

**EXTENSION TO THE SERIAL
VECTOR FORMAT SPECIFICATION SUP-
PORTING TESTING OF
ANALOG UNITS OF
SAFETY-CRITICAL
EMBEDDED SYSTEMS**

**BIZTONSÁGKRITIKUS BEÁGYAZOTT
RENDSZEREK ANALÓG
RÉSZEGYSÉGEINEK VIZSGÁLATÁT
TÁMOGATÓ BŐVÍTÉS A SOROS
VEKTOROS FORMÁTUM
SPECIFIKÁCIÓJÁHOZ**

MOLNÁR Zsolt¹

Abstract

In safety-critical embedded systems, the built-in self-test is an important tool to increase reliability. Embedded self-test solutions for digital circuits are much more sophisticated than for analog circuits. In this paper, my goal is to facilitate the built-in self-testing of analog circuit components and subcircuits using the solution described here. I am trying to achieve this by extending the SVF specification used for boundary scan testing of digital circuits. With the extended command set, it is possible to generate excitation current signals to measure the parameters of analog components or subcircuits, and to detect and measure the response voltages of the circuit.

Keywords

safety critical embedded system, built-in self-test, boundary scan, IEEE 1149, SVF, mixed signal testing

Absztrakt

A biztonságkritikus beágyazott rendszerekben a beépített önteszt fontos eszköz a megbízhatóság növelésére. A beépített önteszt megoldásai digitális áramköri egységekre sokkal kidolgozottabbak, mint az analóg áramkörökre. Jelen tanulmányomban célom, hogy az itt ismertetett megoldással segítsen az analóg áramköri részegységek beépített öntesztbe vonását. Ezt olyan módon igyekszem elérni, hogy a digitális áramkörök peremfigyeléses teszteléséhez használt SVF specifikációt kibővítem. A kibővített parancskészlettel lehetővé válik az analóg alkatrészecskék vagy részegységek paramétereinek méréséhez szükséges gerjesztő áramjelek előállítása, és az áramkör válaszfeszültségeinek érzékelése, megmérése.

Kulcsszavak

biztonságkritikus beágyazott rendszer, beépített önteszt, peremfigyelés, IEEE 1149, SVF, kevert jelű vizsgálat

¹ molnar.zsolt@kvk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0000-8794-292X | assistant lecturer, Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, Óbuda University | egyetemi tanársegéd, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

BEVEZETÉS

A beágyazott rendszer egy speciális, előre meghatározott, optimalizált felépítésű, feladat vagy feladathalmaz ellátására létrehozott, intelligenciával 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 a működtető program is. Mivel a hardver feladat-orientált, így egyedi vagy speciális kiegészítő elemeket (perifériákat) igényel.

Szűkítve a beágyazott rendszerek körét, a biztonságkritikus 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 [3]. A kritikus beágyazott rendszereket elsődlegesen megbízhatóságra tervezik, így az olyan technikák és módszerek kutatása és kidolgozása során elért elméleti eredmények, amelyek alkalmasak a megbízhatóság növelésére, gyorsan gyakorlati hasznot hoznak. Az egyik ilyen megbízhatóságot növelő megoldás a beépített önteszt (built-in self-test).

A jelenlegi kritikus beágyazott rendszerekben általában létezik valamilyen szintű önteszt funkció. A beépített öntesztet 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 szűkköri. Kutatási munkám során célom, hogy a konkurens önteszt eszköztárát növeljem, elsősorban a peremfigyelés (boundary-scan) alkalmazásával.

A peremfigyeléses vizsgálat

A peremfigyelés alap gondolata, hogy az áramköröket egészében, vagy részegységeire bontva úgy vizsgálják, hogy a be- és kimeneti pontjai (fizikai kivezetései), és a magáramkör között egy-egy, a tesztelési feladatok elvégzésére alkalmas cellát (peremfigyelő cella) helyeznek 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 (IEEE 1149.1) [1] épülő többi szabványban leírtak ennél összetettebb, speciális, illetve nem csak digitális (hanem kevert jelű, azaz analóg és digitális jeleket is használó) vizsgálatot is támogatnak (az erre vonatkozó szabvány száma: IEEE 1149.4 [2]). A peremfigyeléses vizsgálatról, annak alkalmazásáról számos könyv, tanulmány és cikk jelent meg [4] [5] [6].

