDIR</i>	Megadja az alapértelmezett záró állapotot adatregiszter (IR) figyelés (scan) műveletekhez.
<i>FREQUENCY</i>	Meghatározza az IEEE 1149.1 buszműveletek maximális tesztelési órajel frekvenciáját. Paraméter nélkül a rendszer maximális frekvenciájára állítja az órajelet.
<i>HDR</i>	Meghatározza a fejlécmintát (Header Data Register tartalmát), amely a későbbi DR figyelés (scan) műveletek elejére kerül.* ⁶⁴
<i>HIR</i>	Meghatározza a fejlécmintát (Header Instruction Register tartalmát), amely a későbbi IR figyelés műveletek elejére kerül.*
<i>PIO</i>	Párhuzamos tesztmintát definiál. (A paraméterben: H/L – logikai 1/0 meghajtás, Z – nagyimpedanciás állapot, U/D – logikai 1/0 érzékelés, X – érzékelés, „don't care” állapot)
<i>PIOMAP</i>	Párhuzamos tesztminta esetén PIO oszlopokat rendel hozzá logikai kivezetésekhez. Megadja, hogy azok bemenetek vagy kimenetek.
<i>RUNTEST</i>	Futtatás állapotba kényszeríti az IEEE 1149.1 busz meghatározott számú órajelig vagy egy meghatározott időtartamra.
<i>SDR</i>	Az IEEE 1149.1 adatregiszterének (DR) kiolvasását végzi.
<i>SIR</i>	Az IEEE 1149.1 utasításregiszterének (IR) kiolvasását végzi.
<i>STATE</i>	Az IEEE 1149.1 buszt egy meghatározott stabil állapotba kényszeríti.
<i>TDR</i>	Meghatározza az DR figyelési (scan) műveletek végéhez csatolt kivezető mintát (Trailer Data Register).*
<i>TIR</i>	Meghatározza az IR figyelési (scan) műveletek végéhez csatolt kivezető mintát (Trailer Instruction Register).*
<i>TRST</i>	Az opcionális TRST vonalat vezérli.

5. táblázat – Az SVF parancsok listája⁶⁵

A paraméterezés és a parancsok értelmezése a specifikációban megtalálható, terjedelmi okokból nem részletezem. Egy rövid SVF fájl, ami szemléletessé teszi a fent leírtakat:

⁶⁴ A * jelölésű parancsok azért szükségesek, hogy az adott, vizsgált áramkör előtt vagy után a többi áramkörből kiolvasott mintát figyelembe lehessen venni a kiolvasott információ értelmezésénél.

⁶⁵ [97] alapján szerkesztette a szerző.

!Tesztprogram kezdete	
TRST OFF;	!TRST vonal tiltása
ENDIR IDLE;	!Záróállapot IR scan esetén az IDLE
ENDDR IDLE;	!Záróállapot DR scan esetén az IDLE
HIR 8 TDI (00);	!8 bites IR fejlécminta definiálása
HDR 16 TDI (FFFF) TDO (FFFF) MASK (FFFF);	!16 bites DR fejlécminta definiálása
TIR 16 TDI (0000);	!16 bites IR kivezető minta
TDR 8 TDI (12);	!8 bites DR kivezető minta
SIR 8 TDI (41);	!8 bites IR scan minta és elvárt értéke
SDR 32 TDI (ABCD1234) TDO (11112222);	!32 bites DR scan beléptetendő értéke !és kiléptetendő érték elvárt értéke
STATE DRPAUSE;	!A stabil DRPAUSE állapotba küldés
RUNTEST 100 TCK ENDSTATE IRPAUSE;	!100 TCK-ig futtatja a tesztet
!Tesztprogram vége	

42. ábra – SVF fájl minta⁶⁶

5.2 A soros vektoros formátum parancsrendszerének javasolt kiegészítése kevert jelű teszteléshez

A javaslat célja, hogy egy olyan kiegészítő parancskészlet kerüljön a szabványban rögzített parancsrendszerbe, amellyel a megfelelő képességekkel ellátott tesztvezérlő képes analóg (áram) gerjesztőjelek előállítására, és analóg (feszültség) válaszjelek érzékelésére. Ez a javasolt kiegészítő parancskészlet egy lehetséges módszert kínál a 2. fejezetben ismertetett, kevert jelű peremfigyelést támogató áramkör működtetésére. A parancslista az ott leírt lehetőségeket nem fedi le teljesen, de véleményem szerint a két megoldás együtt használva egy gyakorlatban is működőképes, hatékony módszer alapjait teheti le. Ugyanez a parancslista integrálható a 4. fejezetben ismertetett naplózó és öntesztelő rendszerben is, amely az alapvető analóg vizsgálatokra megfelelő lehet. Mindkét itt említett alkalmazásban, és egyéb alkalmazásokban is elmondható, hogy a kiegészítő parancsok listája az SVF szabványa és az alábbi logika szerint tovább bővíthető.

⁶⁶ [97] p. 5. alapján szerkesztette a szerző.

A javasolt parancsrendszer-elemek

SVF parancs és paramétere(i)	A parancs működése
GDC (<i>dci</i>)	Áramgenerátorral <i>dci</i> nagyságú egyenáram létrehozása az AT1 vezetékrendszeren. (<i>dci</i> értékét μ A-ben kell megadni)
GAC (<i>aci</i>) (<i>freq</i>)	Áramgenerátorral <i>aci</i> csúcsértékű, <i>freq</i> frekvenciájú, szinusz jelalakú áram létrehozása az AT1 vezetékrendszeren. (<i>aci</i> értékét μ A-ben, <i>freq</i> értékét Hz-ben kell megadni)
MDC (<i>vmean</i>)	Egyenfeszültség (egyszerű középérték) mérése az AT2 vezetékrendszeren, a mérési eredmény <i>vmean</i> változóba kerül. (<i>vmean</i> mV-ban kerül kiadásra)
MAC (<i>vpeak</i>)	Váltakozó feszültség csúcsértékének mérése az AT2 vezetékrendszeren, a mérési eredmény a <i>vpeak</i> változóba kerül. (<i>vpeak</i> mV-ban kerül kiadásra)
WAIT (<i>time</i>)	Várakozás a tesztprogram végrehajtásában <i>time</i> ideig. (<i>time</i> értékét μ s-ban kell megadni)

6. táblázat – Az SVF jelenlegi parancsrendszerének kibővítésére javasolt parancsok⁶⁷

5.3 Példák a javasolt parancsrendszer-elemek használatával történő mérésekre

A következőkben az előző alfejezetben ismertetett parancsrendszer-elemek használatára dolgoztam ki néhány példát. Ezek általános, de a valóságos áramkörökben is előforduló alapáramkörök paramétereinek mérését mutatják be. Terjedelmi okok miatt az alkalmazhatóság vizsgálatára kidolgozott számos példából csak hármat mutatok be, de egy lektorálás alatt álló cikkemben⁶⁸ más esetekre is adok megoldást a módszer működőképességének igazolására. A példákat szemléltető ábrán csak a mérés szempontjából fontos részletek vannak kirajzolva, a kapcsolók közül is többnyire csak azok, amelyeket használok az adott mérésnél. Az alábbiakban ismertetett tesztprogramokban fel kell használni néhány, az IEEE 1149.4 szabványban definiált parancsot, ezek (és hexadecimális kódjuk) a következők:

⁶⁷ Szerkesztette a szerző

⁶⁸ Molnár Zsolt: Biztonságkritikus beágyazott rendszerek analóg részegységeinek vizsgálatát támogató bővítés a soros vektoros formátum specifikációjához - Biztonságtudományi Szemle – várható megjelenés: 2023. október

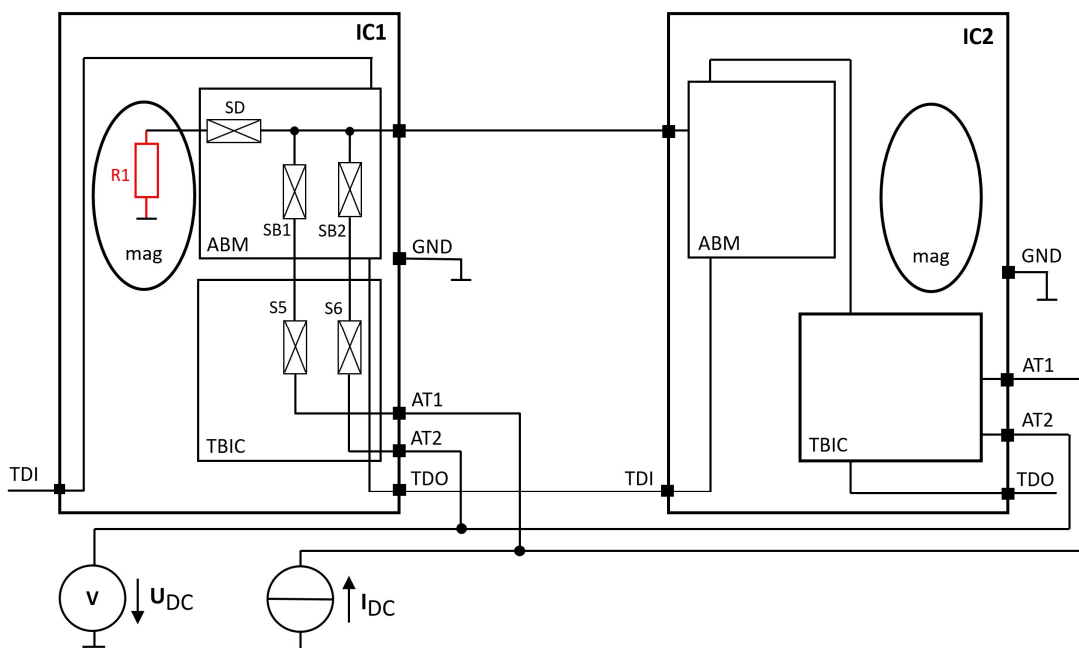
Parancs	A parancs kódja
BYPASS	0xF
EXTEST	0x0
SAMPLE/PRELOAD	0xC
PROBE	0xA

7. táblázat – A felhasznált IEEE 1149.4 utasítások és kódjuk⁶⁹

5.3.1 Konkrét példák önálló áramköri elemek vagy egyszerű hálózatok esetére

1. példa: mérendő: ellenállás az áramkörön belül, analóg funkcionális pont és a GND között

A probléma vázlatát az alábbi ábra mutatja. Az ábrázolt részletben két integrált áramkör van (IC1 és IC2), és az SVF fájl megírásához feltételezem, hogy előttük és utánuk sincs másik integrált áramkör. A feladat a pirossal jelölt R1 ellenállás értékének meghatározása. IC1 és IC2 szimbólumán lévő kitöltött kis fekete négyzetek a kivezetések. A magáramkör az ABM-eken keresztül csatlakozik ezekre a kivezetésekre.



43. ábra – Magáramkörön belüli ellenállás mérése⁷⁰

⁶⁹ Szerkesztette a szerző

⁷⁰ Szerkesztette a szerző

A méréshez szükséges SVF fájl, amely használja az új, javasolt parancsrendszer-elemeket is, az alábbi ábrán látható. (A sorok elején található sorszámozás csupán az azonosítást szolgálja, szintaktikailag a program ebben a formában helytelen.)

1.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás
2.	TRST OFF;	
3.	ENDIR IDLE;	// az utasítás-küldés végállapota: IDLE
4.	ENDDR IDLE;	// az adatküldés végállapota: IDLE
5.	HDR 0;	// TDO irányban IC2 után nincs több
6.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs fejléc
7.	TDR 0;	// TDI irányban IC1 előtt nincs több
8.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs kivezető
9.	SDR 16 TDI (3300) SMASK (FFFF);	// IC1 ABM: p3 (SB1, SB2 bekapcsol)
10.		// IC1 TBIC: P3 (S5, S6 bekapcsol)
11.		// IC2 ABM: p0 (minden kikapcsol)
12.		// IC2 TBIC: P0 (minden kikapcsol)
13.	SIR 8 TDI(AF) SMASK(FF);	// IC1: PROBE utasítás (SD bekapcsol)
14.		// IC2: BYPASS utasítás
15.	GDC 100;	// AT1-re 100 μ A DC generálása
16.	WAIT 20;	// várakozás állandósulásra, 20 μ s
17.	MDC U1;	// AT2-n DC feszültség mérése
18.		// eredmény az U1 változóba
19.	GDC 0;	// áramgenerátor kikapcsolása
20.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás

44. ábra – SVF fájl a magáramkörön belüli ellenállás méréséhez⁷¹

A fájlban hivatkozott, kapcsolókat vezérlő minták (p0, P0, p3 és P3) értékeit [27] 29. oldalán található Table 1 és 47. oldalán található Table 6 alapján határoztam meg.

Ezek után R1 értéke meghatározható a gerjesztés áramából (100 μ A) és a megmért U_{DC} feszültségből. Helyesebben: mivel R1 értékéhez hozzáadódik SD kapcsoló ellenállása is (az elrendezésben csak SD jobb oldalára lehet csatlakozni), így SD ellenállásának értékével korrigálni kell:

$$R_1 = \frac{U_1}{100 \mu A} - R_{SD}$$

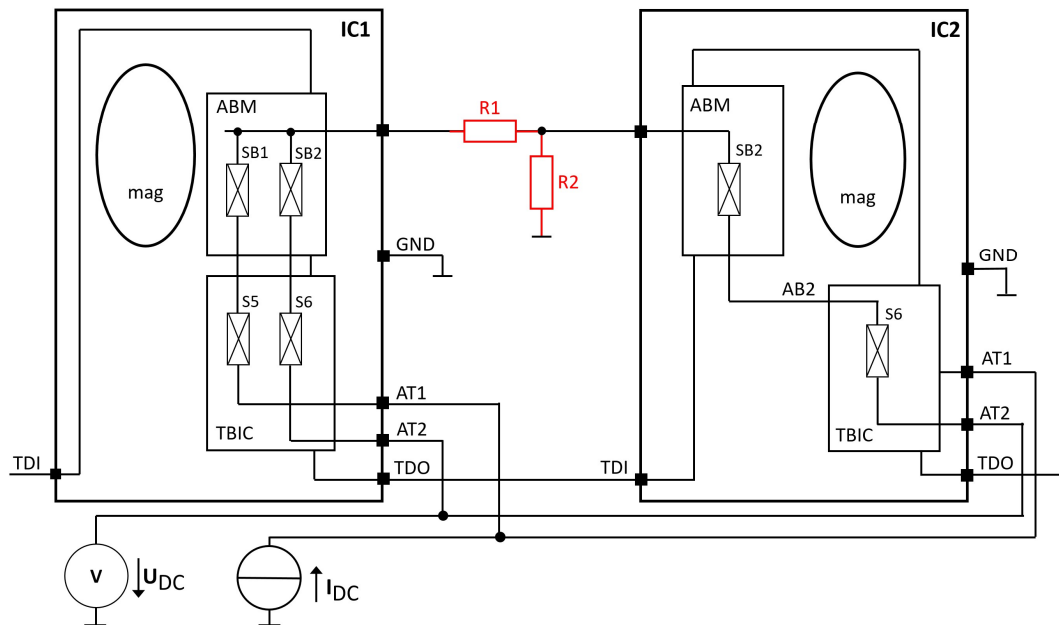
4. egyenlet – R1 értékének meghatározása

Ha SD kapcsoló ellenállását nem ismerjük (ez az általános helyzet, értékét csak becsülni lehet), akkor értelemszerűen a mérés – a két ellenállás arányától függően – hibával terhelt.

⁷¹ Szerkesztette a szerző

2. példa: mérendő: feszültségosztó (analog klaszter) két integrált áramkör között

A probléma vázlatát az alábbi ábra mutatja.



45. ábra – Ellenállásosztó mérése két integrált áramkör között⁷²

Az ábrázolt részletben két integrált áramkör van (IC1 és IC2), és az SVF fájl megírásához feltételezem, hogy előttük és utánuk nincs másik integrált áramkör. A feladat a pirossal jelölt R1 és R2 ellenállások értékének meghatározása. Ez egy feszültségosztó, a meghajtás és az osztási pont analóg funkcionális pontra csatlakozik, az osztó alsó ellenállása pedig földre. IC1 és IC2 szimbólumán lévő kitöltött kis fekete négyzetek a kivezetések. A magáramkör az ABM-eken keresztül csatlakozik ezekre a kivezetésekre. A feszültségosztó egy nagyon egyszerű analóg klaszternek tekinthető, ha a digitális klaszterek szemléletmódját kiterjesztem az analóg áramkörökre.

A méréshez szükséges SVF fájl, amely használja az új, javasolt parancsrendszer-elemeket is, az alábbi ábrán látható. (A sorok elején található sorszámzás csupán az azonosítást szolgálja, szintaktikailag a program ebben a formában helytelen.)

⁷² Szerkesztette a szerző

1.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás
2.	TRST OFF;	
3.	ENDIR IDLE;	// az utasítás-küldés végállapota: IDLE
4.	ENDDR IDLE;	// az adatküldés végállapota: IDLE
5.	HDR 0;	// TDO irányban IC2 után nincs több
6.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs fejléc
7.	TDR 0;	// TDI irányban IC1 előtt nincs több
8.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs kivezető
9.	SDR 16 TDI (3300) SMASK (FFFF);	// IC1 ABM: p3 (SB1, SB2 bekapcsol)
10.		// IC1 TBIC: P3 (S5, S6 bekapcsol)
11.		// IC2 ABM: p0 (minden kikapcsol)
12.		// IC2 TBIC: P0 (minden kikapcsol)
13.	GDC 100;	// AT1-re 100 μ A DC generálása
14.	WAIT 20;	// várakozás állandósulásra 20 μ s
15.	MDC U1;	// AT2-n DC feszültség mérése
16.		// eredmény az U1 változóba
17.	SDR 16 TDI (2211) SMASK (FFFF);	// IC1 ABM: p2 (SB1 bekapcsol)
18.		// IC1 TBIC: P2 (S5, S10 bekapcsol)
19.		// IC2 ABM: p1 (SB2 bekapcsol)
20.		// IC2 TBIC: P1 (S6, S9 bekapcsol)
21.	WAIT 20;	// várakozás állandósulásra, 20 μ s
22.	MDC U2;	// AT2-n DC feszültség mérése
23.		// eredmény az U2 változóba
24.	GDC 0;	// áramgenerátor kikapcsolása
25.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás

46. ábra – SVF fájl egy ellenállásosztó elemeinek megméréséhez⁷³

A fájlban hivatkozott, kapcsolókat vezérlő minták (p0, P0, p1, P1, p3 és P3) értékeit [27] 29. oldalán található Table 1 és 47. oldalán található Table 6 alapján határoztam meg. A mérés során tehát a gerjesztés hatására létrejövő feszültséget mérjük először az osztó két elemén együtt (U_1), majd csak R2-n (U_2).

$$R_1 = \frac{U_1 - U_2}{100 \mu A}$$

5. egyenlet – Az ellenállásosztó felső tagjának meghatározása

$$R_2 = \frac{U_2}{100 \mu A}$$

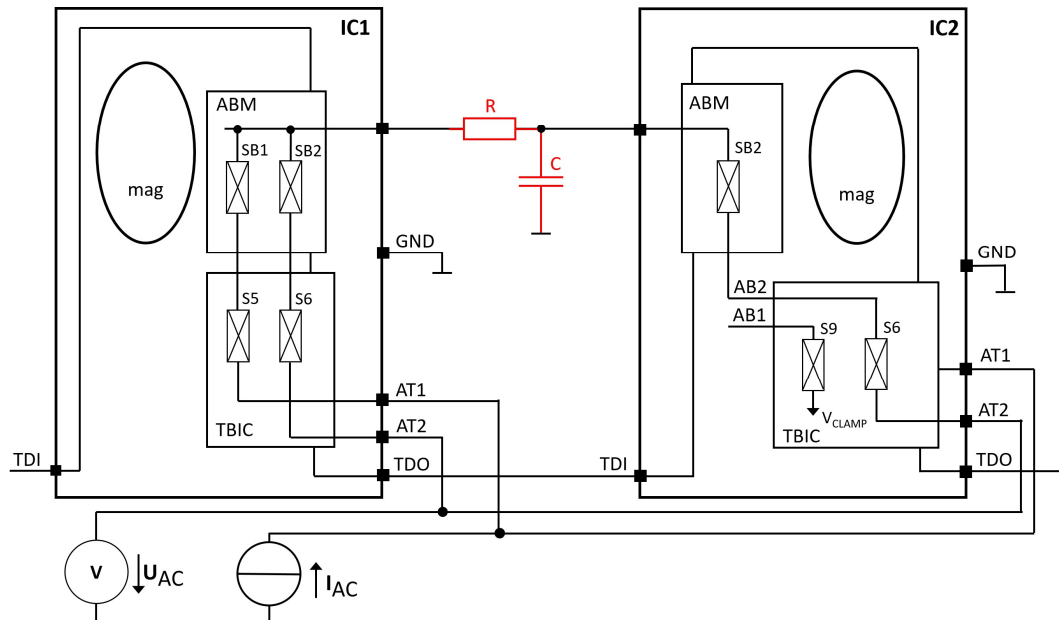
6. egyenlet – Az ellenállásosztó alsó meghatározása

Mindkét mérési fázisban 3 vezetékes mérést valósít meg a program, ez kedvezően befolyásolja a mérés állandó hibáját.