A következőkben két korábbi kutatási eredményemet ismertetem röviden, mert ezek ismeretében könnyebben értelmezhető jelen tanulmányom. Mindkét téma a kevert jelű peremfigyeléshez kapcsolódik, ezen belül az analóg áramköri egységek tesztelését célozza.

Korábbi eredményeim az analóg vizsgálatot támogató megoldások témájában

Az analóg áramkörök beépített öntesztbe vonását támogató integrált áramkör témáját azért kezdtem kutatni, mert nincs olyan integrált áramkör a piacon, amely képes lenne beépített önteszt során biztosítani a méréshez szükséges erőforrásokat (áramgenerátor, feszültségmérő, helyi vezérlő és járulékos funkciók). Az általam körvonalazott integrált áramkör [7] képes lenne ezt az űrt betölteni: DC és AC áram gerjesztést létrehozni, DC és AC válasz feszültséget mérni, elvégezni az eredmények képzéséhez szükséges számításokat, és az erőforrások vezérlését ellátni csupán az IEEE 1149.1 buszra csatlakozva. A működtetéséhez kidolgoztam a helyi parancsokat, azonban nincs meg az a felület a meglévő rendszerek felé, amely a digitális áramkörök vizsgálatához szükséges gerjesztő és válasz vektorokhoz hasonlóan alkalmas lenne analóg gerjesztések előállítására és a válaszok begyűjtésére.

A naplózás, az öntesztelés és a működés követése alkalmas arra, hogy bizonyos kiegészítő elemek és technikák alkalmazásával növeljék a rendszer működésének átláthatóságát és eredő biztonságát. Az általam felvázolt rendszer [8] képes arra, hogy az önteszt során

- helyettesítse az analóg és digitális információs peremfelületeken a normál üzemmódban várható jeleket, üzeneteket, parancsokat, kezelői beavatkozásokat előre meghatározott vizsgálati eseményekkel/jelekkel,
- regisztrálja azt, hogy milyen eseményekkel/jelekkel és mekkora időkésséssel válaszol a vizsgálati eseményekre a döntéshozó egység
- összehasonlítja a vizsgált rendszer válaszait a helyes (számított, vagy hibátlan egység működése közben felvett) válaszokkal, és dönt, hogy azok a megengedett hibahatáron belül rendben vannak-e

Ezen felül képes arra, hogy a naplózás során gyűjtse, tárolja és szükség esetén rendelkezésre bocsássa

- 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).

Mivel ebben a beépített öntesztelés és naplózást végző rendszerben szükséges analóg gerjesztéseket előállítani, és analóg válaszjeleket mérni, itt is szükség van egy olyan, a

meglévő szabványokhoz illeszkedő eszközre, amely alkalmas lenne analóg gerjesztések előállítására és a válaszok begyűjtésére.

Sajnos eddig nem állt rendelkezésre ilyen eszköz vagy megoldás, ezért jutottam arra a kutatásaim során, hogy a digitális áramkörökhöz használt soros vektoros formátumot kísérlem meg kibővíteni erre a célra.

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) azért fejlesztették ki, mert 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. [9] Példának hozható a teszteléshez szükséges adatok JTAG interfészen való letöltése a tesztvezérlőről a tesztelendő áramkörbe. 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 paramétereiből 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. [10]

A fenti összegzés azért fontos, mert ezeket a szabályokat kellett figyelembe vennem a specifikáció kibővítéséhez. A specifikációban rögzített parancsokat az alábbi táblázatban mutatom be, amelyet azért közlök, hogy látható legyen, hogy a kiegészítő parancskészlet megfelelően illeszkedik a meglévő parancsokhoz. (A paraméterezés és a parancsok értelmezése a specifikációban [10] megtalálható.)

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.

SVF parancs	A parancs működése
HDR	Meghatározza a fejlécmintát (Header Data Register tartalmát), amely a későbbi DR figyelés (scan) műveletek elejére kerül.
HIR	Meghatározza a fejlécmintát (Header Instruction Register tartalmát), amely a későbbi IR figyelés műveletek elejére kerül.
PIO	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)
PIOMAP	Párhuzamos tesztminta esetén PIO oszlopokat rendel hozzá logikai kivezetésekhez. Megadja, hogy azok bemenetek vagy kimenetek.
RUNTEST	Futtatás állapotba kényszeríti az IEEE 1149.1 busz meghatározott számú órajelig vagy egy meghatározott időtartamra.
SDR	Az IEEE 1149.1 adatregiszterének (DR) kiolvasását végzi.
SIR	Az IEEE 1149.1 utasításregiszterének (IR) kiolvasását végzi.
STATE	Az IEEE 1149.1 buszt egy meghatározott stabil állapotba kényszeríti.
TDR	Meghatározza az DR figyelési (scan) műveletek végéhez csatolt kivezető mintát (Trailer Data Register).
TIR	Meghatározza az IR figyelési (scan) műveletek végéhez csatolt kivezető mintát (Trailer Instruction Register).
TRST	Az opcionális TRST vonalat vezérli.