⁷³ Szerkesztette a szerző

3. példa: mérendő: RC tag két integrált áramkör funkcionális pontjai között

A probléma vázlatát az alábbi ábra mutatja. Az ábrázolt részletben két integrált áramkör van (IC1 és IC2), és az SVF fájl megírásához feltételezem, hogy előttük és utánuk sincs másik integrált áramkör.



47. ábra – RC tag elemeinek mérése két integrált áramkör között⁷⁴

A feladat a pirossal jelölt R és C elemek értékének meghatározása. Ez egy olyan RC tag, amelynél a meghajtás és az R és C elemek közös pontja analóg funkcionális pontra csatlakozik, a kondenzátor másik kivezetése pedig földre. IC1 és IC2 szimbólumán lévő kitöltött kis fekete négyzetek a kivezetések. A magáramkör az ABM-eken keresztül csatlakozik ezekre a kivezetésekre. Ennél a mérésnél AC gerjesztésre van szükség, és a megjelenő feszültség is AC jellegű. Az ábrán rajztechnikai okokból IC1 S10 kapcsolója nincs feltüntetve, az a mérés második fázisában zavarjel csökkentési célt szolgál (V_{CLAMP} -ot kapcsolja AB2-re). Ugyanebből a célból a mérés második fázisában IC2 S9 kapcsolója AB1-re kapcsolja V_{CLAMP} -ot (ez a kapcsoló szerepel a rajzon).

⁷⁴ Szerkesztette a szerző

A méréshez szükséges SVF fájl, amely használja az új, javasolt parancsrendszer-elemeket is, az alábbi ábrán látható. (A sorok elején található sorszámozás csupán az azonosítást szolgálja, szintaktikailag a program ebben a formában helytelen.)

1.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás
2.	TRST OFF;	
3.	ENDIR IDLE;	// az utasítás-küldés végállapota: IDLE
4.	ENDDR IDLE;	// az adatküldés végállapota: IDLE
5.	HDR 0;	// TDO irányban IC2 után nincs több
6.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs fejléc
7.	TDR 0;	// TDI irányban IC1 előtt nincs több
8.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs kivezető
9.	SDR 16 TDI (3300) SMASK (FFFF);	// IC1 ABM: p3 (SB1, SB2 bekapcsol)
10.		// IC1 TBIC: P3 (S5, S6 bekapcsol)
11.		// IC2 ABM: p0 (minden kikapcsol)
12.		// IC2 TBIC: P0 (minden kikapcsol)
13.	GAC 100, f1;	// AT1-re 100 μ A csúcsértékű, f1 frekvenciájú
14.		// szinuszos áram generálása
15.	WAIT 20;	// várakozás állandósulásra, 20 μ s
16.	MAC U1;	// AT2-n AC feszültség csúcsértékének mérése
17.		// eredmény az U1 változóba
18.	SDR 16 TDI (2211) SMASK (FFFF);	// IC1 ABM: p2 (SB1 bekapcsol)
19.		// IC1 TBIC: P2 (S5 és S10 bekapcsol)
20.		// IC2 ABM: p1 (SB2 bekapcsol)
21.		// IC2 TBIC: P1 (S6 és S9 bekapcsol)
22.	WAIT 20;	// várakozás állandósulásra, 20 μ s
23.	MAC U2;	// AT2-n AC feszültség csúcsértékének mérése
24.		// eredmény az U2 változóba
25.	GAC 0;	// AC áramgenerátor kikapcsolása
26.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás

48. ábra – SVF fájl egy RC tag elemeinek megméréséhez⁷⁵

A fájlban hivatkozott, kapcsolókat vezérlő minták (p0, P0, p1, P1, p2, P2, p3 és P3) értékeit [27] 29. oldalán található Table 1 és 47. oldalán található Table 6 alapján határoztam meg. A mérés során tehát az AC gerjesztés hatására létrejövő feszültséget (annak csúcsértékét) mérjük először az RC tag bemenetén (U_1), majd csak C-n (U_2). Az alábbiakban általános esetre f_1 a gerjesztőáram frekvenciája, I_1 a gerjesztőáram csúcsértéke. U_1 és U_2 ismeretében a két elem, R és C értéke a következőképpen határozható meg⁷⁶ (Z_1 az RC tag impedanciája f_1 frekvencián, ω_0 pedig a törésponti körfrekvencia):

⁷⁵ Szerkesztette a szerző

⁷⁶ A levezetés néhány lépését a tömörség miatt összevontam vagy kihagytam

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$$

$$\bar{Z}(\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} = R \left(1 + \frac{1}{j \frac{\omega}{\omega_0}} \right)$$

$$|U_1| = I \cdot |\bar{Z}(\omega_1)| = I \cdot Z_1 \rightarrow Z_1 = \frac{U_1}{I}$$

$$|U_2| = I \cdot \frac{1}{\omega_1 \cdot C} \rightarrow C = \frac{I}{\omega_1 \cdot U_2}$$

$$Z_1 = |\bar{Z}(\omega_1)| = R \cdot \frac{\sqrt{\omega_0^2 + \omega_1^2}}{\omega_1} \rightarrow R = \frac{1}{\omega_1 \cdot C} \cdot \sqrt{\omega_1^2 \cdot C^2 \cdot Z_1^2 - 1}$$

7. egyenlet – Az RC tag elemeinek kiszámítása

Ezeket a számításokat a tesztvezérlő végezheti el, esetleg a számítások implementálhatóak a korábbi fejezetben általam javasolt integrált áramkör egy számító-egységébe.

5.3.2 Mérendő: általános négypólus (általános analóg klaszter)

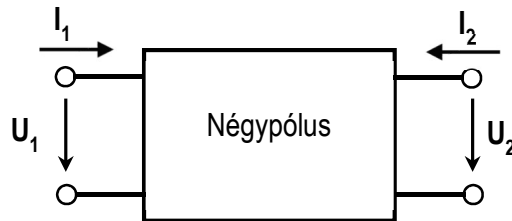
Korábbi cikkemben [67] elemzést végeztem, amelyben azt kutattam és igazoltam, hogy a kevert jelű peremfigyelés módszerével elvégezhető-e egy általános négypólus paramétereinek meghatározása a kevert jelű peremfigyeléssel. Röviden ebben az alfejezetben összefoglalom az eredményeimet.

A vizsgálatot leszűkítettem a lineáris és nemlineáris diszkrét elemekből felépülő négypólusokra. A hálózatok, vagy azok egyes részei modellezhetőek négypólusokkal. A négypólusok (vagy kétpólus-párok) bemeneteire illetve kimeneteire felírhatóak egyenletek, amelyek leírják azok működését. A négypólusok leírása történhet

- impedancia (Z);
- admittancia (Y);
- hibrid (H);
- inverz hibrid (D);
- lánc (A);
- inverz lánc (B);

paraméterekkel. [98]

A legelterjedtebb Z paraméteres leírást, használtam fel a modellezés és a vizsgálataim során, amely – mint kiderült – mérési oldalról kiválóan illeszkedik a kevert jelű peremfigyeléssel megvalósítható mérésekhez. A négy-pólus áramainak illetve feszültségeinek mérőirányait az alábbi ábra mutatja.



49. ábra – A modellezéshez és a vizsgálathoz használt áram és feszültség irányok⁷⁷

Általános esetben, ha feltételezzük, hogy a négy-pólus nem tartalmaz független generátorokat, akkor az U_1 és U_2 feszültségekre a következő lineáris egyenletrendszer írható fel:

$$U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

8. egyenlet – A fenti modell egyenletrendszere⁷⁸

A Z paraméterek fizikai tartalmához gondolati mérésekkel juthatunk. Első lépésben zárjuk le a kimenetet szakadással, azaz $I_2 = 0$. Ekkor:

$$U_1 = Z_{11}I_1 \rightarrow Z_{11} = \frac{U_1}{I_1}$$

$$U_2 = Z_{21}I_1 \rightarrow Z_{21} = \frac{U_2}{I_1}$$

9. egyenlet – Z_{11} és Z_{21} paraméterek meghatározása

Ezután a bemeneten legyen szakadás, azaz $I_1 = 0$. Ekkor:

$$U_1 = Z_{12}I_2 \rightarrow Z_{12} = \frac{U_1}{I_2}$$

$$U_2 = Z_{22}I_2 \rightarrow Z_{22} = \frac{U_2}{I_2}$$

10. egyenlet – Z_{12} és Z_{22} paraméterek meghatározása

⁷⁷ Az ábra forrása: szerkesztette a szerző [67] p. 89 alapján

⁷⁸ Forrás: [98] p. 115

A paraméterek meghatározása során a fenti egyenletek szerint, különböző csoportokba sorolható négyfázisú esetén a következő feladatok vannak:

- Lineáris, reaktív elemet nem tartalmazó négyfázisú esetén a gerjesztés DC vagy AC áram, mérni DC vagy AC feszültséget kell.
- Lineáris, reaktív elemet tartalmazó négyfázisú esetén a gerjesztés AC áram, mérni AC feszültséget kell. A frekvenciafüggés megállapításához több mérési ponton (több frekvencián) meg kell határozni az átvitelt.
- A nemlineáris, frekvencia-független négyfázisú esetén a gerjesztés lehet DC áram, a gerjesztő áram különböző értékeinél kell feszültséget mérni. Az áram változtatására a nemlineáris viselkedés meghatározása érdekében van szükség. A nemlineáris, frekvencia-független négyfázisú AC gerjesztéssel is mérhetőek, ahogyan azt a következő pontban ismertetem.
- A nemlineáris frekvenciafüggő négyfázisúakat (szinuszos) AC gerjesztéssel kell meghajtani. A lineáris torzítás miatt a gerjesztés hatására létrejövő válasz-feszültség felharmonikusokat fog tartalmazni, amelyek értékéből lehet következtetni a négyfázisú felépítésére. [99] Azaz ebben az esetben nem egyszerűen AC feszültséget kell mérni, hanem meg kell határozni a válasz-feszültség spektrumát. Erre a célra jól implementálható algoritmusok állnak rendelkezésre (pl. FFT), amelyek a mérésvezérlőben leprogramozhatóak.

A felsorolásból, és a fenti egyenletekből (9. egyenlet, 10. egyenlet) jól látható, hogy az első 3 példában leírt módszerrel és az SVF kiegészítésére javasolt parancsokkal a mérések elvégezhetőek. Az általános négyfázisú méréséhez szükséges ABM és TBIC kapcsoló vezérléseket, valamint a mérés során felmerülő problémákat és azok megoldását részletesen tartalmazza a cikkem, [67] a részletek ismertetésétől itt terjedelmi okok miatt eltekintek.

Zárásul a módszer hibahely-behatárolásra a következő módon használható:

1. A vizsgálandó áramkört négy-pólusokra (kétpólus-párokra) bontjuk fel, amelyek bemeneti és kimeneti kapcsait (4 darab) egy-egy analóg peremfigyelés-cellára (ABM) kötjük.
2. Megfelelő mérési eljárást és a négy-póluselmélet módszereit alkalmazva megállapíthatóak a négy-pólus paraméterei, amelyekből következtetni lehet annak hibátlanságára, vagy az esetleges meghibásodásra, illetve annak jellegére.
3. A mérést a kevert jelű peremfigyeléses technika alkalmazásával úgy lehet megvalósítani, ha a peremfigyelés-vezérlőtől érkező parancsok alapján a peremfigyelő cellák felől a megfelelő meghajtást és érzékelést biztosítjuk. A mérőjeleket és az érzékelést szintén a peremfigyelés vezérlőnek kell megvalósítania.

A négy-póluselmélet módszerének alkalmazása esetünkben a következőket jelenti:

1. Az egyszerű négy-pólusok, azok paraméterei, valamint a négy-pólusok összekapcsolásának szabályait ismerve meghatározzuk az eredő (mérendő) négy-pólus paramétereit.
2. A fenti tényezők ismeretében meghatározzuk a mérendő négy-pólus átviteli jellemzőit.
3. Elvégezzük a paraméterek és/vagy az átviteli jellemzők mérését illetve meghatározását.
4. A kapott eredmények, illetve a számítással meghatározott négy-pólus-jellemzőket összevetve meghatározzuk, hogy a vizsgált négy-pólus hibás-e vagy hibátlan, azaz a mérési eredmények eltérése a helyes értékektől megengedett hibahatáron belül van-e.
5. Amennyiben a vizsgált négy-pólus hibás, a mért jellemzők alapján szintetizáljuk négy-pólust (vagy helyettesítő képét), azaz meghatározzuk az azt felépítő elemek paramétereit.
6. A paraméterek eltérése alapján behatároljuk a hibahelyet.

5.3.3 Egyéb mérhető paraméterek

Rövid listát állítottam össze, hogy (a teljesség igénye nélkül) milyen egyéb analóg paraméterek mérhetőek még az új, javasolt SVF parancskészlet segítségével. A fentiekhez hasonló részletes esettanulmányt terjedelmi okokból nem közlök.

- Erősítő paraméterek
 - bemeneti ellenállás
 - kimeneti ellenállás
 - feszültség erősítés
- Komparátor paraméterek
 - billenési szintek
 - hiszterézis
- Szűrő paraméterek
 - törésponti frekvencia
 - sávzélesség
 - oldalmeredekség

5.4 Összegzés

Ebben a fejezetben megvizsgáltam a soros vektoros formátum (SVF) parancsrendszerét, meghatároztam a parancskészlet hiányosságait, amely jelenleg nem teszi megfelelővé a kevert jelű (IEEE 1149.4 szabványú) peremfigyelésben való alkalmazásra. Tanulmányozva a kevert jelű peremfigyelés módszerét, hangsúlyosan a gerjesztőjel előállításával és a válaszjel érzékelésével kapcsolatos igényeket, meghatároztam egy kiegészítő parancskészletet, amellyel feltételezésem szerint elvégezhetőek a gerjesztés és az érzékelés során adódó feladatok.

Ezek után néhány tipikus parametrikus mérésnél esettanulmányokat végeztem, és vizsgáltam a kiegészítő parancskészlet használhatóságát. A cél az volt, hogy megállapítsam, hogy elegendő-e a parancskészlet 5 új parancsa, és ha nem, akkor meghatározzam a hiányosságokat. A méréseket úgy válogattam össze, hogy legyen integrált áramkörön belüli és integrált áramkörön kívüli elem paramétereinek meghatározása is, valamint legyen olyan mérés, amelyhez DC, és olyan, amelyhez AC gerjesztést kell használni.

Munkám végén a fenti módszer alkalmazását általánosítottam, és megfogalmaztam, hogy milyen elvek mentén lehet egy tetszőleges négypólus (jelen szemléletmódban analóg klaszter) paramétereinek a normális tartománytól való eltérését meghatározni, majd a mérés alapján a

négypóluson belül a hibahelyet behatárolni. Közöltem még néhány egyéb analóg paramétert, amelyet mérni lehet.

Úgy értékelem, hogy a munkám során sikerült kialakítanom egy jól használható kiegészítő parancskészletet, amelynek alkalmazhatóságát vizsgálataim során igazoltam. Összefüggést találtam értekezésem többi részével: a javasolt kiegészítő parancskészlet egy lehetséges módszert kínál a 2. fejezetben ismertetett, kevert jelű peremfigyelést támogató áramkör működtetésére, a két megoldást együttes használata egy gyakorlatban is működőképes, hatékony módszer alapjait teszi le. A kiegészítő parancslista integrálható a 4. fejezetben ismertetett naplózó és öntesztelő rendszerben is, amely az véleményem szerint alapvető analóg vizsgálatokra megfelelő.

Új tudományos eredményként javasoltam egy, a soros vektoros formátum specifikációjába illeszthető, kiegészítő parancskészletet, amely támogatja a kevert jelű peremfigyelés analóg méréseinek elvégzését azzal, hogy lehetővé teszi változatos gerjesztő jelek előállítását, és a válaszfeszültségek érzékelését, megmérését.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

Tudományos kutatásom témája a beágyazott rendszerek, ezen belül a kritikus beágyazott rendszerek üzembiztonságát javító módszerek kutatása. A téma véleményem szerint azért aktuális, mert a kritikus beágyazott rendszerek az eddig megszokott alkalmazási területeken kívül egyre inkább megjelennek a hétköznapi életben, a jövőbeni beágyazott rendszer alkalmazásoknak várhatóan egyre nagyobb része lesz kritikus beágyazott rendszer, mivel egyre nő az igény a fél-autonóm illetve autonóm működésű, a valós világgal együttműködő, nagy megbízhatóságú, intelligens megoldásokra.

A kutatásaim során lehetőséget láttam, hogy a gyártás, a szerviztevékenység és a nem üzem közbeni vizsgálatokhoz, teszteléshez használt peremfigyeléses technológiát alkalmazzam. Ezért elsőként megvizsgáltam ezt a technológiát alkalmazhatóság szempontjából, ami pozitív eredménnyel zárult. Így erre a technológiára alapozva, több irányba elindulva, majd az egyes irányokban elért eredményeket egymásra építve és kombinálva értem el a kitűzött célt.

Az értekezésem öt fejezetből áll, amelyek tartalmát a következőkben fejezetenként összefoglalom.

1. fejezet

Ezt a fejezetet a mélyreható és széleskörű irodalomkutatásom lényegét kiemelő összefoglalásával kezdtem. Ebben a részben áttekintettem és elemeztem az öntesztelés lehetőségeit, a peremfigyeléses tesztelés szabványait és eszközeit. Megvizsgáltam a peremfigyeléses tesztelés alkalmazási területeit, és megállapítottam, hogy az üzem közbeni beépített öntesztben nem alkalmazzák ezt a technológiát. Ezek után megfogalmaztam a peremfigyeléses technika üzem közbeni öntesztben való alkalmazásának követelményeit, és javaslatot tettem a követelmények teljesítésének lehetséges módjaira. Ahol lehet, több szempontból is fogalmaztam meg teljesítési módot, illetve ahol lehet, azonos szempontból több teljesítési módot fogalmaztam meg. Számba vettem és rendszereztem a peremfigyeléses technika üzem közbeni beépített öntesztben való alkalmazásainak lehetőségeit és korlátait. A korlátokat leszűkítettem, illetve több ponton utaltam arra, hogy ezek a korlátok véleményem szerint nagyrészt áttörhetőek.

2. fejezet

A kevert jelű peremfigyelést támogató integrált áramkör struktúrájának megalkotásához elsőként megvizsgáltam, hogy milyen erőforrások szükségesek a kevert jelű peremfigyelés elvégzéséhez, majd tanulmányoztam, hogy a különböző mérési feladatok hogyan végezhetőek el az IEEE 1149.4 szabvány szerint. Feltérképeztem azokat a felmerülő problémákat, amelyek a technológia alkalmazása mellett az analóg méréseknél előfordulhatnak. Kialakítottam a főbb erőforrásokkal (áramgenerátor, feszültségmérő és vezérlő) kapcsolatos követelményeket, majd megfogalmaztam ezen erőforrások véleményem szerint helyes megvalósításának irányát, illetve módját. Kimondtam, hogy nem tartom szükségesnek a digitális vizsgálatokhoz szükséges gerjesztő és érzékelő egységek implementálását, mert azokat a peremfigyeléses rendszer már tartalmazza. Ezek után lefektettem egy új áramköri struktúra alapjait, amely tartalmazza az analóg gerjesztés és az analóg érzékelés moduljait, valamint a vezérlésért és a tesztvezérlővel való kapcsolattartásért felelős intelligens egységet. Végül feltérképeztem és ismertettem az alkalmazás lehetőségeit és korlátait.