1. Táblázat: Az SVF parancsok listája, saját szerkesztés [10] alapján

A SOROS VEKTOROS FORMÁTUM PARANCSRENDSZERÉNEK JAVASOLT KIEGÉSZÍTÉSE KEVERT JELŰ TESZTELÉSHEZ

A javaslat célja, hogy egy olyan kiegészítő parancskészlet kerüljön a specifikációban 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 az előzőekben említett, 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 korábbi cikkemben [8] 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 specifikáció és az alábbi logika szerint tovább bővíthető. A javasolt parancsrendszer-elemeket a következő táblázat tartalmazza.

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 μA -ben kell megadni)
GAC (<i>aci</i>) (<i>freq</i>)	Áramgenerátorral <i>aci</i> csúcserősségű, <i>freq</i> frekvenciájú, szinusz jelalakú áram létrehozása az AT1 vezetékrendszeren. (<i>aci</i> értékét μA -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 csúcserősségének 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 μs -ban kell megadni)

2. Táblázat: Az SVF jelenlegi parancsrendszerének kibővítésére javasolt parancsok, saját szerkesztés

PÉLDÁK A JAVASOLT PARANCSSZISZTER-ELEMEK HASZNÁLATÁVAL TÖRTÉNŐ MÉRÉSEKRE

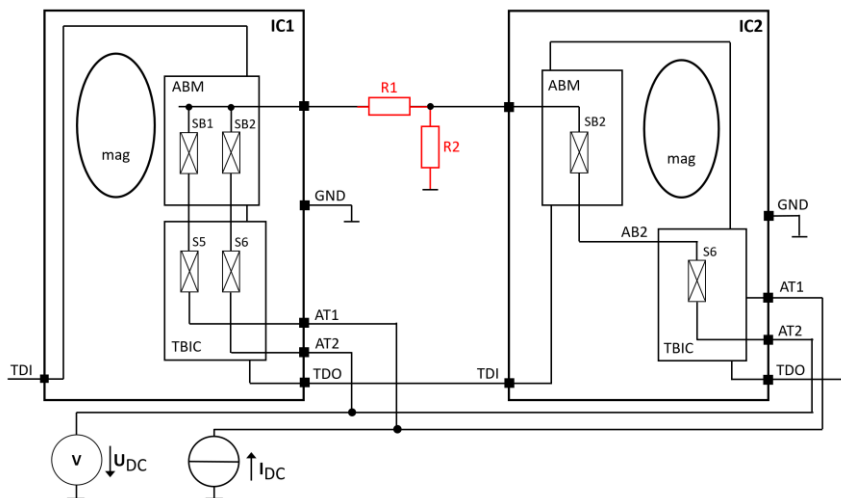
A következőkben az új parancsrendszer-elemek használatára kidolgozott számos példából két egyszerűbbet ismertetek. Ezek általános, de a valóságos áramkörökben is előforduló alapáramkörök paramétereinek mérését mutatják be. Terjedelmi okok miatt az alkalmazhatóság vizsgálatára kidolgozott számos példából csak hármatot mutatok be. 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:

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

3. Táblázat: A felhasznált IEEE 1149.4 utasítások és kódjuk, saját szerkesztés [1] alapján

Feszültségosztó ellenállásainak meghatározása két integrált áramkör között

A probléma vázlatát az 1. ábra mutatja.



1. Ábra: Ellenállásosztó mérése két integrált áramkör között, saját szerkesztés

Az ábrázolt részletben két integrált áramkör van (IC1 és IC2), és az SVF fájl megírásához feltételezem, hogy a peremfigyeléses láncban előttük és utánuk sincs 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 ABM²-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, a 2. ábrán látható. (A sorok elején található sorszámozás csupán az azonosítást szolgálja, szintaktikailag a program ebben a formában helytelen.)