3. fejezet

A tesztelés hatékonysága nagymértékben múlik azon, hogy egy elektronikai gyártmány áramköreinek mekkora hányadát sikerül bevonni a tesztelésbe. Ezt az arányt úgy lehet nagymértékben javítani, hogy a peremfigyeléses vizsgálatot a digitális áramkörök mellett az analóg áramköri egységek minél nagyobb hányadára kiterjesztjük. A fejezetben azt vizsgáltam, hogy kompromisszumot kötve a hatékonyság és a felmerülő költségek között, milyen lehetőségek vannak az analóg egységek tesztelésbe való bevonására. Javasoltam egy módszert, amely digitális peremfigyeléssel, valamint csekély számú járulékos áramkörrel az analóg egységek funkciója ellenőrizhető. A módszer leginkább impulzusteknikai áramkörök funkcionális vizsgálatára, azok alapfunkcióinak ellenőrzésére használható. Kiemelem, hogy nagy előnye a módszernek, hogy javarészt meglévő tesztelő infrastruktúrát alkalmaz. E fejezet fontos része egy ipari projekten alapuló esettanulmány, amelyben egy működő példát mutattam be az elvem igazolására.

4. fejezet

Ebben a fejezetben a célom egy naplózást és beépített öntesztelést megvalósító modell kialakítása volt. A két funkciót (naplózás és öntesztelés) egy integrált egységként tekintve helyeztem el egy kritikus beágyazott rendszer mellé. Megfogalmaztam a kiegészítő rendszerrel kapcsolatos követelményeket, és felépítettem a működés vázát mind a naplózás, mind az öntesztelés funkcióval kapcsolatban. Ezek után javaslatot tettem a naplózó és önellenőrzést végző rendszer kialakítására

és lefektettem a működési elv alapjait. Elvégeztem a javasolt kiegészítő rendszer alkalmazhatóságának vizsgálatát, és vázoltam a kiértékelés egy lehetséges módját.

5. fejezet

Ezt a fejezetet annak szenteltem, hogy az analóg vizsgálatok elvégzésének érdekében kiküszöböljem a soros vektoros formátum (SVF) parancsrendszerének hiányosságait. Kidolgoztam egy parancsrendszert, amivel az IEEE 1149.4 szabványban adott lehetőségeket kiaknázva és a 2. fejezetben vázolt analóg gerjesztést és érzékelést megvalósító áramkör felhasználásával lehetőség nyílik DC és AC jellel vizsgálható analóg áramköri paraméterek meghatározására. A továbbiakban vizsgáltam a kiegészítő parancskészlet használhatóságát. A cél az volt, hogy megállapítsam, hogy elegendő-e a parancskészlet 5 új parancsa, és ha nem, akkor meghatározom a hiányosságokat. Ezek után a konkrét esetekre működő elvet általánosítottam tetszőleges analóg klaszter paramétereinek mérésére, és a bennük lévő esetleges hiba helyének behatárolási módszerét is rögzítettem. Sikerült alátámasztanom, hogy a kialakított parancskészletet jól használható. Összefüggést találtam értekezésem többi részével: a javasolt kiegészítő parancskészlet egy lehetséges módszert kínál a 2. fejezetben ismertetett, kevert jelű peremfigyelést támogató áramkör működtetésére, a két megoldást együttes használata egy gyakorlatban is működőképes, hatékony módszer alapjait adja. A kiegészítő parancslista integrálható a 4. fejezetben ismertetett naplózó és öntesztelő rendszerbe is, amely véleményem szerint az alapvető analóg vizsgálatokra megfelelő.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Tézis 1.

Igazoltam, hogy a peremfigyeléses vizsgálat alkalmazásával egy kritikus beágyazott rendszer kiegészíthető olyan módon, hogy alkalmassá válik üzem közbeni beépített önteszt elvégzésére. [59] [22] [35]

Tézis 2.

Megalkottam egy olyan integrált áramkör struktúrát, amelynek segítségével kevert jelű áramköri elemek működése vizsgálható: az integrált áramkör képes analóg gerjesztőjelek előállítására, valamint a vizsgált áramkör analóg válaszainak mérésére és kiértékelésére. [68] [100]

Tézis 3.

Megalkottam egy olyan módszert az analóg áramkörök digitális jelekkel való részleges funkcionális tesztelésére, amelynek segítségével bizonyos áramköri egységek működőképességéről információ gyűjthető abban az esetben is, ha a tesztelt rendszerben a kevert jelű peremfigyelés nem áll rendelkezésre, vagy nem megvalósítható. [74]

Tézis 4.

Létrehoztam egy olyan modellt, amely egy beágyazott rendszer eredő megbízhatóságát képes növelni azáltal, hogy egyrészt a rendszerre ható gerjesztések, a rendszer által létrehozott válaszok, valamint a belső működés közben keletkező jelek naplózását képes megvalósítani úgy, hogy a szükséges kiegészítő elemek meghibásodása nem befolyásolja a rendszer biztonságos működését, másrészt alkalmas a rendszer üzem közbeni, illetve külön parancsra végzett önellenőrzésének megvalósítására. [67] [83]

Tézis 5.

Kialakítottam egy kiegészítő parancskészlet a soros vektoros formátum (SVF) parancsrendszeréhez, amely az IEEE 1149.1 és IEEE 1149.4 szabványra alapozva, felhasználva a Tézis 2.-ben definiált áramkör struktúrát, alkalmas analóg áramköri mérésekre, az áramkörben lévő alkatrészek és funkcionális részegységek paramétereinek meghatározására. [67] [101]

AJÁNLÁSOK, HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEK

A kutatási munkám során elért eredmények a kritikus beágyazott rendszerek széleskörű, folyamatos terjedésének köszönhetően számos területen hasznosíthatóak. Ilyen területek elsősorban a vasúti és a légi közlekedés, az orvostechnikai készülékek és rendszerek, a katonai alkalmazások, valamint az ipari alkalmazások egy része. A felsorolt alkalmazásokban az a közös, hogy nagy jelentősége van a megbízhatóság növelésének. Minden, a megbízhatóság növelését célzó megoldás kiterjesztheti a jelenlegi alkalmazások körét, illetve új alkalmazási területek nyílhatnak meg a kritikus beágyazott rendszerek terjedése előtt. Az elért eredményeim, korábban ismertetett javasolataim egy része véleményem szerint könnyen, jelentős többletmunka és jelentős anyagköltség nélkül implementálható nem kritikus beágyazott rendszerekben, amellyel szintén növelhető azok megbízhatósága. Kiemelem, hogy az általam fókuszba helyezett hardver megközelítés mellett, kutatásokat kell végezni szoftver oldalról is, mert csak a két területen elért eredmények együttes használatával érhető el a kívánt eredmény.

Javaslom, hogy a kevert jelű peremfigyelés vitalizációja érdekében azok az alkatrészgyártók, amelyek komoly tapasztalattal rendelkeznek a fejlesztésben is, ruházzanak fel újabb analóg áramköröket (műveleti erősítő, analóg félvezetős kapcsoló, jelátalakítók jelét fogadni képes integrált „frontend” áramkörök, stb.) az IEEE 1149.4 szabvány szerinti peremfigyelés képességével. Így egyre több áramköri egység alakítható ki az öntesztelés képességével.

Javaslom, hogy ugyanebből az okból az elektronikai ipar alkatrésztervezéssel foglalkozó cégei fejlesszenek ki egy általam vázolt integrált áramkört (a szükséges és célszerű kiegészítésekkel és módosításokkal), amely támogatja a kevert jelű peremfigyelést.

Javaslom, hogy a tesztelési módszerek fejlesztését végző kutatók fontolják meg a soros vektoros formátum kibővítését az általam javasolt alapokon elindulva, amellyel hatékonyá tehető az előző pontban említett integrált áramkör használata.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Hosszú és kalandos út vezetett odáig, hogy ennek a disszertációnak a végére pontot tehettem. Nem minden rajtam múlt, gyakran az Élet diktált...

Elsőként köszönetet szeretnék mondani témavezetőmnek, Dr. Schuster Györgynek, hogy nagy tapasztalatával segítségemre volt a dolgozatom megírása közben, meghagyta szabadságomat, de pont olyan mértékben és pont azokban a témákban adott egy-egy apró impulzust, amely a munkám folytatásához vagy tökéletesítéshez szükséges volt.

Nagy hálával tartozom Dr. Kohut József kollégámnak és volt (vagy inkább örök) tanáromnak, aki a tesztelés és a peremfigyelés iránt felkeltette az érdeklődésemet. A számos szakmai beszélgetésünk, közös ipari és tudományos munkánk során rengeteget tanultam, és ezek a tapasztalatok nagymértékben hozzájárultak ahhoz, hogy ez a dolgozat ilyen színvonalon elkészülhetett.

Köszönöm opponenseimnek, Dr. habil. Farkas Tibornak, Dr. habil. Szádeczky Tamásnak, és Dr. Varga Péternek, hogy szakértelmükkel és tanácsaikkal segítettek, illetve véleményeikben építő jellegű kritikát adtak.

Köszönöm a Doktori Iskola adminisztrátor hölgyeinek, Farkasné Hronyecz Erikának és Lévy Katalinnak, hogy segítették munkámat: mindig segítőkészek voltak és pontos információt adtak.

Köszönöm a fáradhatatlan biztatást és támogatást Halmi Lászlóné Dr. kolléganőmnek. Köszönöm Molnár Ferenc és Zsom Gyula egykori tanárainak és kollégáimnak, hogy annak idején, a felsőfokú tanulmányaim során sok minden tisztábbá válhatott az elektronika és digitális technika területén, és általuk még jobban megszerettem a szakmámat. Nem utolsó sorban köszönöm Dr. Horváth Eleknek, volt tanáromnak és kollégámnak, hogy egykor egy beszélgetéssel a doktori tanulmányaim irányába terelt.

Köszönöm a páromnak és gyermekeimnek hogy mellettem álltak és türelmesek voltak. Köszönöm nekik azt, hogy néha azzal adtak új lendületet, hogy élcelődtek, esetenként joggal kritizáltak. Pontosan tudták, hogy ez visz előre, ez ad új lendületet.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] J.C. Knight, „Safety critical systems: challenges and directions,” Proceedings of the 24th International Conference on Software Engineering. ICSE 2002, Orlando, 2002.
- [2] Aaron Kane , „Runtime Monitoring for Safety-Critical Embedded Systems,” Pittsburgh : Carnegie Mellon University, 2015.
- [3] Ahmad Menbari és Hadi Jahanirad, „A Concurrent BIST Architecture for Combinational Logic Circuits,” 10th International Conference on Computer and Knowledge Engineering, Mashad, 2020., pp. 262-267
- [4] Ahmad Menbari és Hadi Jahanirad, „A Tunable Concurrent BIST Design Based on Reconfigurable LFSR,” Journal of Electronic Testing, no. 39, pp. 245-262, 2023.
- [5] S.Abirami, Nikitha.S.Paulin és S.Prabu Venkateshwaran, „A Concurrent BIST Architecture for Online Input Vector Monitoring,” International Journal of Science Technology & Management, vol. 4, no. 1, pp. 297-303, 2015.
- [6] Mohamed H. El-Mahlawy és Winston Waller, „New Built-In Self-Test Boundary Scan Architectures for Digital Integrated Circuits in Industrial Applications,” International Journal of Computer Applications, vol. 182, no.1, pp. 41-55, 2018.
- [7] Stephen Sunter és Matthias Tilmann, „BIST of I/O circuit parameters via standard boundary scan,” 2011 IEEE International Test Conference, Austin, 2011.
- [8] "IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology," in IEEE Std 610.12-1990, pp.1-84, 1990.
- [9] Molnár Zsolt, „Korszerű eljárások az üzem közbeni tesztelésben,” in Repüléstudományi Közlemények, XIX. évfolyam különszám, Szolnok, 2007.
- [10] Russell Graves, „A Built-In Self Test Prognostic IC to monitor Electronic Aging and Performance Degradation in Complex Systems (Information Bulletin),” RIDGETOP GROUP, INC., Tucson, 2005.
- [11] Turcsányi Károly, „A haditechnikai eszközök megbízhatóságának elméleti alapkérdései,” egyetemi jegyzet, Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 1999.
- [12] Eugen Schaefer, „Megbízhatóság az elektronikában,” Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1983.
- [13] Dr. Abonyi János és Dr. Fülep Tímea, „Biztonságkritikus rendszerek,” egyetemi jegyzet, Veszprém: Pannon Egyetem, 2014.
- [14] Neszveda József, „Redundáns struktúrák és a biztonság sérthetlenség szint kapcsolata,” Hadmérnök, vol. 1, no. 1, pp. 186-192, 2007.
- [15] Gaál Zoltán, Kovács Zoltán, „Megbízhatóság, karbantartás,” egyetemi jegyzet, Veszprém: Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2002.
- [16] Ultra Precision Control Systems Ltd., „Health & Usage Monitoring Systems,” <https://www.ultra-pcs.com/platform-support/health-usage-monitoring-systems/>. (Hozzáférés dátuma: 2023.03.30.)

- [17] US Joint Helicopter Safety Implementation Team, „Health and Usage Monitoring Systems Toolkit,” <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/4682.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.03.30.)
- [18] Zebo Peng, „Built-In Self Test (BIST),” <https://studylib.net/doc/13109299/built-in-self-test--bist-lecture-10-zebo-peng-embedded-s> (Hozzáférés dátuma: 2023.04.01.)
- [19] Miron Abramovici, Melvin A. Breuer és Arthur D. Friedman, „Digital Systems Testing and Testable Design,” New York: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [20] J.A. Butler, „Application and evaluation of Built-In-Test (BIT) techniques in building safe systems,” *CrossTalk*, vol 1, no. 9, pp. 15-20, 2006.
- [21] Racal Instruments, „Exploring the Boundaries Of Built in Test,” *EDN Asia*, vol.1, no. 7, pp. 42-44, 2004.
- [22] Molnár Zsolt, „A beépített tesztelés és alkalmazhatósága elektronikai rendszerekben,” *Hadmérnök*, vol. II, no. 1, pp. 180-185, 2007.
- [23] IEEE Computer Society, „IEEE Std 1149.1-2013 - IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Architecture,” New York, 2013.
- [24] dr. Kohut József, Molnár Zsolt, „Analog és digitális áramkörök tesztelése és programozása peremfigyeléssel 2.: A peremfigyelés regiszterei, utasításai,” *Magyar Elektronika*, vol. 24, no. 12, pp. 25-27, 2007.
- [25] XJTAG Limited, „BSDL & SVF File Formats,” <https://www.xjtag.com/about-jtag/bsdl-files/bsdl-and-svf-file-formats/>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.29.)
- [26] Parta Garai, Chaitali Biswas Dutta, „Digital and Mixed Signal Testing Technology the Standards IEEE 1149.1 and IEEE 1149.4,” *International Journal of Computer & Organization Trends*, vol. 1, no. 3, pp. 40-44, 2011.
- [27] IEEE Computer Society, „IEEE Std 1149.4-2010 - IEEE Standard for a Mixed-Signal Test Bus,” New York, 2011.
- [28] Stephen K. Sunter, „Implementing and Using a Mixed-Signal Test Bus,” LogicVision, Inc., Oregon, 2004.
- [29] IEEE Computer Society, „IEEE Std 1149.6-2015 - IEEE Standard for Boundary-Scan Testing of Advanced Digital Networks,” New York, 2015.
- [30] dr. Kohut József, Molnár Zsolt, „Analog és digitális áramkörök tesztelése és programozása peremfigyeléssel 12.: A peremfigyelés alkalmazása a korszerű rendszerekben,” *Magyar Elektronika*, vol. 25, no. 12, pp. 34-37, 2008.
- [31] IEEE Computer Society, „IEEE Std 1149.7-2022 - IEEE Standard for Reduced-Pin and Enhanced Functionality Test Access Port and Boundary-Scan Architecture,” New York, 2022.
- [32] IEEE Computer Society, „IEEE Std 1149.10-2017 - IEEE Standard for High-Speed Test Access Port and On-Chip Distribution Architecture,” New York, 2017.
- [33] Kenneth P. Parker, „The Boundary-Scan Handbook,” Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

- [34] Harry Bleeker, Frans de Jong, Peter van den Eijnden, „Boundary Scan Test - A Practical Approach,” Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [35] Molnár Zsolt, „Védelmi célú elektronikai eszközök rendszerszintű tesztelésének kérdései,” Hadmérnök, vol. 2, no. 4, pp. 101-117, 2007.
- [36] T. I. Inc., „IEEE Std 1149.1 (JTAG) Testability Primer,” Dallas: Texas Instruments, 1997.
- [37] JTAG Technologies B. V., „Board DFT Guidelines for PCB Testing and In-System-Programming,” Eindhoven, 2019.
- [38] SJTAG Core Group, „System JTAG White Paper,” Tallin, 2005.
- [39] dr. Kohut József, Molnár Zsolt, „Analog és digitális áramkörök tesztelése és programozása peremfigyeléssel 3.: A kevert jelű peremfigyelés,” Magyar Elektronika, vol. 25, no. 1-2, pp. 30-32, 2008.
- [40] Texas Instruments Incorporated, „SN54ACT8990, SN74ACT8990 Test Bus Controllers,” Dallas, 1997, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54act8990.pdf?ts=1694012956448>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.13.)
- [41] Texas Instruments Incorporated, „SN54LVT8980A, SN74LVT8980A Embedded Test-Bus Controllers,” Dallas, 2004, <https://www.ti.com/lit/gpn/SN74LVT8980A>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.13.)
- [42] Texas Instruments Incorporated, „SN54ACT8997, SN74ACT8997 Scan Path Linkers,” Dallas, 2023, <https://www.ti.com/lit/gpn/SN54ACT8997>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.13.)
- [43] Texas Instruments Incorporated, „SN54LVT8996, SN74LVT8996 3.3-V ABT 10-Bit Addressable Scan Ports Multidrop-Addressable TAP Transceivers,” Dallas, 2022, <https://www.ti.com/lit/gpn/sn74lvt8996>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.13.)
- [44] Texas Instruments Incorporated, „SN54LVT8986, SN74LVT8986 3.3-V Linking Addressable Scan Ports Multidrop-Addressable Tap Transceiver,” Dallas, 2007, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvt8986.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.14.)
- [45] Texas Instruments Incorporated, „SCANSTA111 Enhanced scan bridge multidrop addressable IEEE 1149.1 (JTAG) port,” Dallas, 2013, <https://www.ti.com/lit/gpn/scansta111>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.15.)
- [46] Texas Instruments Incorporated, „SCANSTA112 7-port multidrop IEEE 1149.1 (JTAG) multiplexer,” Dallas, 2013, <https://www.ti.com/lit/gpn/SCANSTA112>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.15.)
- [47] Texas Instruments Incorporated, „SCANSTA101 Low Voltage IEEE1149.1 System Test Access (STA) Master,” Dallas, 2013, <https://www.ti.com/lit/gpn/scansta101>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.13.)
- [48] Texas Instruments Incorporated, „AN-1259 SCANSTA112 Designer's Reference,” Dallas, 2013, <https://www.ti.com/lit/pdf/snla055>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.15.)
- [49] Texas Instruments Incorporated, „SCANSTA476 8-input IEEE 1149.1 analog voltage monitor,” Dallas, 2013, <https://www.ti.com/lit/gpn/SCANSTA476>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.16.)