A program 13...15. és 21...24. sorában alkalmazom az általam javasolt új parancsrendszer-elemeket. A fájlban hivatkozott, kapcsolókat vezérlő minták (p0, P0, p1, P1, p3 és P3) értékeit [1] 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). Mindkét mérési fázisban 3 vezetékes mérést valósít meg a program, ez kedvezően befolyásolja a mérés állandó hibáját. R1 és R2 a következőképpen számítható ki:

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

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

² Analog Boundary Module, analóg peremfigyelő cella

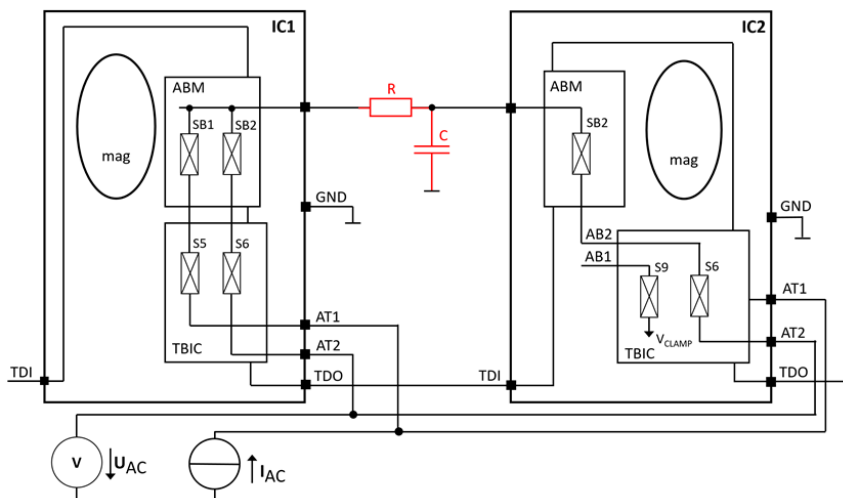
1.	TRST ON;	// alaphelyzetbe állítás
2.	TRST OFF;	
3.	ENDIR IDLE;	// az utasítás-küldés végállapota: IDLE
4.	ENDDR IDLE;	// az adatküldés végállapota: IDLE
5.	HDR 0;	// TDO irányban IC2 után nincs több
6.		// alkatrész a BSC vonalon, nincs fejléc
7.	TDR 0;	// TDI irányban IC1 előtt nincs több
8.		// 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

2. Ábra: SVF fájl egy ellenállásosztó elemeinek megmérésehez, saját szerkesztés

RC tag elemeinek meghatározása 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 a peremfigyeléses láncban előttük és utánuk sincs másik integrált áramkör.

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).



3. Ábra: RC tag elemeinek mérése két integrált áramkör között, saját szerkesztés

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

4. Ábra: SVF fájl egy RC tag elemeinek megmérése, saját szerkesztés

A fájlban hivatkozott, kapcsolókat vezérlő minták (p0, P0, p1, P1, p2, P2, p3 és P3) értékeit [1] 29. oldalán található Table 1 és 47. oldalán található Table 6 alapján határozta meg. A mérés során tehát az AC gerjesztés hatására létrejövő feszültséget (annak csúcserékét) 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 csúcseréke. U_1 és U_2 ismeretében a két elem, R és C értéke a következőképpen határozható meg³ (Z_1 az RC tag impedanciája f_1 frekvencián, ω_0 pedig a törésponti körfrekvencia):

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

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

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

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

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

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

Általános négy-pólus (általános analóg klaszter) paramétereinek meghatározása és egyéb alkalmazások

Korábbi cikkemben [11] elemzést végeztem, amelyben azt igyekeztem kutatni és igazolni, hogy a kevert jelű peremfigyelés módszerével elvégezhető-e egy általános négy-pólus paramétereinek meghatározása a kevert jelű peremfigyeléssel. 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 paraméterek meghatározása során a fenti egyenletek szerint, különböző csoportokba sorolható négy-pólusok esetén a következő feladatok vannak:

- Lineáris, reaktív elemet nem tartalmazó négy-pólusok esetén a gerjesztés DC vagy AC áram, mérni DC vagy AC feszültséget kell.
- Lineáris, reaktív elemet tartalmazó négy-pólusok 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 négy-pólusok 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 négy-pólusok AC gerjesztéssel is mérhetőek, ahogyan azt a következő pontban ismertetem.

³ A levezetés néhány lépését a tömörség miatt összevontam vagy kihagytam

- A nemlineáris frekvenciafüggő négy-pólusokat (szinuszos) AC gerjesztéssel kell meghajtani. A lineáris torzítás miatt a gerjesztés hatására létrejövő válasz-feszültség felharmonikusokat fog tartalmazni, amelyek értékéből lehet következtetni a négy-pólus felépítésére. 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 korábbi cikkemben [11] megtalálható Z paraméterek meghatározására szolgáló egyenletekből jól látható, hogy a fenti példákban leírt módszerrel és az SVF kiegészítésére javasolt parancsokkal a mérések elvégezhetőek. Az általános négy-pólusok méréséhez szükséges ABM és TBIC⁴ kapcsoló vezérléseket, valamint a mérés során felmerülő problémákat és azok megoldását részletesen tartalmazza a cikkem, [11] a részletek ismertetésétől itt terjedelmi okok miatt eltekintek.

Az ismertetett módszer hibahely-behatárolásra a következő módon és lépésekben 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 hibátlan-ságára, 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 2. pontban említett négy-póluselmélet módszereinek 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.

⁴ Test Bus Interface Circuit, tesztbuszra csatlakozás áramköre

5. Amennyiben a vizsgált négypólus hibás, a mért jellemzők alapján szintetizáljuk négypólust (vagy helyettesítő képét), azaz meghatározzuk az azt felépítő elemek paramétereit.
6. A paraméterek eltérése alapján behatároljuk a hibahelyet.

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
- sávszélesség
- oldalmeredekség

ÖSSZEFOGLALÁS

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 meghatározom a hiányosságokat.

Ezek után megkíséreltem a fenti elvet általánosítani, és megfogalmazni, 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 kialakítani egy jól használható kiegészítő parancskészletet, amelynek alkalmazhatóságát vizsgálataim során igazoltam. Összefüggést találtam korábbi kutatásaimmal: a javasolt kiegészítő parancskészlet egy lehetséges módszert kínál a korábban említett, kevert jelű peremfigyelést támogató áramkör működtetésére, a két megoldást együttes használata egy gyakorlatban is működőképes, hatékony módszer alapjait teheti le. A kiegészítő parancslista integrálható a korábbi ide kapcsolódó kutatásaimnál röviden ismertetett naplózó és öntesztelő rendszerben is, amely az alapvető analóg vizsgálatokra megfelelő lehet.

Eredményként kiemelném 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 válaszfezsültségek érzékelését, megmérését. Javaslom, hogy a tesztelési módszerek fejlesztését végző kutatók fontolják meg a soros vektoros formátum kibővítését az általam javasolt alapokon elindulva, amellyel hatékonyabbá tehető az analóg áramköri elemek vizsgálata, különösen a kevert jelű peremfigyelést támogató áramkörrel együtt használva.

FELHASZNÁLT SZABVÁNYOK

- [1] IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Architecture, IEEE Std 1149.1-2013, IEEE Computer Society, New York, 2013.
- [2] IEEE Standard for a Mixed-Signal Test Bus, IEEE Std 1149.4-2010, IEEE Computer Society, New York, 2011

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [3] J.C. Knight, Safety critical systems: challenges and directions, Orlando, IEEE, 2002.
- [4] Kenneth P. Parker, The Boundary-Scan Handbook, Switzerland, Springer International Publishing, 2016.
- [5] Harry Bleeker, Frans de Jong és Peter van den Eijnden, Boundary Scan Test - A Practical Approach, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [6] Texas Instruments Inc., IEEE Std 1149.1 (JTAG) Testability Primer, Dallas, Texas Instruments, 1997.
- [7] Molnár Zsolt, Analóg áramkörök beépített öntesztbe vonását támogató integrált áramkör, presented at the XXV. Kandó Konferencia, Budapest, 2009.
- [8] Zsolt Molnár, Logging the operation and enhancing the reliability of safety-critical embedded systems using self-test, Interdisciplinary Description of Complex Systems, 17 3A pp 492-496, 2019
- [9] Manoj Sachdev, A realistic defect oriented testability methodology for analog circuits, Journal of Electronic Testing, 6, pp. 265-276, 1995.
- [10] ASSET InterTech, Inc., „Serial Vector Format Specification,” in ASSET InterTech, Inc., Plano, 1999.
- [11] Molnár Zsolt, Analog cluster test using mixed signal boundary scan test method, presented at the Proceedings of Factory Automation 2013., Veszprém, 2013.