- [50] Texas Instruments Incorporated, „AN-1200 Mixed Signal Testing Using the IEEE 1149.4 STA400,” Dallas, 2004, <https://www.ti.com/jp/lit/pdf/snla052>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.16.)
- [51] Rahman Dashti, Mohammad Daisy, Hamid Mirshekali, Hamid Reza Shaker, Mahmood Hosseini Aliabadi, „A survey of fault prediction and location methods in electrical energy distribution networks,” *Measurement*, vol. 184, 2021.
- [52] Mudita Uppal, Deepali Gupta, Sapna Juneja, Adel Sulaiman, Khairan Rajab, Adel Rajab, M. A. Elmagzoub, Asadullah Shaikh, „Cloud-Based Fault Prediction for Real-Time Monitoring of Sensor Data in Hospital Environment Using Machine Learning,” *Sustainability*, vol. 14, 2022.
- [53] M. S. Pavana, M. N. Pushpalatha, A. Parkavi, „Software Fault Prediction Using Machine Learning Algorithms,” *ICAECT 2021: Advances in Electrical and Computer Technologies*, Singapore, 2022.
- [54] Prashanth S., R. Sucheta, Vishva R., Ganesh Kumar T. R., Navya Mohan, „BIST Based Aging Fault Prediction Using Machine Learning,” *Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Coimbatore, 2021.
- [55] Shaohua Qi, Xiaopeng Cui, Zuwei Ping, Nanliang Shan, Zhong Li, Xianqiang Bao és Xinghua Xu, „Deep Learning Techniques in Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Industrial Systems: A Review,” *Sensors*, vol. 23, no. 3, 2023.
- [56] James Li, „Reliability Comparative Evaluation of Active Redundancy vs. Standby Redundancy,” *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 1, no. 3, pp. 122-129, 2016.
- [57] Zhenyu Yang, „A Hybrid System Approach towards Redundant Fault-Tolerant Control Systems,” *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 987-992, Sydney, 2000.
- [58] National Instruments, „Redundant Systems: Definition & System Redundancy Models,” 2023, <https://www.ni.com/hi-hu/shop/electronic-test-instrumentation/add-ons-for-electronic-test-and-instrumentation/what-is-systemlink-tdm-datafinder-module/what-is-rasm/redundant-system-basic-concepts.html>. (Hozzáférés dátuma: 2023.05.22.)
- [59] Molnár Zsolt, „A terepi elektronikai eszközök beépített öntesztelésének lehetőségei,” *Hadmérnök*, vol. III, no. 4, pp. 154-164, 2008.
- [60] John B. Willis, Mark J. Davis, „Distributed Sensor Networks on The Future Battlefield, Technical Report,” 2000, <http://www.orcen.usma.edu/Research%20Projects/Previous%20Projects/AY00/Tech%20Reports/WEBSDist.SensorNetworkTechReport.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.23.)
- [61] Atif Ali, Yasir Khan Jadoon, Sabir Ali Changazi, Muhammad Qasim, „Military Operations: Wireless Sensor Networks based Applications to Reinforce Future Battlefield Command System,” *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference*, Bahawalpur, 2020.
- [62] Mark Tondra, Albrecht Jander, Catherine Nordman, John Anderson, Zhenghong Qian, Dexin Wang, „3-axis magnetometers using spin dependent tunneling: reduced size and power,” *Proceedings of SPIE*, vol. 5090, pp 208-213, 2003.

- [63] GlobalSecurity, „AN/GSQ-187 Remote Battlefield Sensor System (REMBASS), Improved Remote Battlefield Sensor System (IREMBASS),” 2011, <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/rembass.htm>. (Hozzáférés dátuma: 2023.05.17.)
- [64] Dr. Haig Zsolt, „Networked Unattended Ground Sensors for Battlefield Visualization,” AARMS, vol. 3, no. 3, pp. 387-400, 2004.
- [65] Molnár Zsolt, „Analóg áramkörök peremfigyeléses vizsgálata a gyakorlatban,” ElektroNET, vol. 15, no. 5, pp. 24-26, 2006.
- [66] Molnár Zsolt, „Impedancia mérése analóg peremfigyeléssel,” A tudomány iskolája a Kandóban: II. tudományos szimpózium, 2007.
- [67] Molnár Zsolt, „Analog cluster test using mixed signal boundary scan test method,” Proceedings of Factory Automation 2013 : Gyártás-automatizálás = Factory automation, pp. 88-99, Veszprém, 2013.
- [68] Molnár Zsolt, „Analóg áramkörök beépített öntesztbe vonását támogató integrált áramkör,” XXV. Kandó Konferencia: 40 év a villamosmérnök képzésben, 1969-2009, pp. 1-11, Budapest, 2009.
- [69] D. H. Sheingold, Multiplier Application Guide, Cambridge: Analog Devices, Inc., 1978.
- [70] Analog Devices, „MT-085 - Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS),” Wilmington, 2009, <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-085.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.05.10.)
- [71] Analog Devices Inc., „LT3080 Adjustable 1.1A Single Resistor Low Dropout Regulator,” Wilmington, 2020, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3080fc.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.05.10.)
- [72] Analog Devices Inc., „ADN8810 12-Bit High Output Current Source,” Wilmington, 2017, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADN8810.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.05.10.)
- [73] Linear Technology Inc., „LT3083 Adjustable Single Resistor Low Dropout Regulator,” Milpitas, 2012, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3083fa.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.05.10.)
- [74] Molnár Zsolt, dr. Kohut József, „Analóg áramkör funkcionális tesztelése digitális peremfigyeléssel,” Elektronikai technológia, mikrotechnika, vol.48, no. 1-2, pp. 10-15, 2009.
- [75] P. Hansen, „Testing conventional logic and memory clusters using boundary scan devices as virtual ATE channels,” Proceedings. 'Meeting the Tests of Time' International Test Conference, pp. 166-173, Washington, 2006.
- [76] Molnár Zsolt, dr. Kohut József, „Analóg áramkör funkcionális tesztelése digitális peremfigyeléssel,” XXIV. Nemzetközi Kandó Konferencia 2008 : 110 év a műszaki képzés és kutatás szolgálatában, Budapest, 2008.
- [77] JTAG Technologies, „JTAGTAPS High-Performance Boundary-Scan Controllers,” JTAG Technologies B.V., Eindhoven, 2009.

- [78] Texas Instruments Inc., „SN74ABT18502 Scan Test Devices With 18-Bit Universal Bus Transceiver,” Texas Instruments Inc., 2023, <https://www.ti.com/product/SN74ABT18502>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.21.)
- [79] Texas Instruments Inc., „SN74ABT18504 Scan Test Devices With 20-Bit Universal Bus Transceivers,” Texas Instruments Inc., 2023, <https://www.ti.com/product/SN74ABT18504>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.21.)
- [80] Colin Walls, „Self-test strategies for embedded systems,” Tech Design Forum, 2019, <https://www.techdesignforums.com/practice/technique/self-test-strategies-for-embedded-systems/>. (Hozzáférés dátuma: 2023.08.11.)
- [81] Georg Macher, Andrea Höller, Eric Armengaud, Christian Kreiner, „Safety- Critical Embedded System Multi-Core Migration Pattern,” 20th European Conference on Pattern Languages of Programs - EuroPlop'15, Irsee, 2015.
- [82] Jon Perez Cerrolaza, Roman Obermaisser, Jaume Abella, Francisco J. Cazorla, Kim Grüttner, Irune Agirre, Hamidreza Ahmadian, Imanol Allende, „Multi-core Devices for Safety-critical Systems: A Survey,” ACM Computing Surveys, vol.53, no. 4, pp. 1-38, 2020.
- [83] Molnár Zsolt, „Logging the operation and enhancing the reliability of safety-critical embedded systems using self-test,” Interdisciplinary Description of Complex Systems, vol. 17, no. 3, pp. 492-496, 2019.
- [84] Tong Jia, Ying Li, Chengbo Zhang, Wensheng Xia, Jie Jiang és Yuhong Liu, „Machine Deserves Better Logging: A Log Enhancement Approach for Automatic Fault Diagnosis,” IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops, pp. 106-111, Memphis, 2018.
- [85] Brian Harrington, „BIST for Analog Weenies,” Analog Dialogue, no. 42, pp. 11-15, 2008.01.
- [86] Gert Jervan, „High-Level Test Generation and Built-In Self-Test Techniques for Digital Systems,” Linköping: Linköping University, 2002.
- [87] Paul H. Bardell, W. H. McAnney, J. Savir, „Built In Test for VLSI: Pseudorandom Techniques,” New Jersey: Wiley, 1987.
- [88] M. Chatterjee, D. K. Pradhan, „A novel pattern generator for near-perfect fault-coverage,” Proceedings 13th IEEE VLSI Test Symposium, pp. 417-425, Princeton, 1995.
- [89] Robert Oshana, Mark Kraeling, „Software Engineering for Embedded Systems”, Amsterdam: Elsevier Inc., 2013, pp. 183-204.
- [90] J. P. Hofmeister, P. Lall, D. Panchagade, N. N. Roth, Terry A. Tracy, Justin B. Judkins, Kenneth L. Harris, „Ball Grid Array (BGA) Solder Joint Intermittency Detection: SJ BIST,” 2008 IEEE Aerospace Conference, pp. 1-11, Big Sky, 2008.
- [91] Nishant Govindrao Pandharpurkar, V. Ravi, „Design of BIST using Self-Checking Circuits for Multipliers,” Indian Journal of Science and Technology, vol. 8, no. 19, pp. 1-7, 2015.
- [92] H. Al-Asaad, B.T. Murray, J.P. Hayes, „Online BIST for embedded systems,” IEEE Design & Test of Computers, vol. 15, no. 4, pp. 17-24, 1998.

- [93] Steve Sunter, „Essential principles for practical analog BIST,” EDN, vol. 55, no. 21, pp. 36-39, 2010.
- [94] Manoj Sachdev, „A realistic defect oriented testability methodology for analog circuits,” Journal of Electronic Testing, no. 6, pp. 265-276, 1995.
- [95] Soham Roy, Spencer K. Millican és Vishwani D. Agrawal, „Machine Intelligence for Efficient Test Pattern Generation,” 2020 IEEE International Test Conference (ITC), pp. 1-5, Washington, 2020.
- [96] Neil G. Jacobson, The In-System Configuration Handbook: A Designer’s Guide to ISC, New York: Springer, 2004.
- [97] ASSET InterTech, Inc., „Serial Vector Format Specification,” Plano, 1999.
- [98] Géher Károly, Lineáris hálózatok, Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1968, pp. 108-116
- [99] G. Devadasu, Dr. M. Sushama, „Accurate Detection of Harmonics due to Nonlinear loads in Power System Network Using FFT Analyses,” International Journal of Engineer Sciences & Research Technology, vol. 6, no. 3, pp. 156-166, 2017.
- [100] Molnár Zsolt, „Integrated circuit for military and defense purposes, supporting the testing of analog circuits with use of bist,” Hadmérnök, vol. 8, no. 1, pp. 345-355, 2013.
- [101] Molnár Zsolt, „Biztonságkritikus beágyazott rendszerek analóg részegységeinek vizsgálatát támogató bővítés a soros vektoros formátum specifikációjához,” Biztonságtudományi Szemle, vol. 5, no. 3, pp. 77-89, 2023.
- [L1]⁷⁹ David J. Smith, Reliability, Maintainability and Risk, Oxford: Elsevier Ltd., 2011.
- [L2] Abdil Rashid Mohamed, „Built-In Self-Test (BIST),” Embedded Systems Laboratory (ESLAB) Linköping University, Sweden, <https://www.ida.liu.se/~zebpe83/teaching/test/lec12.pdf>. (Hozzáférés dátuma: 2023.04.01.)
- [L3] Hussain Al-Asaad, Mayank Shringi, „On-Line Built-in Self Test for Operational Faults,” 2000 IEEE Autotestcon Proceedings. IEEE Systems Readiness Technology Conference, pp. 168-174, Anaheim, 2000.

⁷⁹ Az „L” betűvel kezdődő forrásjelölések csak lábjegyzetekben szerepelnek.

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

A/D átalakító	Analóg-digitális átalakító
ABM	Analog Boundary Module – analóg peremfigyelő cella
AC	Alternating Current – váltóáram
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line – aszimmetrikus digitális előfizetői vonal
ASP	Addressable Scan Port – címezhető peremfigyelés port
ATAP	Analog Test Access Port – analóg TAP (lásd TAP)
ATE	Automated/Automatic Test Equipment – automatikus tesztelő berendezés
BIST	Built-In Self Test – beépített önteszt
BIT	Built-In Test – beépített teszt
BSC	Boundary Scan Cell – peremfigyelő cella
BSDL	Boundary Scan Description Language – peremfigyelés leíró nyelv
CBIT	Continuous Built-In Test – folyamatosan futó beépített teszt
cJTAG	Compact JTAG – kétvezetékes JTAG port/szabvány
D/A átalakító	Digitális-analóg átalakító
DBM	Digital Boundary Module – digitális peremfigyelő cella
DC	Direct Current – egyenáram
DDS	Direct Digital Synthesis – közvetlen digitális szintézis (jelgenerálás)
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer – több DSL vonal adatfolyamának nagysebességű DSL vonalra juttatásáért felelős egység
DSP	Digital Signal Processor – digitális jelfeldolgozó processzor
ECID	Electronic/Exclusive Chip Identification – egyedi chip azonosító
ECK	External Clock – külső órajel
EMC	Electromagnetic Compatibility – elektromágneses összeférhetőség
ESD	Electrostatic Discharge – elektrosztatikus kisülés
ETE	External Test Equipment – külső tesztvezérlő
FFT	Fast Fourier Transformation – gyors Fourier transzformáció
FLASH	nem felejtő számítógépes adattároló
FLTS	First Line Test Set – egyszerű külső teszter
FPGA	Field Programmable Gate Array - felhasználás helyén programozható logikai kapumátrix
GND	Ground – földpont, referenciapont
GPS	Global Positioning System – globális helymeghatározó rendszer
HSTAP	High-Speed Test Access Port – nagysebességű TAP (lásd TAP)
HUMS	Health and Usage Monitoring System – állapotjelzéseket, működőképességet és a használatot jelző rendszer
IBIT	Initiated Built-In Test – indított önteszt
IR	Instruction Register – utasításregiszter
JTAG	Joint Test Action Group – egy szervezet neve, de a peremfigyelés szabványára is hivatkoznak így
LFSR	Linear-Feedback Shift Register – lineárisan visszacsatolt léptetőregiszter
LSI	Large Scale Integration – nagymértékben integrált áramkör

LVDS	Low Voltage Differential Signaling – alacsony feszültségszintű, differenciális jelátvitel
MBIT	Maintainance Built-in Test – karbantartási célú beépített teszt
MEMO	Monitor of Enemy Movement – ellenség mozgását figyelő rendszer
MSI	Medium Scale Integration – közepes mértékben integrált áramkör
MSPS	Megasamples Per Second – másodpercenkénti mintavételezések száma (1 MSPS = 10 ⁶ minta/s)
MTM-Bus	Module Test & Maintenance Bus – hátlapi (backplane) tesztelési és karbantartási célú busz
PEDDA	Packet Encoder/Decoder and Distribution Architecture – csomag kódoló/dekódoló és elosztó architektúra
PI	Parallel Input – párhuzamos bemenet
PLD	Programmable Logic Device – programozható logikai eszköz
PO	Parallel Output – párhuzamos kimenet
PWM	Pulse Width Modulation – impulzusszélesség moduláció
REMBASS	Remote Battlefield Acoustic and Seismic System – felügyelet nélküli akusztikus és szeizmikus érzékelő rendszer
RF	Radio Frequency – rádiófrekvencia/rádiófrekvenciás
SAR	Successive Approximation – fokozatosan közelítő (A/D átalakító)
SBIT	Startup Built-in Test – bekapcsolási beépített teszt
SERDES	Serializer/Deserializer – soros-párhuzamos átalakító/visszaalakító
SI	Serial Input – soros bemenet
SO	Serial Output – soros kimenet
SoC	System on Chip – az összes lényeges áramköri egységet egy chipen integráló rendszer
SSI	Small Scale Integration – kismértékben integrált áramkör
SVF	Serial Vector Format – soros vektoros formátum
TAP	Test Access Port – a peremfigyeléses tesztelés portja
TBIC	Test Bus Interface Circuit – tesztbusz-interfész áramkör
TCK	Test Clock – a peremfigyeléses tesztelés órajele/órjel vonala
TDI	Test Data Input – a peremfigyeléses tesztelés adat bemeneti jele/vonala
TDO	Test Data Output – a peremfigyeléses tesztelés adat kimeneti jele/vonala
TDR	Test Data Register – tesztadat regiszter
TMS	Test Mode Select – a peremfigyeléses tesztelés teszt üzemmód kiválasztó jele/vonala
TPG	Test Pattern Generator – tesztminta generátor
TRST	Test Reset – a peremfigyeléses tesztelésnél a TAP vezérlőt alaphelyzetbe állító jel/vonal
TTL	Transistor–Transistor Logic – az egyik elterjedt logikai rendszer, amely bipoláris tranzisztorokra épül
VLSI	Very Large Scale Integration – nagyon nagymértékben integrált áramkör

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat - Az eredő meghibásodási görbét alkotó komponensek és jellemzőik.....	12
2. táblázat – Az ATAP meghajtásával és érzékelésével kapcsolatos követelmények.....	67
3. táblázat – A tervezett integrált áramkör egyedi utasításai.....	78
4. táblázat – A tervezett integrált áramkör regisztereinek előzetes listája.....	79
5. táblázat – Az SVF parancsok listája.....	104
6. táblázat – Az SVF jelenlegi parancsrendszerének kibővítésére javasolt parancsok	106
7. táblázat – A felhasznált IEEE 1149.4 utasítások és kódjuk	107

ÁBRÁK JEGYZÉKE

1. ábra – Az eredő meghibásodási görbe (kádgörbe) és komponensei	11
2. ábra – Áramkörvizsgálat külső teszterrel	14
3. ábra – Áramkörvizsgálat egy lehetséges módja beépített teszteléssel	15
4. ábra – A nem-konkurens öntesztelés idődiagramja	17
5. ábra – Az IEEE 1149.1 szabvány szerinti peremfigyeléses hurok kialakítása	23
6. ábra – Egy peremfigyelés lehetőségével rendelkező digitális áramkör vázlatos felépítése	23
7. ábra – A peremfigyelő cellák kapcsolódása	24
8. ábra – Példa két kötelező és két opcionális tesztadat regiszter implementálására	26
9. ábra – Az IEEE 1149.4 szabvány szerinti peremfigyeléses hurok kialakítása	30
10. ábra – Egy IEEE 1149.4 szabvánnyal kompatibilis alkatrész vázlatos felépítése	31
11. ábra – A TBIC felépítése	32
12. ábra – Egy analóg lábra csatlakozó ABM felépítése	32
13. ábra – Peremfigyeléssel való vezérlési lehetőséggel rendelkező órajel-forrás kialakítása	41
14. ábra – Gyűrű szerkezetű rendszer szintű peremfigyeléses hurok	42
15. ábra – Csillag szerkezetű rendszer szintű peremfigyeléses hurok	42
16. ábra – Multidrop szerkezetű rendszer szintű peremfigyeléses hurok kialakítása	43
17. ábra – Az 54ACT8990 tesztbusz vezérlő felépítése	45
18. ábra – Az 54LVT8980a beágyazott tesztbusz-vezérlő alkalmazása	46
19. ábra – A 74LVT8996 címezhető peremfigyeléses port blokkvázlata	47
20. ábra – Példa a SCANSTA101 és SCANSTA112 áramkörök alkalmazására	49
21. ábra – A SCANSTA476 belső felépítése	50
22. ábra – Az STA400 belső felépítése	50
23. ábra – A mágneses teret érzékelő felügyelet nélküli szenzor lehetséges felépítése	59
24. ábra – A jelkondicionáló áramkör környezetének kialakítása peremfigyeléses vizsgálatához	60
25. ábra – Az analóg mérésekhez szükséges erőforrások csatlakozása (IEEE 1149.4)	64
26. ábra – Impedancia mérése kivezetés és föld között	65
27. ábra – Unipoláris PWM jel	71
28. ábra – A gerjesztés moduljának blokkvázlata	74
29. ábra – Az érzékelés moduljának blokkvázlata	76
30. ábra – A tervezett integrált áramkör belső felépítése	77
31. ábra – A JT3710/USB TAP vezérlő	87
32. ábra – Az ADSL központ egy csatornájának erősítőfokozata	87

33. ábra - Az erősítő felfutó élre adott válasza.....	88
34. ábra – Az erősítő lefutó élre adott válasza.....	88
35. ábra – A komparátor be- és kimeneti jelei.....	89
36. ábra – A komparátor transzfer karakterisztikája.....	89
37. ábra – A teszter blokkvázlata	90
38. ábra – Az első csatorna jeleinek definiálása	90
39. ábra – Az első analóg csatorna vizsgálata.....	91
40. ábra – Az első csatorna tesztjének eredménye	92
41. ábra - A célkészülék valamint a naplózó és öntesztelést végző kiegészítő egységek kapcsolata	98
42. ábra – SVF fájl minta	105
43. ábra – Magáramkörön belüli ellenállás mérése.....	107
44. ábra – SVF fájl a magáramkörön belüli ellenállás méréséhez	108
45. ábra – Ellenállásosztó mérése két integrált áramkör között.....	109
46. ábra – SVF fájl egy ellenállásosztó elemeinek megméréséhez	110
47. ábra – RC tag elemeinek mérése két integrált áramkör között	111
48. ábra – SVF fájl egy RC tag elemeinek megméréséhez	112
49. ábra – A modellezéshez és a vizsgálathoz használt áram és feszültség irányok	114